

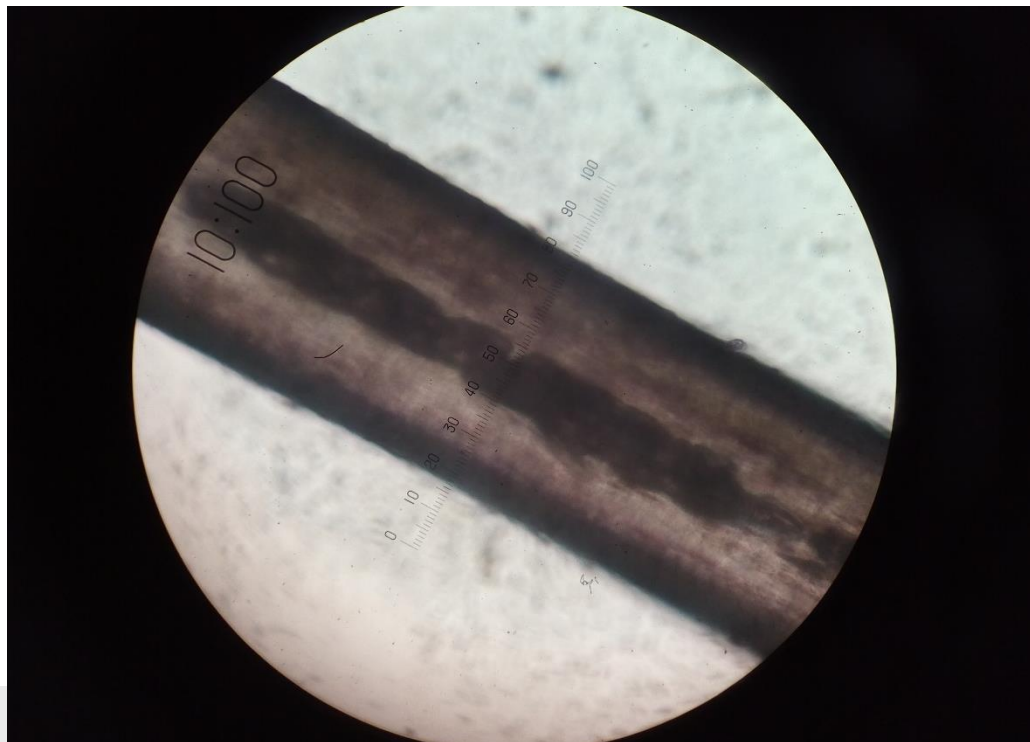
Grao en Bioloxía

Memoria do Traballo de Fin de Grao

Estudo das propiedades elásticas do cabelo

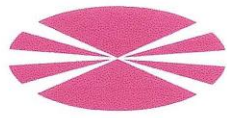
Estudio de las propiedades elásticas del cabello

Study of the elastic properties of the hair



Diego Cacheda Rodríguez

Febrero, 2017



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

D. Oscar Cabeza Gras y Dña. Montserrat Domínguez Pérez autorizan la presentación del trabajo de fin de grado **“Estudio de las propiedades elásticas del cabello”** presentado por **Diego Cacheda Rodríguez** para su defensa ante el tribunal calificador.

Dr. Oscar Cabeza Gras

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

En A Coruña a 16 de febrero de 2017

Índice

INTRODUCCIÓN	1
El pelo	1
Elasticidad y módulo de Young	2
OBJETIVOS	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Especies de muestreo	6
<i>Homo sapiens</i>	6
<i>Equus ferus caballus</i>	6
<i>Bos primigenius taurus</i>	7
Muestras	7
Técnicas	7
RESULTADOS	9
Vaca	10
Caballo	10
Humano	11
DISCUSIÓN	13
CONCLUSIONES	15
CONCLUSIÓNS	15
CONCLUSIONS	15
BIBLIOGRAFÍA	16
ANEXO	17

RESUMEN

El pelo es una estructura derivada de la piel, exclusiva de mamíferos y que está muy conservada en su linaje, confiriéndoles ventajas frente a condiciones o agentes externos, entre otras funciones. Está formado por tres capas, cutícula, corteza y médula, anatómicamente distintas entre sí y que le proporcionan una serie de propiedades físicas. En el presente trabajo mediremos y analizaremos para tres especies diferentes una de ellas, la elasticidad, y la compararemos con otros artículos relacionados. Para ello se hará uso del módulo de Young, un valor constante para cada material dentro de su límite elástico y que representa su capacidad de ser alterado por fuerzas de tracción o compresión. El método empleado es un ensayo de tracción, donde con la ayuda de un dinamómetro mediremos la elongación del pelo a distintas fuerzas. Con los resultados obtenidos se comprueba que el grosor de cada muestra determina cuan resistente es a la tracción, soportando mejor la fuerza cuanto mayor es su diámetro. Además, los valores obtenidos del módulo de Young confirman el gran parecido de la estructura interna que presenta el pelo, independientemente de a que especie pertenezca y coincidiendo con los recogidos en la bibliografía consultada.

RESUMO

O pelo é unha estrutura derivada da pel, exclusiva de mamíferos e que está moi conservada no seu linaxe, conferíndolles vantaxes fronte a condicións ou axentes externos, entre outras función. Está formado por tres capas, cutícula, corteza e médula, anatómicamente distintas entre si e que lle proporcionan unha serie de propiedades físicas. No presente traballo mediremos e analizaremos para tres especies diferentes unha delas, a elasticidade, e compararémosla con outros artigos relacionados. Para elo farase uso do módulo de Young, un valor constante para cada material dentro do seu límite elástico e que representa a súa capacidade de ser alterado por forzas de tracción ou compresión. O método empregado é un ensaio de tracción, onde coa axuda dun dinamómetro mediremos a elongación do pelo a distintas forzas. Cos resultados obtidos compróbase que o grosor de cada mostra determina canto de resistente é á tracción, soportando mellor a forza canto maior é o seu diámetro. Ademáis, os valores obtidos do módulo de Young confirman o gran parecido da estrutura interna que presenta o pelo, independentemente de a que especie pertenza e coincidindo cos recollidos na bibliografía.

ABSTRACT

The hair is a structure derived from the skin, exclusive of mammals and that is very conserved in its lineage, conferring them advantages against external conditions or agents, among other functions. It is formed by three layers, cuticle, cortex and medulla, anatomically different from each other and that provide a series of physical properties. In the present essay we will measure and analyze for three different species one of them, elasticity, and compare it with other related articles. For this, the Young's modulus will be used, a constant value for each material within its elastic limit and representing its capacity to be altered by tensile or compression forces. The method used is a tensile test, where with the aid of a dynamometer we measure the elongation of the hair to different forces. With the obtained results it is verified that the thickness of each sample determines how resistant it is to the traction, being able to withstand the force the greater its diameter. In addition, the values obtained from the Young's module confirm the great similarity of the internal structure that the hair presents, regardless of which species it belongs to and coinciding with those collected in the consulted bibliography.

Palabras clave

Pelo; elasticidad; módulo de Young; humano; caballo; vaca.

Palabras clave

Pelo; elasticidade; módulo de Young; humano; caballo; vaca.

Key words

Hair; elasticity; Young's modulus; human; horse; cow.

INTRODUCCIÓN

El pelo, como cualquier material, tiene unas propiedades físicas específicas que pueden ser estudiadas y medidas. Estas propiedades son elasticidad, plasticidad, fuerza, conductividad eléctrica, porosidad, textura y forma, y le dan el valor biológico por el cual, tras los procesos de evolución y selección, sigue siendo una característica clave que define al grupo de los mamíferos. Este trabajo se centra en la comparación de una de ellas, la elasticidad, obteniendo el material de muestra de tres especies diferentes (vaca, caballo y humano) dentro del abanico que se tuvo en cuenta en un primer momento. Más adelante se explicaran las causas de esa decisión y las características de las especies elegidas.

El pelo

El pelo es un material biológico exclusivo de los mamíferos, formado a partir de estructuras de la epidermis. Características propias como distribución, color, grosor, tamaño y demás, varían dependiendo de la especie, raza o incluso individuo y región del cuerpo. Su vida es limitada, variable e intermitente, intercalando fases de crecimiento (anágeno) con otras en regresión (catágeno) y otras en reposo (telógeno) (Guzmán Sánchez *et al.*, 2010). La primera fase es la más larga, pudiendo durar varios años y se caracteriza porque las células de la papila dérmica se dividen continuamente, aumentando la longitud del cabello. La fase catágeno es la más corta, de dos a tres semanas, en la que las células de la papila entran en apoptosis y se comienza a separar del pelo. Por último, el telógeno es la fase en la que el pelo ya no crece ni tiene aporte de nutrientes, pero aún no se ha caído, y puede durar unos tres meses (Suro Reyes, J.Á. *et al.*, 2007).

El pelo crece a partir del folículo piloso, una invaginación de la epidermis que atraviesa la dermis, y en cuyo fondo se encuentra la papila dérmica. En el fondo de esta estructura se dispone la papila dérmica, a partir de la cual se deriva el pelo por sucesivas divisiones. Las células de la cima de esta estructura van a producir la médula del pelo, mientras que la corteza se forma de las células del lateral y la cutícula de las periféricas.

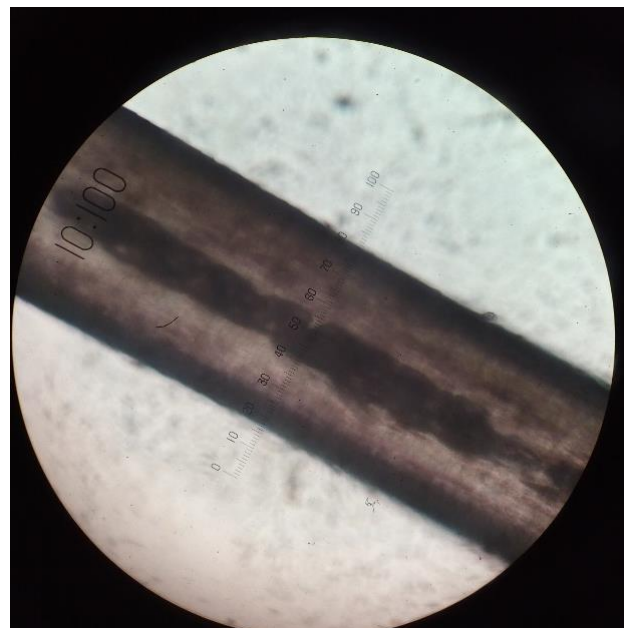
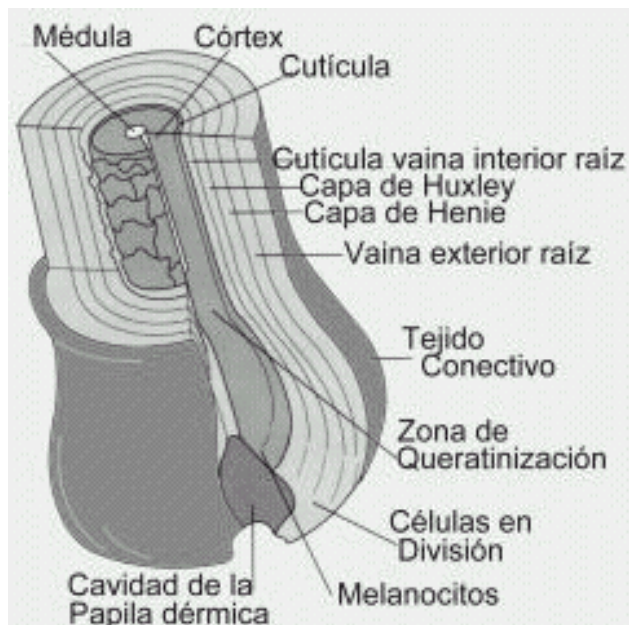


Fig. 1. Esquema de la estructura del pelo a nivel de la dermis (Vera, S.G., 2002)(Izq). Fotografía en microscopio de pelo de caballo (Fuente propia)(Drcha).

Una vez el pelo ha salido al exterior, la capa más externa es la cutícula, formada por superposición de células muy aplanadas y en forma de escama, disponiéndose igual que

estas con el extremo libre en dirección a la punta del pelo. Al igual que el resto de capas, su componente principal es la queratina, y su función es regular la hidratación del interior del pelo. Es la parte que confiere brillo y tacto al pelaje, y la que se ve más afectada con cualquier tipo de tratamiento agresivo. Siguiendo hacia el interior, encontramos la corteza. Es la capa principal del pelo y la que le proporciona la resistencia y la elasticidad. Sus células son fusiformes y están altamente empaquetadas y unidas por puentes disulfuro, pudiendo presentar pigmentos variables, proporcionando color y protección a rayos ultravioletas. Por último, la médula es la parte central del pelo, pero no siempre está presente, ya que sólo aparece en el pelo grueso. Sus células también están queratinizadas, pero son más grandes y vacuolizadas (Guzmán Sánchez, D.A. *et al.*, 2010).

Por otra parte, de forma interna se distinguen más capas que recubren al pelo, como se puede ver en la figura 1, y le proporcionan una guía de crecimiento y nutrientes, gracias a la irrigación. También es donde se encuentran las células nerviosas que le proporcionan sensibilidad, y se presentan células inmunitarias para proteger el poro de la entrada de agentes externos potencialmente perjudiciales. Sin embargo, en el caso de nuestro estudio no son relevantes, ya que no intervienen en las propiedades del pelo que vamos a analizar.

La gran variabilidad en dureza, grosor, largo, estructura interna o color, le proporciona la capacidad de servir para una gran variedad de funciones. Las principales son las siguientes:

- Protección frente a bajas temperaturas, con pelajes más densos y que retienen el calor corporal y que además impermeabilizan la cubierta.
- Protección frente a agentes externos, como polvo o sudor, tal y como hacen las cejas, pestañas y pelos de las fosas nasales.
- Protección contra la acción de los rayos solares, formando una barrera frente a la radiación ultravioleta.
- Propiocepción, proporcionando información de la localización del cuerpo en el espacio gracias a las vibrisas, que son pelos altamente inervados (felinos, fócidos...).
- Defensa frente a depredadores, por su forma y rigidez, formando espinas, como en erizos y equidnas.
- Absorción de calor. Este es el caso especial del oso polar, en el que el pelo carece de médula y tiene el interior hueco, formando un canal que redirige los rayos solares hacia la piel y maximizando el aporte de temperatura.
- Funciones estéticas, como en los humanos, en el que todas las sociedades le dieron una gran importancia, representando desde el rango social hasta la capacidad reproductiva, o incluso la religión.

Elasticidad y módulo de Young

La elasticidad es la propiedad que representa la variación temporal de la longitud de un material dado por efecto de una fuerza externa (Burbano De Ercilla, S., y Gracia Muñoz, C., 2003). Estas fuerzas no sólo dependen de la intensidad con las que se ejerzan, sino también del área sobre la que se aplican. De esta forma se puede establecer que el **esfuerzo** (σ) soportado por dicho material es igual al cociente entre la fuerza **soportada** (F) y el **área** (A) sobre la que es ejercida:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Cuando el esfuerzo aplicado es leve, las deformaciones del material son proporcionales a la fuerza, por lo que gráficamente se comporta de forma lineal (*Fig. 2*). Sin embargo, al aumentar esta fuerza, llegamos a un punto en el que la deformación deja de ser lineal y en la que el material se puede comportar de forma plástica (Jou Mirabent, D. *et al.*, 2009). Es decir, pasado un punto crítico, la deformación puede ser permanente aunque ya no se ejerza esfuerzo alguno. Además, todo material tiene un valor máximo de resistencia en el que se produce la rotura del mismo.

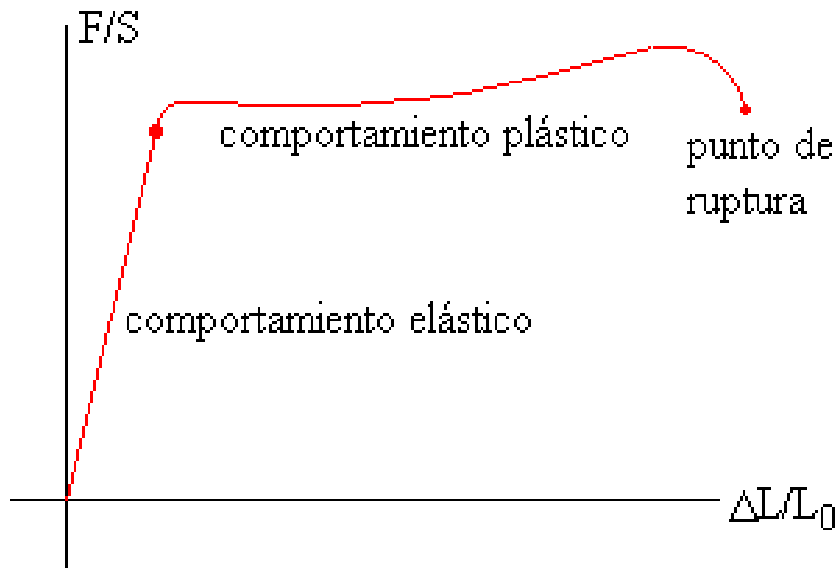


Fig. 2. Gráfica tipo que representa el esfuerzo respecto la deformación unitaria (Franco García, Á., 2010).

En nuestro caso en particular, el único tipo de esfuerzo que se medirá será el de tracción, que se produce cuando se somete un cuerpo a dos fuerzas iguales y de sentido contrario. Así, el área se establece como la sección transversal de dicho cuerpo y la deformación a la que se ve sometido se mide según la **deformación unitaria** (ϵ). Esta se define como el cociente entre la variación de longitud del objeto en una dirección y su longitud en esa misma dirección antes de estar sometido a la tracción:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

donde Δl ($\Delta l = l - l_0$) es el alargamiento del objeto (longitud final – longitud inicial) y l_0 , la longitud inicial del mismo.

Si el esfuerzo al que sometemos a la muestra no es muy grande, sin que supere la región de linealidad, el esfuerzo es proporcional a la deformación. De esta forma se establece una constante de proporcionalidad que relaciona cada fuerza con el estiramiento que produce. Este parámetro es característico para cada material y se denomina **módulo de Young** (E) (Ortuño Ortín, M., 1996). La expresión matemática que define la relación entre el esfuerzo y la deformación es la siguiente:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

El módulo de Young representa un valor constante e invariable para cada material y servirá para comparar las propiedades elásticas de cada una de las muestras de pelo de

los distintos individuos. Según esta expresión, se puede observar que a un mismo esfuerzo, un valor más alto del módulo de Young equivale a una menor deformación, lo que corresponde a un material más rígido, y viceversa (Cussó, F. *et al.*, 2004). A partir de las ecuaciones anteriores (ecuaciones 2 y 3) podemos obtener la siguiente expresión para el cálculo del módulo de Young:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (4)$$

Esta expresión es la que se utilizará para obtener los valores del módulo de Young de las muestras de este trabajo y que se compararán en el apartado de discusión.

OBJETIVOS

- Estudio y selección de las especies a analizar y toma de muestras.
- Planteamiento del sistema de medida según los parámetros a analizar y calibrado de los dispositivos.
- Medida experimental de las propiedades elásticas de los distintos tipos de pelo de las tres especies.
- Cálculo del módulo de Young para las tres especies y comparación con los posibles valores bibliográficos.
- Comparación de los valores obtenidos con el fin de poder estimar el comportamiento elástico de las distintas muestras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especies de muestreo

Todas las muestras recogidas provienen de únicamente 3 especies: 4 humanos (*Homo sapiens*), 9 caballos (*Equus ferus caballus*) y 12 vacas (*Bos primigenius taurus*). Esta elección ha sido guiada por varios factores. Por un lado, la disponibilidad de individuos en un ambiente cercano para poder recogerlas, y por otro, la capacidad de ser medidas con el proceso que se detallará más adelante. Esta segunda limitación se debe, entre otras cosas, al largo de las muestras, pues debían ser de al menos 10-15 cm, y a la sensibilidad del material empleado, dado que si sólo soportaban esfuerzos muy débiles, las herramientas de medida no eran capaces de registrarlos. Por esto mismo, se han tenido que descartar muestras recogidas de otras especies, tales como perro (*Canis lupus familiaris*), oveja (*Ovis orientalis aries*) o jabalí (*Sus scrofa*). En el caso del jabalí, el problema añadido fue que a partir de la mitad de la longitud del pelo, este se divide, generando varias puntas en abanico.

Homo sapiens

Es una especie de primates perteneciente al orden de los homínidos. Son la única especie conocida del género *Homo* que no se ha extinto. Son animales bípedos, lo que permitió el desarrollo de pulgares oponibles y con esto el comienzo de la capacidad de fabricación y uso de instrumentos. Su altura media es de 175 cm para los varones y de 162 cm para las hembras.

El pelo en esta especie se suele denominar como cabello, y aparece en casi toda la superficie corporal, exceptuando palmas de pies y manos, ombligo y mucosas, pero repartidos de forma desigual en el resto del cuerpo. La mayor densidad se encuentra en el cuero cabelludo, siendo muy variable en el resto del cuerpo y dependiendo de predisposición genética y efecto hormonal. El color más común del cabello es negro o castaño, pudiendo aparecer también como rubio (tonalidades amarillas) o pelirrojo (tonalidades rojizas/anaranjadas).

Equus ferus caballus

Se denomina así a la especie de mamífero perisodáctilo domesticado de la familia de los équidos. El tamaño de estos animales varía mucho, entre 142 cm como mínimo en caballos de silla y 183 cm en razas de tiro como máximo (Bongianni, M., 1988)

Tienen todo el cuerpo cubierto de pelo, generalmente corto, con excepción de la cola y la franja del cuello que sigue la línea de la espina dorsal, entre las orejas y la cruz (punto de intersección del cuello con el lomo del animal). Este pelaje presenta una extensa variedad de coloraciones y patrones, con un gran vocabulario técnico para nombrarlo dada la gran historia de cría por parte de los humanos, datada en la edad de bronce.



Fig. 3. Especímenes de *Equus ferus caballus* (Fuente propia).

Bos primigenius taurus

Es un mamífero artiodáctilo de la familia de los bóvidos, resultante de la domesticación del uro salvaje euroasiático (*Bos primigenius primigenius*) hace unos 10.000 años. Es un animal grande y de cuerpo robusto, con una altura variable entre 120-150 cm hasta la cruz (Wilson, D.E., y Reeder, D.M., 2005).

Al igual que los caballos, tienen todo el cuerpo cubierto de pelo generalmente corto, exceptuando penachos en el extremo terminal de la cola y la franja entre los cuernos. La coloración del pelaje varía entre el blanco y el negro, junto con tonalidades rojizas y marrones. Estos colores pueden presentarse en manchas o ser completamente lisos.

Muestras

Todas las muestras han sido obtenidas de forma que no se vieran afectadas sus propiedades, es decir, sin tirar de los pelos con una fuerza excesiva que superara el límite elástico. En el caso de los humanos, todas las muestras pertenecen a mujeres que no se sometieron a tratamientos agresivos en el cabello, tales como tintes, alisados extremos, permanentes o cepillados excesivos, ya que pueden dañar la estructura y sus propiedades (Fu, J.M., y Price, V.H., 2009). Con respecto a caballos y vacas, sus muestras fueron obtenidas cortando el pelo lo más cerca de la base como fuera posible, para así evitar dolor en el animal al ser extraído.

Los pelos recogidos se identificaron por la especie, raza y/o nombre de cada individuo, manteniéndolos separados y en las mismas condiciones de temperatura y humedad para evitar variaciones, ya que también afectan a sus propiedades (Jamart, J. *et al.*, 2015). Estas condiciones se han medido con una estación meteorológica portátil Krestel 4500 y fueron estables en todo el proceso de toma de datos, manteniéndose entre 23-25°C y 58-60% de humedad.

Técnicas

El sistema de medida utilizado fue un ensayo de tracción, en el que se fijaba el extremo basal de un pelo a un palillo mediante masilla adhesiva removible, y este a una mesa de la misma forma, tal y como se puede ver en la figura 3. Siempre se medía la franja basal, ya que la elasticidad también puede variar a lo largo del pelo (Quist *et al.*, 2011). La otra punta del pelo se enganchaba al extremo de un dinamómetro y se aseguraba también con la misma masilla. De esta forma, tenemos una región intermedia de una longitud fácilmente medible con un calibre y cuya variación será únicamente debida a la tracción ejercida. Una vez colocado el sistema, se procedió a tirar del extremo libre del dinamómetro, de forma que se controlaba la fuerza empleada con la escala de este. Así, se tomaron medidas de una media de tres muestras por cada individuo a intervalos de 10 gramos (unidad representada en la escala) hasta los 100 gramos, que se corresponde con el máximo del dispositivo.

Previamente a estas medidas tanto el calibre como el dinamómetro han sido calibrados. El primero se realizó tomando medidas de objetos de una longitud conocida, mientras que al segundo se le colocaron pesas correspondientes a los niveles de la escala representada.

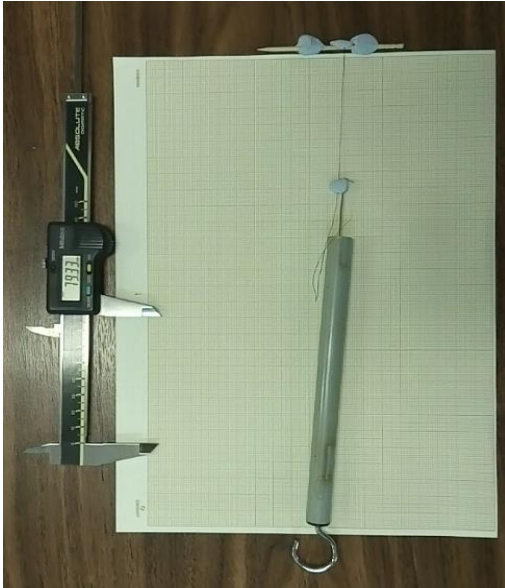


Fig. 4. Sistema de medida utilizado en el ensayo (Fuente propia).

Una vez realizado el ensayo, se procedió a medir el grosor de cada pelo analizado, ya que como se expresa en la ecuación (1), es necesario para calcular el esfuerzo al que es sometido. Para ello, se usó un microscopio Nikon YS100 con un ocular 10x/18 provisto de escala con la que poder medirlo. Para mayor precisión en la medida se empleó el objetivo de x40, teniendo en cuenta posteriormente el factor de conversión de las unidades de la escala a unidades de medida para los posteriores cálculos (1 división=2,2 μm).

Todos los datos han sido anotados e introducidos en un archivo de Excel, donde además ya se han realizado prácticamente la totalidad de los cálculos de deformación unitaria, esfuerzo y módulo de Young.

RESULTADOS

En la siguiente tabla se ha realizado un listado de los individuos y muestras, junto con sus diámetros en μm , la raza a la que pertenezca y la nomenclatura que se utilizará para nombrar a cada una.

Tabla 1. Resumen de las muestras, su diámetro y la nomenclatura utilizada para cada una.

Nº	Especie (Raza)	Muestra	Diámetro $\pm 1\mu\text{m}$	Nombre
1	humano 1	1	77	H1/1
2	humano 1	2	81	H1/2
3	humano 1	3	75	H1/3
4	humano 2	1	75	H2/1
5	humano 2	2	55	H2/2
6	humano 2	3	44	H2/3
7	humano 2	4	73	H2/4
8	humano 3	1	70	H3/1
9	humano 3	2	64	H3/2
10	humano 3	3	84	H3/3
11	humano 4	1	95	H4/1
12	humano 4	2	59	H4/2
13	humano 4	3	70	H4/3
14	caballo 1 (Español)	1	88	C1/1
15	caballo 1 (Español)	2	123	C1/2
16	caballo 1 (Español)	3	121	C1/3
17	caballo 1 (Español)	4	119	C1/4
18	caballo 2 (Árabe)	1	108	C2/1
19	caballo 2 (Árabe)	2	125	C2/2
20	caballo 2 (Árabe)	3	136	C2/3
21	caballo 2 (Árabe)	4	103	C2/4
22	caballo 3 (Español)	1	125	C3/1
23	caballo 3 (Español)	2	163	C3/2
24	caballo 4 (Árabe)	1	128	C4/1
25	caballo 4 (Árabe)	2	128	C4/2
26	caballo 4 (Árabe)	3	86	C4/3
27	caballo 4 (Árabe)	4	92	C4/4
28	caballo 4 (Árabe)	5	99	C4/5
29	caballo 5 (Español)	1	97	C5/1
30	caballo 5 (Español)	2	75	C5/2
31	caballo 5 (Español)	3	92	C5/3
32	caballo 6 (Español)	1	136	C6/1
33	caballo 6 (Español)	2	161	C6/2
34	caballo 6 (Español)	3	136	C6/3
35	caballo 7 (Angloárabe)	1	106	C7/1
36	caballo 7 (Angloárabe)	2	121	C7/2
37	caballo 7 (Angloárabe)	3	121	C7/3
38	caballo 8 (Español)	1	134	C8/1
39	caballo 8 (Español)	2	132	C8/2
40	caballo 8 (Español)	3	141	C8/3
41	caballo 9 (Español)	1	141	C9/1
42	caballo 9 (Español)	2	114	C9/2
43	caballo 9 (Español)	3	123	C9/3
44	vaca 1 (Rubia)	1	143	V1/1
45	vaca 1 (Rubia)	2	121	V1/2
46	vaca 1 (Rubia)	3	141	V1/3
47	vaca 2 (Limousin)	1	119	V2/1
48	vaca 2 (Limousin)	2	185	V2/2
49	vaca 2 (Limousin)	3	139	V2/3
50	vaca 3 (Rubia)	1	141	V3/1
51	vaca 3 (Rubia)	2	114	V3/2
52	vaca 3 (Rubia)	3	136	V3/3
53	vaca 4 (Fleckvieh)	1	180	V4/1
54	vaca 4 (Fleckvieh)	2	130	V4/2
55	vaca 4 (Fleckvieh)	3	134	V4/3
56	vaca 5 (rubia)	1	169	V5/1
57	vaca 5 (rubia)	2	145	V5/2
58	vaca 5 (rubia)	3	158	V5/3
59	vaca 6 (Blonde)	1	158	V6/1
60	vaca 6 (Blonde)	2	161	V6/2
61	vaca 6 (Blonde)	3	130	V6/3
62	vaca 7 (Frisona)	1	128	V7/1
63	vaca 7 (Frisona)	2	134	V7/2
64	vaca 7 (Frisona)	3	132	V7/3
65	vaca 8 (Parda alpina)	1	147	V8/1
66	vaca 8 (Parda alpina)	2	130	V8/2
67	vaca 8 (Parda alpina)	3	112	V8/3
68	vaca 9 (Frisona)	1	136	V9/1
69	vaca 9 (Frisona)	2	150	V9/2
70	vaca 9 (Frisona)	3	139	V9/3
71	vaca 10 (Frisona)	1	154	V10/1
72	vaca 10 (Frisona)	2	139	V10/2
73	vaca 10 (Frisona)	3	132	V10/3
74	vaca 11 (Pasidega)	1	150	V11/1
75	vaca 11 (Pasidega)	2	174	V11/2
76	vaca 11 (Pasidega)	3	165	V11/3
77	vaca 12 (Frisona)	1	128	V12/1
78	vaca 12 (Frisona)	2	152	V12/2
79	vaca 12 (Frisona)	3	176	V12/3

Analizando los resultados obtenidos se pueden ver las diferencias entre las especies, tanto de grosor del pelo, como de elasticidad y resistencia a la rotura por tracción. Dado que el dinamómetro utilizado tiene una escala representada en gramos, se ha realizado la conversión de estos valores de masa a unidades de fuerza, a efectos de listar los datos en unidades que representen las magnitudes necesarias para los cálculos pertinentes ($F=m \cdot g$, siendo F la fuerza, m la masa y g la aceleración gravitacional, cuyo valor utilizado fue $9,8 \text{ m/s}^2$).

A continuación, se incluyen tablas de datos y gráficas representativas de cada especie junto con una explicación de los datos, incluyendo los datos y gráficas de todas las muestras en un anexo.

Vaca

Las muestras de vaca fueron, sin duda, las que menos variación en su longitud presentaron. Tanto es así, que no se pudieron analizar cuantitativamente. Con respecto al análisis cualitativo, en los datos y las gráficas se puede ver que son altamente resistentes y muy poco elásticos, con una deformación unitaria que no supera el 0,07 (tabla 2), mientras que existen casos en los que ese valor es de 0 al final del ensayo (tabla 3). El diámetro medio de las 36 muestras analizadas es de unos 143,86 μm .

Tabla 2. Datos de la muestra V6/1.

(F ± 1) mN	(l $\pm 0,01$) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	67,71	0,0000	0,000
196	67,71	0,0000	0,010
294	68,50	0,0117	0,015
392	68,50	0,0117	0,020
490	68,94	0,0182	0,025
588	69,43	0,0254	0,030
686	69,43	0,0254	0,035
784	69,69	0,0292	0,040
882	70,22	0,0371	0,045
980	72,45	0,0700	0,050

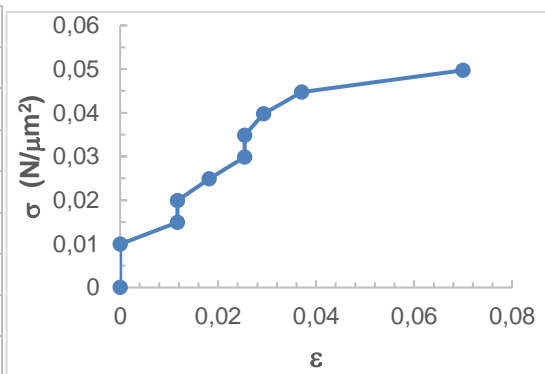


Fig. 5. Gráfica de esfuerzo-deformación de V6/1.

Tabla 3. Datos de la muestra V2/1.

(F ± 1) mN	(l $\pm 0,01$) mm	ϵ	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	80,82	0,0	0,000
196	80,82	0,0	0,017
294	80,82	0,0	0,027
392	80,82	0,0	0,035
490	80,82	0,0	0,044
588	80,82	0,0	0,053
686	80,82	0,0	0,062
784	80,82	0,0	0,071
882	80,82	0,0	0,080
980	80,82	0,0	0,088

Caballo

Las muestras de caballo no se diferencian en gran medida de lo analizado en el caso de las vacas, pero sí se pudo incluir en el cálculo del módulo de Young al establecerse zonas claramente lineales. En general, sigue siendo un pelo grueso, con una media de 119,17 μm de diámetro, y con una gran resistencia a la tracción, pudiendo soportar la práctica totalidad de muestras los 980 mN de tracción (el 80% soporta esa fuerza). También han tenido una mayor capacidad de estiramiento, alcanzando un valor de (25,01 \pm 0,02) mm, quintuplicando el máximo encontrado en las muestras de vaca.

Tabla 4. Datos de la muestra C4/4.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,009$	($\sigma \pm 0,05$) mN/ μm^2
0	88,76	0,000	0,00
196	89,51	0,008	0,03
294	89,90	0,013	0,04
392	91,01	0,025	0,06
490	91,01	0,025	0,07
588	92,73	0,045	0,09
686	98,56	0,110	0,10
784	106,14	0,196	0,12
882	111,10	0,252	0,13
980	114,78	0,293	0,15

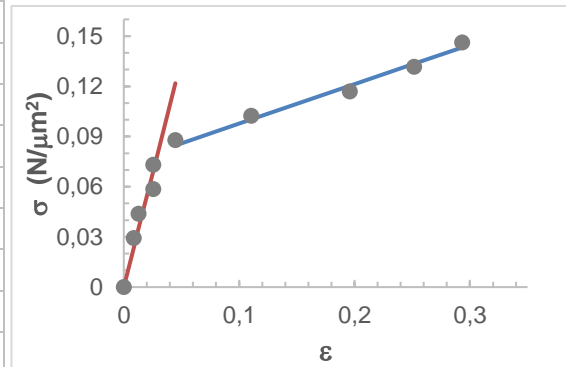


Fig. 6. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/4.

En estas gráficas se puede ver que se han representado dos partes de la recta de forma lineal. Estas se corresponden a dos zonas en las que se puede extrapolar al valor del módulo de Young. En el caso de la línea roja, se corresponde con el valor perteneciente a la corteza (E corteza), mientras que la azul es la de la médula (E médula). Esta separación entre los módulos de ambas capas se puede realizar por la diferencia anatómica que representan y que les confiere propiedades diferentes, y se observará también en las muestras de pelo humano.

Humano

Los análisis realizados a las muestras de humanos reflejan que son menos resistentes a la tracción, ya que su deformación unitaria alcanza valores mucho mayores, alrededor de 0,41, mientras que en caballo ronda el 0,22. Además, la inmensa mayoría, un 80%, sufre rotura antes de alcanzar la tensión máxima. De cada individuo se ha escogido la muestra más representativa para analizarla, ya que todas siguen el mismo patrón. El diámetro medio de las 13 muestras de pelo humano analizadas ha sido de 70,91 μm

Tabla 5. Datos de la muestra H1/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	97,19	0,0000	0,00
196	98,45	0,0130	0,04
294	99,17	0,0204	0,07
392	104,39	0,0741	0,09
490	121,72	0,2524	0,11
588	125,02	0,2863	0,13
686	129,42	0,3316	0,16
784	133,22	0,3707	0,18

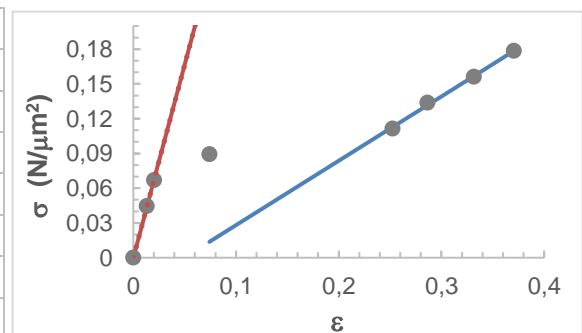


Fig. 7. Gráfica de esfuerzo-deformación de H1/3.

Tabla 6. Datos de la muestra H2/1.

(F±1) mN	(l±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,009$) mN/ μm^2
0	74,40	0,0000	0,000
196	75,94	0,0207	0,045
294	76,35	0,0262	0,067
392	77,36	0,0398	0,098
490	86,08	0,1570	0,112
588	94,36	0,2683	0,134
686	98,27	0,3208	0,156
784	101,70	0,3669	0,178
882	103,74	0,3944	0,201
980	108,19	0,4542	0,223

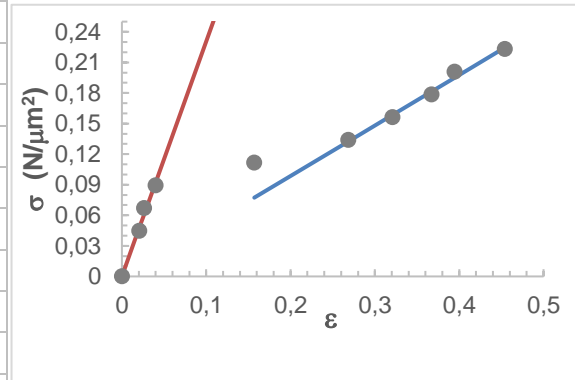


Fig. 8. Gráfica de esfuerzo-deformación de H2/1.

Tabla 7. Datos de la muestra H3/1.

(F±1) mN	(l±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,009$) mN/ μm^2
0	88,80	0,0000	0,000
196	91,29	0,0280	0,050
294	92,06	0,0367	0,076
392	95,16	0,0716	0,101
490	111,54	0,2561	0,126
588	116,19	0,3084	0,151
686	120,96	0,3622	0,176
784	124,19	0,3985	0,201

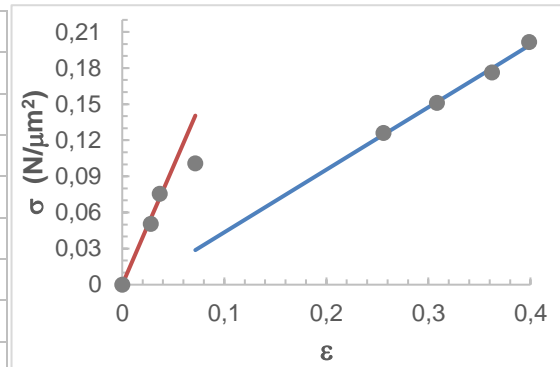


Fig. 9. Gráfica de esfuerzo-deformación de H3/1.

DISCUSIÓN

En un primer momento se van a analizar los datos obtenidos de cada especie individualmente, para que al hacer las comparaciones entre ellas exista una base para entenderlo más fácilmente.

En el caso de las muestras de vaca, los datos recogidos han sido muy uniformes, con unas variaciones en la longitud respecto a la fuerza ejercida muy pequeñas. De hecho, la variación de longitud más grande que se ha registrado es de $(4,74 \pm 0,02)$ mm en la muestra V6/1 (tabla 2). Del mismo modo, al analizar las gráficas no se aprecian zonas lineales en donde se pueda calcular el módulo de Young. Además, las fuerzas ejercidas no han sido suficientes en ningún caso para superar el límite de resistencia de rotura, ya que el rango de fuerza del dispositivo resultó ser demasiado pequeño, pues el diseño de la prueba estaba optimizado para las muestras de humano. Finalmente, la separación de los datos por razas no ha sido efectiva en esta especie, ya que los valores obtenidos son semejantes independientemente del tipo de vaca al que pertenezca el pelo.

Con respecto al pelo de caballo, se prestó mejor a la toma de datos, proporcionando curvas típicas para este tipo de modelos de elasticidad, con regiones de las que se puede extrapolar el valor del módulo de Young. Se puede inferir de esta información, que son menos resistentes a la tracción, llegando en un 20% de los casos a superar el límite de rotura, pero con mayor elasticidad, dado que se ve una mayor afectación por la fuerza de tiro realizada. El estiramiento más grande se produjo en la muestra C4/5 y fue de $(25,01 \pm 0,02)$ mm (tabla 4). Sin embargo, los datos en esta especie no han sido tan uniformes como en la anterior, ya que también se encontraron muestras con baja o ninguna afectación a la hora del ensayo, pareciéndose más a muestras de vaca que a otras de caballo. Esto es debido al rango de grosores que presentan las muestras, que parece estar ligeramente determinado por la raza del animal, siendo más finos los de árabe y angloárabe y más gruesos los de español.

El pelo de los humanos ha sido el que ha proporcionado datos más completos, ya que se ha podido determinar el esfuerzo máximo soportado en un 80% de las muestras a la hora de romperse. Esto también nos dice que es poco resistente a la tracción y solo en un quinto de los casos es capaz de soportar esfuerzos de al menos 980 mN. Visto desde otro punto, también se puede asegurar que es muy elástico, con aumentos en la longitud de hasta $(40,16 \pm 0,02)$ mm en la muestra H4/1, frente a los $(4,74 \pm 0,02)$ mm antes citados para la muestra de vaca. Los datos de esta especie también han sido muy uniformes, presentando similitudes entre los resultados o las gráficas, y de estas con la gráfica modelo del comportamiento elástico.

En general, se ve una clara diferenciación entre las tres especies, tanto en resistencia como en elongación. Lo primero se puede relacionar con el grosor del pelo, ya que los más gruesos son los más resistentes. Esto se deduce porque al aplicar una misma fuerza a secciones de diferente tamaño, las más pequeñas soportarán esfuerzos mayores por unidad de área. Con esto se explica el hecho de que el pelo de vaca sea el que soporta mayores fuerzas sin romperse, ya que es el de mayor grosor, frente a los humanos, que tienen el pelo más fino y quebradizo. Por otro lado, los de estos últimos son claramente más elásticos, diferenciándose mucho de las otras dos especies. Esto puede deberse a la acción de productos utilizados en el lavado habitual del pelo, que mejoran las características del cabello, ya que a grosores parecidos en otras especies la elongación es menor, como ocurre entre las muestras H4/1 y C5/1.

Tabla 8. Datos del módulo de Young y esfuerzo máximo soportado de las muestras analizadas.

MUESTRA	E corteza (mN/ μm^2)	E médula (mN/ μm^2)	$\sigma_{\text{máx}}$ corteza (mN/ μm^2)	$\sigma_{\text{máx}}$ médula (mN/ μm^2)
H1/3	3,3 \pm 0,2	0,56 \pm 0,04	0,089	0,178
H2/1	2,3 \pm 0,1	0,50 \pm 0,03	0,112 \pm 0,006	>0,22 \pm 0,01
H3/1	1,9 \pm 0,1	0,520 \pm 0,004	0,101 \pm 0,006	0,20 \pm 0,01
H4/3	1,5 \pm 0,1	0,60 \pm 0,04	0,101 \pm 0,006	0,20 \pm 0,01
C2/1	1,79 \pm 0,09	0,092 \pm 0,005	0,054 \pm 0,002	0,075 \pm 0,003
C4/4	2,7 \pm 0,1	0,24 \pm 0,01	0,088 \pm 0,004	>0,146 \pm 0,006
C5/3	3,3 \pm 0,2	0,131 \pm 0,008	0,102 \pm 0,005	>0,146 \pm 0,006
C7/2	2,1 \pm 0,1	0,068 \pm 0,003	0,068 \pm 0,002	>0,085 \pm 0,003
C7/3	2,3 \pm 0,1	0,068 \pm 0,003	0,060 \pm 0,002	0,077 \pm 0,003

Al comenzar el cálculo del módulo de Young, no se pudo obtener su valor de las gráficas de las muestras de vaca, sin embargo, en las muestras de caballo y humano, se observaron en cada una dos zonas que corresponden con secciones de las gráficas de las que se puede extrapolar valores de dicho módulo. Esto puede deberse a la diferente resistencia de las distintas capas del pelo. Estas capas serían las dos más internas, ya que al no estar completamente unidas entre sí las células de la cutícula (Richena, M., y Rezende, C.A., 2015), no tendrían eficacia en términos de resistencia. En la tabla 8 se pueden ver ambos valores para cada muestra, correspondiendo el mayor con el valor para la corteza y el menor para la médula. Esta conclusión deriva de la comparación con ensayos de tracción de otros materiales, donde la sección interna es la que más esfuerzo resiste.

Como se ve en las gráficas, al comenzar la tracción el pelo se estira lentamente hasta que alcanza un punto de inflexión. Este punto se correspondería con la rotura de la corteza, mientras que la médula sufre un estiramiento más brusco en un principio, para luego comenzar otra zona lineal correspondiente a su módulo de Young, y seguidamente alcanza su rotura.

Además, la comparación de los valores obtenidos del módulo de Young nos hace ver que a pesar de las diferencias en grosor o resistencia, la estructura del pelo es uniforme entre especies y que la fuerza que le confiere la queratina es similar en todos. Esto se puede extrapolar de los datos recogidos en la tabla, en donde se puede ver que los valores de humanos y caballos son similares. También en los artículos de Kania, M. *et al.* (2009) y Quist, B.W. *et al.* (2011) el valor del módulo de Young presenta valores similares, por lo que se podría decir que el sistema que se ha usado en el presente trabajo cumple el propósito marcado en los objetivos del mismo. Otro detalle sobre los valores obtenidos para estas constantes es su rango, entre 1,5 y 3,3 mN/ μm^2 , pero en el artículo de Quist (2011) se puede ver que también obtiene valores dispares, incluso más que los nuestros.

CONCLUSIONES

La estructura del pelo es algo muy conservado evolutivamente en el linaje de los mamíferos, tanto en estructura interna como en desarrollo. Las variaciones que presenta en tamaño, coloración o grosor, son las que le confieren sus diferentes propiedades. Es esta última la que parece que afecta en mayor medida a su resistencia a la tracción, según los datos obtenidos, ya que a mayor sección transversal del pelo, menor será el esfuerzo que tendrá que resistir por unidad de superficie. Esto se ha visto en mayor grado en la comparación entre el pelo de vaca y humano, situándose el de caballo en un punto intermedio.

Con respecto al módulo de Young, no se han observado diferencias entre las especies en las que se ha podido medir, cubriendo un rango de entre 1,5 y 3,3 mN/ μm^2 para la corteza y de 0,068 y 0,6 mN/ μm^2 para la médula. Esto puede considerarse una prueba de que a pesar de las diferencias que presentan externamente, la estructura interna es muy semejante. También en otros artículos consultados los valores de esta constante se sitúan en el mismo rango, aunque sólo consideran que existe un módulo por pelo y no lo dividen por capas.

CONCLUSIÓNS

A estrutura do pelo é algo moi conservado evolutivamente no linaxe dos mamíferos, tanto en estrutura interna como en desenvolvemento. As variacións que presenta en tamaño, coloración ou grosor, son as que lle confiren as súas diferentes propiedades. É esta última a que parece que afecta en maior medida a súa resistencia a tracción, según os datos obtidos, xa que, canto maior é a sección transversal do pelo, menor será o esforzo que terá que resistir por unidade de superficie. Isto viuse en maior grado na comparación entre o pelo de vaca e o humano, situándose o de cabalo nun punto intermedio.

En relación ao módulo de Young, non se observaron diferenzas entre as especies nas que se puido medir, cubrindo un rango de entre 1,5 e 3,3 mN/ μm^2 para a corteza e entre 0,068 e 0,6 mN/ μm^2 para a médula. Isto pode considerarse unha proba de que a pesar das diferenzas que presentan exteriormente, a estrutura interna é moi semellante. Tamén en outros artigos consultados os valores desta constante se sitúan no mesmo rango, aínda que só consideran que existe un módulo por pelo e non o dividen nas dúas capas.

CONCLUSIONS

The hair structure is very evolutionarily conserved in the mammalian lineage, both in internal and developing structures. The variations that it presents in size, coloration or thickness, are those that give its different properties. It is the latter that seems to affect to a greater extent its tensile strength, according to the data obtained, because the greater cross section of hair, the less the effort that will have to resist per unit area. This has been seen to a greater degree in the comparison between cow's hair and human hair, with the horse standing at an intermediate point.

With respect to the Young's modulus, no differences were observed between the species in which it was possible to measure, covering a range of between 1,5 and 3,3 mN/ μm^2 for the bark and of 0,068 and 0,6 mN/ μm^2 for the medulla. This can be considered as proof that despite the differences they present externally, the internal structure is very similar. Also in other articles consulted the values of this constant are in the same range, although they only consider that there is a module per hair and do not divide it by layers.

BIBLIOGRAFÍA

- Bongianni, Maurizio. 1988. *Simon and Schuster's guide to horses & ponies of the world*. Milan: Simon and Schuster INC.
- Burbano De Ercilla, Santiago, y Carlos Gracia Muñoz. 2003. *Física general*. 32.^a ed. Tebar.
- Cussó, Fernando, Cayetano López, y Raúl Villar. 2004. *Física de los procesos biológicos*. Ariel.
- Franco García, Ángel. 2010. «Curso interactivo de física en internet». http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/alargamiento/alargamiento.htm (12 de junio de 2016).
- Fu, Jennifer M., y Vera H. Price. 2009. «An approach to hair loss in women». *Cosmetic Dermatology* 22(4): 201-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sder.2009.04.004>.
- Guzmán Sánchez, Daniela Araucaria, Guzmán Alfaro Alfaro, y Cecilia Sandoval-tress. 2010. «Estructura molecular y desarrollo del pelo». *DermatologíaCMQ* 8(1): 54-61.
- Jamart, J., M. Djaghloul, J. M. Bergheau, y H. Zahouani. 2015. «Effect of water desorption on the rheology and dynamic response of human hair to a non-contact impact». *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 46: 176-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.02.029>.
- Jou Mirabent, David, Josep Enric Llebot Rabagliati, y Carlos Pérez García. 2009. *Física para las ciencias de la vida*. McGraw Hill.
- Kania, Malgorzata, Dorota Mikolajewska, Krzysztof Marycz, y Magdalena Kobielarz. 2009. «Effect of diet on mechanical properties of horse 's hair». *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 11(3).
- Ortuño Ortín, Miguel. 1996. «Física para biología, medicina, veterinaria y farmacia».
- Quist, Brian W, Rafay A Faruqi, y Mitra J Z Hartmann. 2011. «Variation in Young 's modulus along the length of a rat vibrissa». *Journal of Biomechanics* 44(16): 2775-2781.
- Richena, M., y C. A. Rezende. 2015. «Effect of photodamage on the outermost cuticle layer of human hair». *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 153: 296-304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.10.008>.
- Suro Reyes, José Ángel, Luisa Ma. Gutiérrez Fernández, Javier Ruiz Ávila, y Pierre Bouhanna. 2007. «El pelo. Generalidades y funciones». 5(4): 218-223.
- Vera, Sergio Gustavo. 2002. «Estudio forense del pelo». <http://www.monografias.com/trabajos10/pelo/pelo.shtml> (12 de enero de 2017).
- Wilson, Don E, y DeeAnn M Reeder. 2005. «Bos taurus». En *Mammal species of the world*, Baltimore: Johns Hopkins University Press.

ANEXO

Tabla 9. Datos de la muestra V1/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	70,62	0,0000	0,000
196	71,04	0,0059	0,012
294	71,59	0,0137	0,018
392	71,59	0,0137	0,024
490	71,86	0,0176	0,031
588	71,86	0,0176	0,037
686	71,86	0,0176	0,043
784	71,86	0,0176	0,049
882	72,59	0,0279	0,055
980	72,59	0,0279	0,061

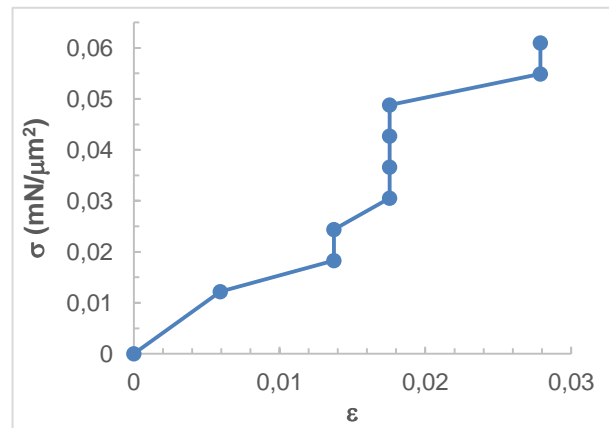


Fig. 10. Gráfica de esfuerzo-deformación de V1/1.

Tabla 10. Datos de la muestra V1/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	61,83	0	0,000
196	62,84	0,0163	0,017
294	62,84	0,0163	0,026
392	62,84	0,0163	0,034
490	63,08	0,0202	0,043
588	63,18	0,0218	0,051
686	64,08	0,0364	0,060
784	64,08	0,0364	0,068
882	64,08	0,0364	0,077
980	64,08	0,0364	0,085

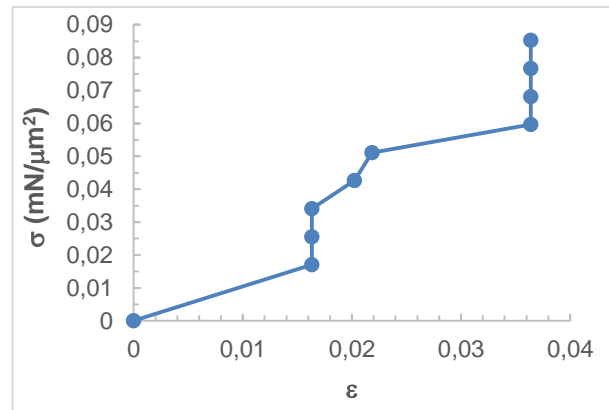


Fig. 11. Gráfica de esfuerzo-deformación de V1/2.

Tabla 11. Datos de la muestra v1/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0004$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	56,28	0,0000	0,000
196	56,33	0,0009	0,013
294	56,33	0,0009	0,019
392	56,33	0,0009	0,025
490	56,33	0,0009	0,032
588	56,33	0,0009	0,038
686	56,33	0,0009	0,044
784	56,33	0,0009	0,050
882	56,33	0,0009	0,057
980	56,33	0,0009	0,063

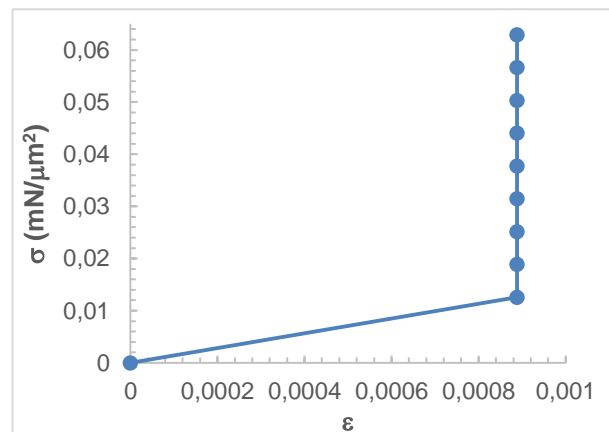


Fig. 12. Gráfica de esfuerzo-deformación de V1/3.

Tabla 12. Datos de la muestra V2/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε	(σ ±0.003) mN/μm ²
0	80,82	0,000	0,000
196	80,82	0,000	0,018
294	80,82	0,000	0,027
392	80,82	0,000	0,035
490	80,82	0,000	0,044
588	80,82	0,000	0,053
686	80,82	0,000	0,062
784	80,82	0,000	0,071
882	80,82	0,000	0,080
980	80,82	0,000	0,088

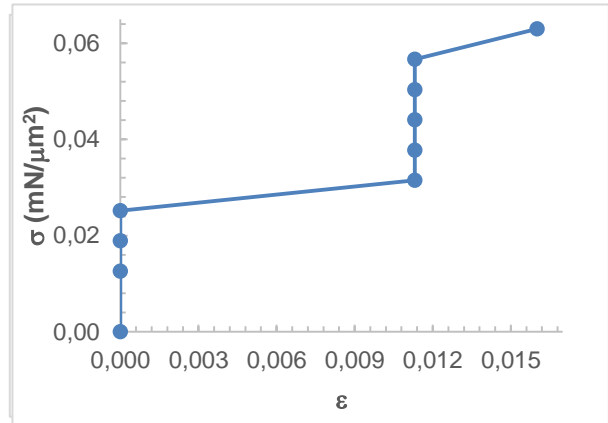


Fig. 13. Gráfica de esfuerzo-deformación de V2/1.

Tabla 13. Datos de la muestra V2/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.0008) mN/μm ²
0	74,59	0,0000	0,0000
196	74,59	0,0000	0,0073
294	75,20	0,0082	0,0110
392	75,20	0,0082	0,0146
490	75,20	0,0082	0,0183
588	75,20	0,0082	0,0219
686	75,20	0,0082	0,0256
784	75,20	0,0082	0,0292
882	75,20	0,0082	0,0329
980	75,20	0,0082	0,0365

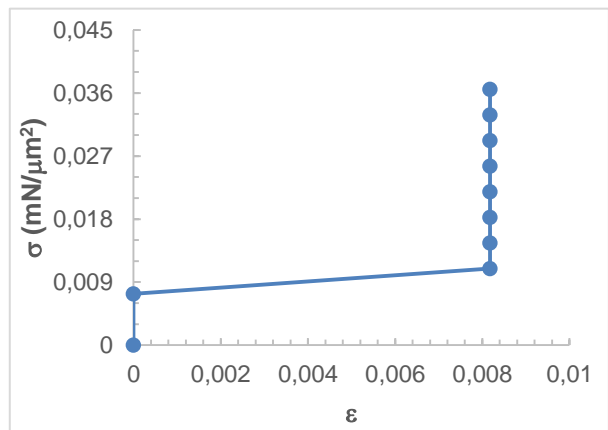


Fig. 14. Gráfica de esfuerzo-deformación de V2/2.

Tabla 14. Datos de la muestra V2/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.002) mN/μm ²
0	71,42	0,0000	0,000
196	71,42	0,0000	0,013
294	71,42	0,0000	0,020
392	71,42	0,0000	0,026
490	71,42	0,0000	0,033
588	71,42	0,0000	0,039
686	71,42	0,0000	0,046
784	72,33	0,0127	0,052
882	72,33	0,0127	0,059
980	72,33	0,0127	0,065

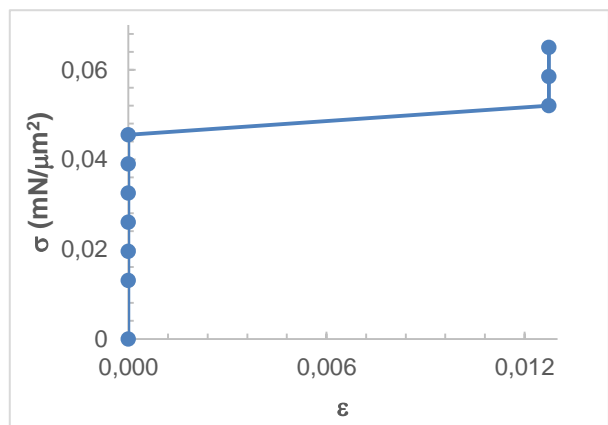


Fig. 15. Gráfica de esfuerzo-deformación de V2/3.

Tabla 15. Datos de la muestra V3/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	68,09	0,0000	0,000
196	68,09	0,0000	0,013
294	68,09	0,0000	0,019
392	68,09	0,0000	0,025
490	68,86	0,0113	0,032
588	68,86	0,0113	0,038
686	68,86	0,0113	0,044
784	68,86	0,0113	0,050
882	68,86	0,0113	0,057
980	69,18	0,0160	0,063

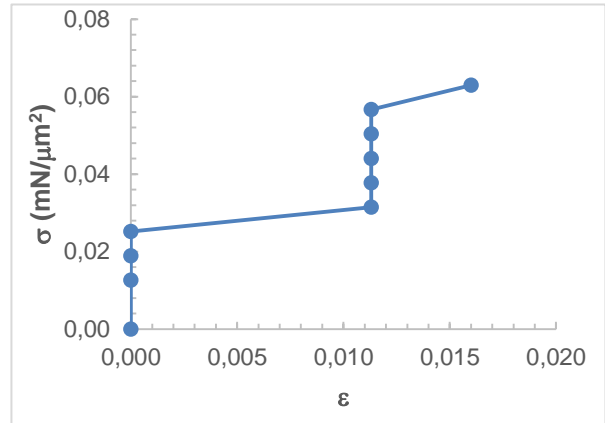


Fig. 16. Gráfica de esfuerzo-deformación de V3/1.

Tabla 16. Datos de la muestra V3/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	75,83	0,0000	0,000
196	76,18	0,0046	0,019
294	76,18	0,0046	0,029
392	76,81	0,0129	0,038
490	76,81	0,0129	0,048
588	76,81	0,0129	0,057
686	76,81	0,0129	0,067
784	76,81	0,0129	0,076
882	76,81	0,0129	0,086
980	76,81	0,0129	0,095

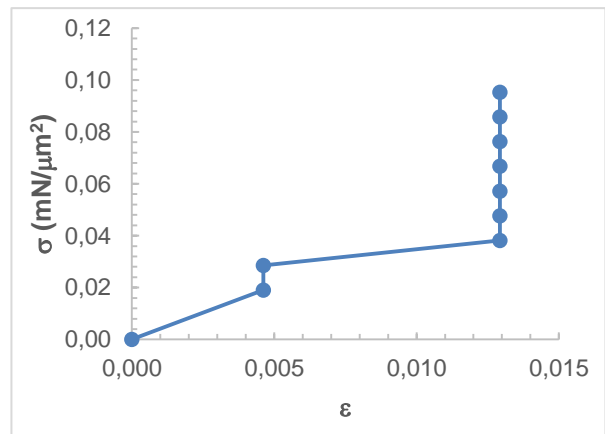


Fig. 17. Gráfica de esfuerzo-deformación de V3/2.

Tabla 17. Datos de la muestra V3/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	75,31	0,0000	0,000
196	75,31	0,0000	0,013
294	75,31	0,0000	0,020
392	75,31	0,0000	0,027
490	75,31	0,0000	0,034
588	75,31	0,0000	0,040
686	75,31	0,0000	0,047
784	75,31	0,0000	0,054
882	75,88	0,0076	0,060
980	75,88	0,0076	0,067

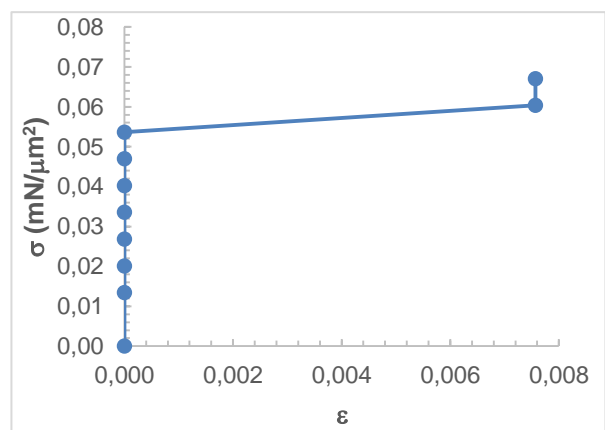


Fig. 18. Gráfica de esfuerzo-deformación de V3/3.

Tabla 18. Datos de la muestra V4/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,0009$) mN/ μm^2
0	83,03	0,0000	0,0000
196	83,03	0,0000	0,0077
294	83,03	0,0000	0,0115
392	83,03	0,0000	0,0153
490	83,03	0,0000	0,0192
588	83,03	0,0000	0,0230
686	83,03	0,0000	0,0268
784	83,58	0,0066	0,0307
882	83,58	0,0066	0,0345
980	84,47	0,0173	0,0383

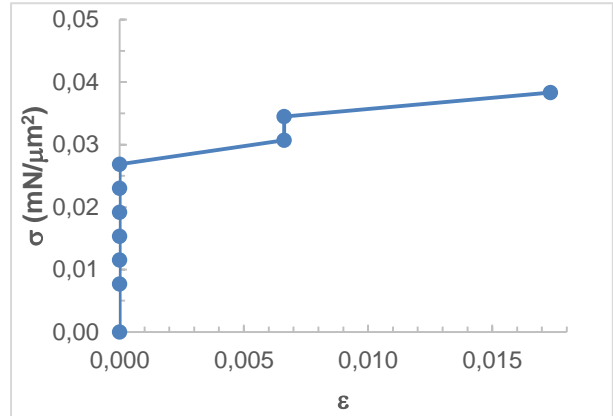


Fig. 19. Gráfica de esfuerzo-deformación de V4/1.

Tabla 19. Datos de la muestra V4/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	65,27	0,0000	0,000
196	65,27	0,0000	0,015
294	65,27	0,0000	0,022
392	65,95	0,0104	0,030
490	65,95	0,0104	0,037
588	65,95	0,0104	0,044
686	65,95	0,0104	0,052
784	65,95	0,0104	0,059
882	65,95	0,0104	0,067
980	65,95	0,0104	0,074

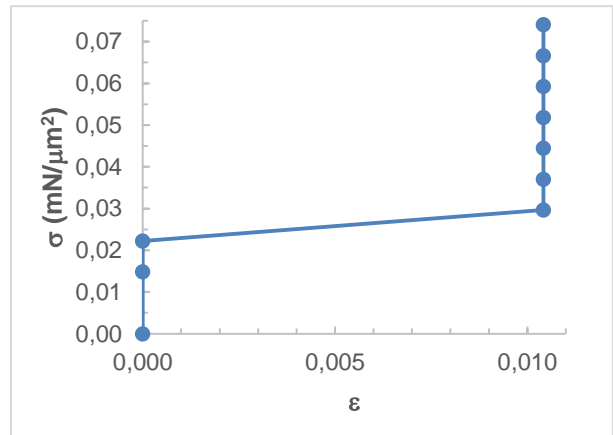


Fig. 20. Gráfica de esfuerzo-deformación de V4/3.

Tabla 20. Datos de la muestra V4/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	68,95	0,0000	0,000
196	68,95	0,0000	0,014
294	68,95	0,0000	0,021
392	68,95	0,0000	0,028
490	68,95	0,0000	0,035
588	69,51	0,0081	0,042
686	69,51	0,0081	0,049
784	69,51	0,0081	0,055
882	69,51	0,0081	0,062
980	69,51	0,0081	0,069

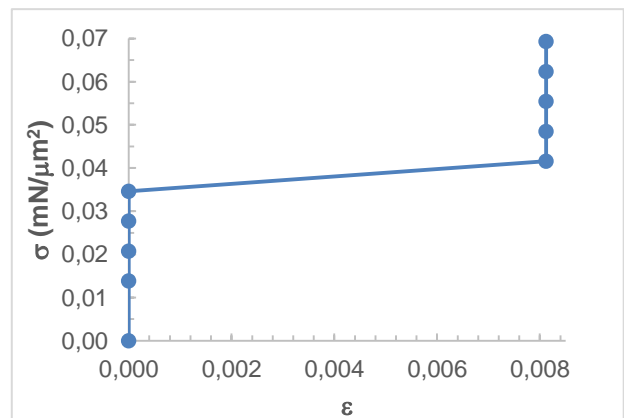


Fig. 21. Gráfica de esfuerzo-deformación de V4/3.

Tabla 21. Datos de la muestra V5/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	69,32	0,0000	0,000
196	69,32	0,0000	0,009
294	69,32	0,0000	0,013
392	69,32	0,0000	0,017
490	69,32	0,0000	0,022
588	69,32	0,0000	0,026
686	69,32	0,0000	0,030
784	69,32	0,0000	0,035
882	69,9	0,0084	0,039
980	69,9	0,0084	0,044

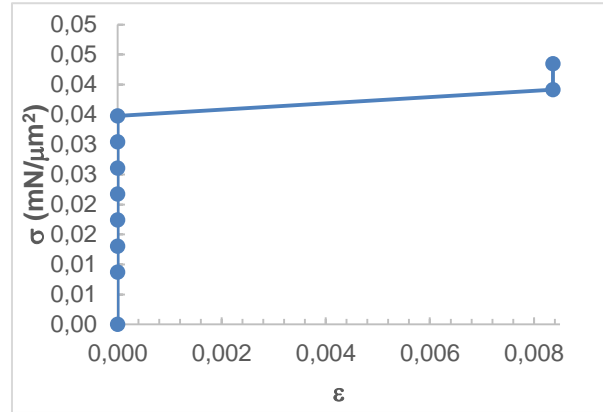


Fig. 22. Gráfica de esfuerzo-deformación de V5/1.

Tabla 22. Datos de la muestra V5/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	76,3	0,0000	0,000
196	76,3	0,0000	0,011
294	76,3	0,0000	0,018
392	76,3	0,0000	0,024
490	76,3	0,0000	0,030
588	76,3	0,0000	0,036
686	76,3	0,0000	0,041
784	76,3	0,0000	0,047
882	76,3	0,0000	0,053
980	77,02	0,0094	0,059

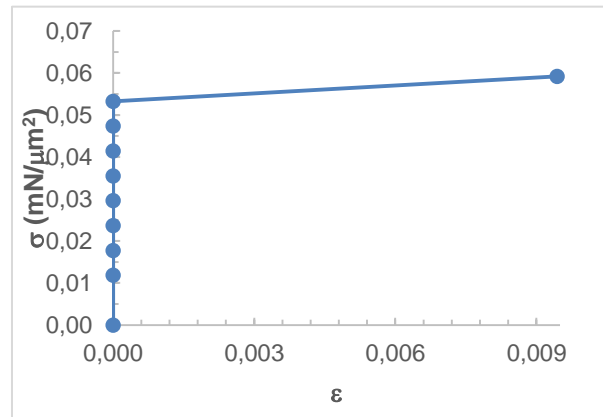


Fig. 23. Gráfica de esfuerzo-deformación de V5/2.

Tabla 23. Datos de la muestra V5/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	68,98	0,0000	0,000
196	68,98	0,0000	0,010
294	68,98	0,0000	0,015
392	68,98	0,0000	0,020
490	68,98	0,0000	0,025
588	68,98	0,0000	0,030
686	68,98	0,0000	0,035
784	69,34	0,0052	0,040
882	69,34	0,0052	0,045
980	69,64	0,0096	0,050

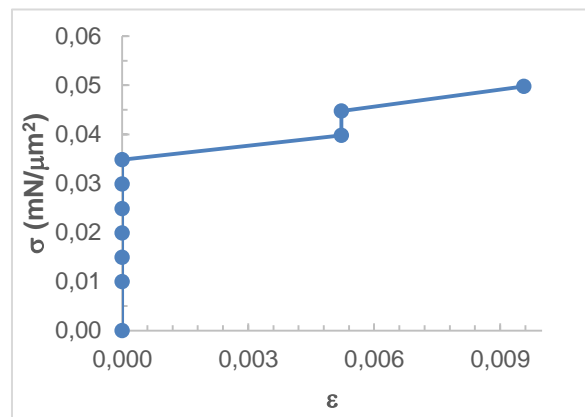


Fig. 24. Gráfica de esfuerzo-deformación de V5/3.

Tabla 24. Datos de la muestra V6/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	67,71	0,0000	0,000
196	67,71	0,0000	0,010
294	68,5	0,0117	0,015
392	68,5	0,0117	0,020
490	68,94	0,0182	0,025
588	69,43	0,0254	0,030
686	69,43	0,0254	0,035
784	69,69	0,0292	0,040
882	70,22	0,0371	0,045
980	72,45	0,0700	0,050

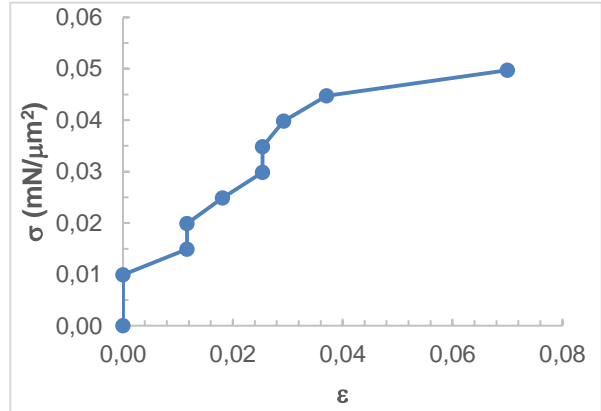


Fig. 25. Gráfica de esfuerzo-deformación de V6/1.

Tabla 25. Datos de la muestra V6/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	70,58	0,0000	0,000
196	70,58	0,0000	0,010
294	71,45	0,0123	0,015
392	71,45	0,0123	0,019
490	71,45	0,0123	0,024
588	71,92	0,0190	0,029
686	71,92	0,0190	0,034
784	71,92	0,0190	0,039
882	72,7	0,0300	0,044
980	73,83	0,0460	0,048

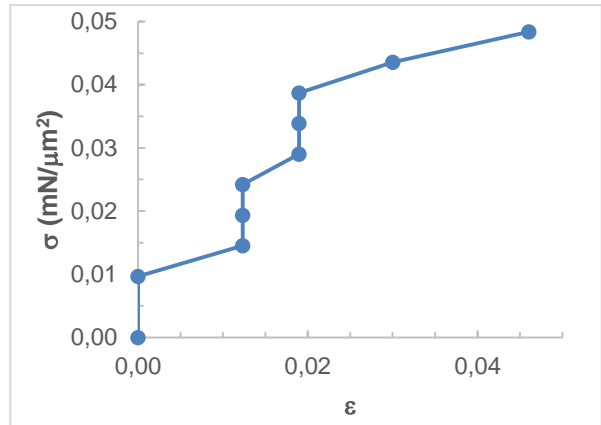


Fig. 26. Gráfica de esfuerzo-deformación de V6/2.

Tabla 26. Datos de la muestra V6/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	62,7	0,0000	0,000
196	63,17	0,0075	0,015
294	64,05	0,0215	0,022
392	64,67	0,0314	0,030
490	64,67	0,0314	0,037
588	65,09	0,0381	0,044
686	65,09	0,0381	0,052
784	65,7	0,0478	0,059
882	66,45	0,0598	0,067
980	67,01	0,0687	0,074

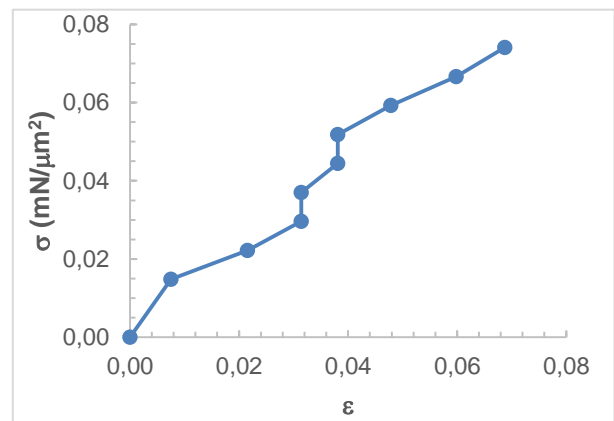


Fig. 27. Gráfica de esfuerzo-deformación de V6/3.

Tabla 27. Datos de la muestra V7/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	70,03	0,0000	0,000
196	70,56	0,0076	0,015
294	70,96	0,0133	0,023
392	71,25	0,0174	0,031
490	71,81	0,0254	0,038
588	71,81	0,0254	0,046
686	72,57	0,0363	0,054
784	72,57	0,0363	0,061
882	73,32	0,0470	0,069
980	73,79	0,0537	0,077

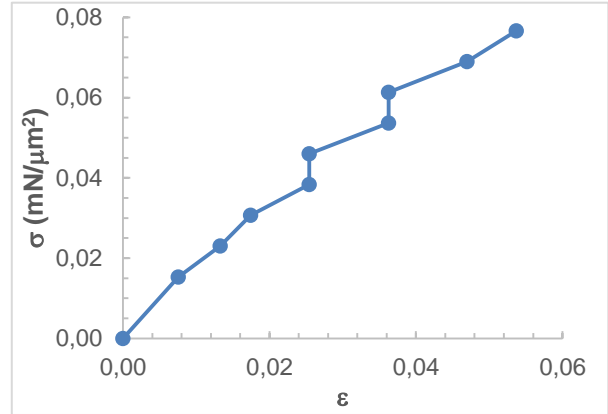


Fig. 28. Gráfica de esfuerzo-deformación de V7/1.

Tabla 28. Datos de la muestra V7/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	68,23	0,0000	0,000
196	68,23	0,0000	0,014
294	68,74	0,0075	0,021
392	69,39	0,0170	0,028
490	69,39	0,0170	0,035
588	69,39	0,0170	0,042
686	69,39	0,0170	0,049
784	69,75	0,0223	0,055
882	70,21	0,0290	0,062
980	71,24	0,0441	0,069

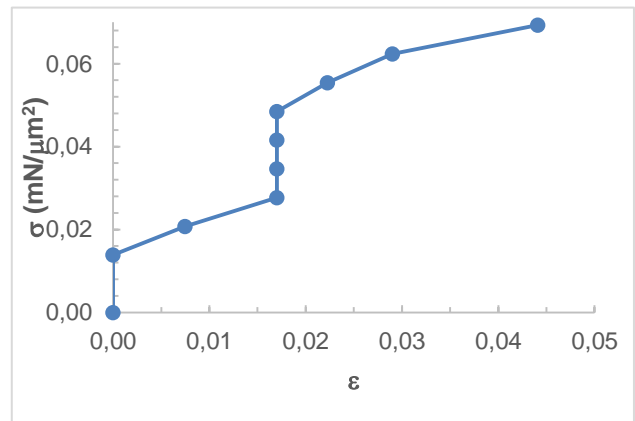


Fig. 29. Gráfica de esfuerzo-deformación de V7/2.

Tabla 29. Datos de la muestra V7/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	62,39	0,0000	0,000
196	62,39	0,0000	0,014
294	62,39	0,0000	0,021
392	62,39	0,0000	0,029
490	63,21	0,0131	0,036
588	63,21	0,0131	0,043
686	63,21	0,0131	0,050
784	63,21	0,0131	0,057
882	63,21	0,0131	0,064
980	64,03	0,0263	0,072

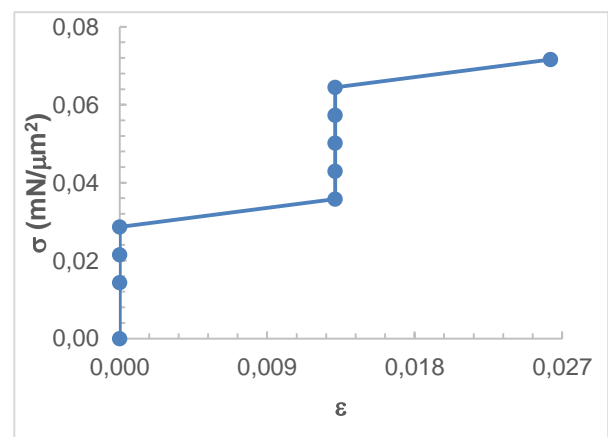


Fig. 30. Gráfica de esfuerzo-deformación de V7/3.

Tabla 30. Datos de la muestra V8/1

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	69,84	0,0000	0,000
196	69,84	0,0000	0,011
294	69,84	0,0000	0,017
392	69,84	0,0000	0,023
490	70,35	0,0073	0,029
588	70,66	0,0117	0,034
686	70,94	0,0158	0,040
784	71,42	0,0226	0,046
882	71,48	0,0235	0,052
980	71,81	0,0282	0,057

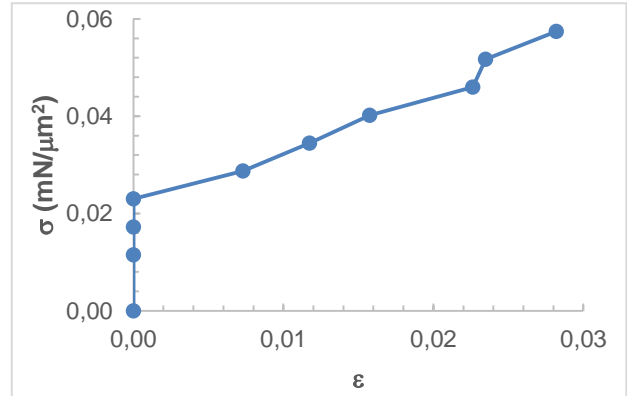


Fig. 31. Gráfica de esfuerzo-deformación de V8/1.

Tabla 31. Datos de la muestra V8/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	63,81	0,0000	0,000
196	63,81	0,0000	0,015
294	63,82	0,0002	0,022
392	64,29	0,0075	0,030
490	64,42	0,0096	0,037
588	64,42	0,0096	0,044
686	64,87	0,0166	0,052
784	64,87	0,0166	0,059
882	65,46	0,0259	0,067
980	65,83	0,0317	0,074

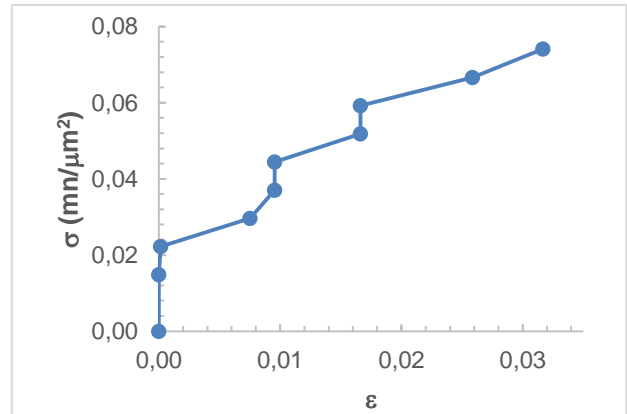


Fig. 32. Gráfica de esfuerzo-deformación de V8/2.

Tabla 32. Datos de la muestra V8/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,004$) mN/ μm^2
0	81,36	0,0000	0,000
196	81,36	0,0000	0,020
294	81,99	0,0077	0,030
392	82,51	0,0141	0,040
490	82,91	0,0191	0,050
588	82,91	0,0191	0,059
686	83,59	0,0274	0,069
784	84,25	0,0355	0,079
882	85,14	0,0465	0,089
980	86,01	0,0572	0,099

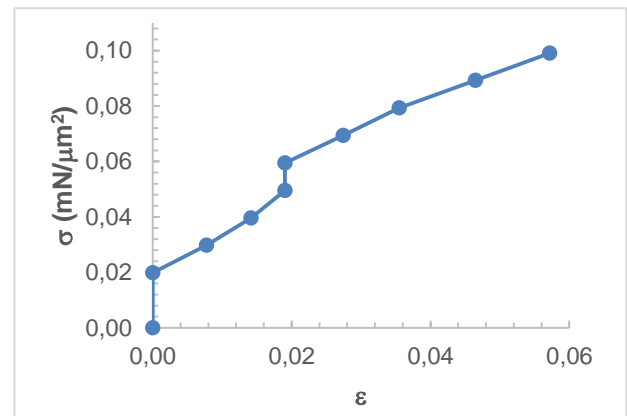


Fig. 33. Gráfica de esfuerzo-deformación de V8/3.

Tabla 33. Datos de la muestra V9/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	83,39	0,0000	0,000
196	83,39	0,0000	0,013
294	84,03	0,0077	0,020
392	84,03	0,0077	0,027
490	84,8	0,0169	0,034
588	84,8	0,0169	0,040
686	84,8	0,0169	0,047
784	84,8	0,0169	0,054
882	84,8	0,0169	0,060
980	85,65	0,0271	0,067

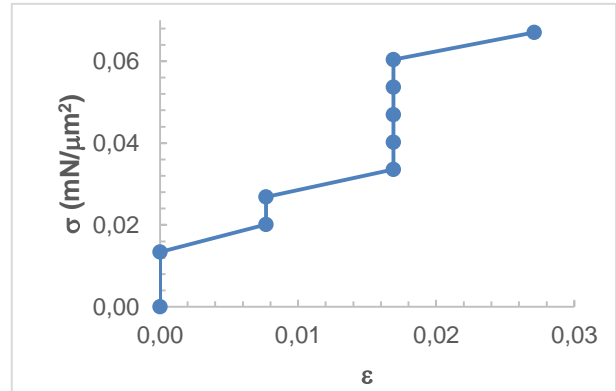


Fig. 34. Gráfica de esfuerzo-deformación de V9/1.

Tabla 34. Datos de la muestra V9/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	83,15	0,0000	0,000
196	83,15	0,0000	0,011
294	83,15	0,0000	0,017
392	83,15	0,0000	0,022
490	83,15	0,0000	0,028
588	83,15	0,0000	0,033
686	83,91	0,0091	0,039
784	83,91	0,0091	0,045
882	84,04	0,0107	0,050
980	84,66	0,0182	0,056

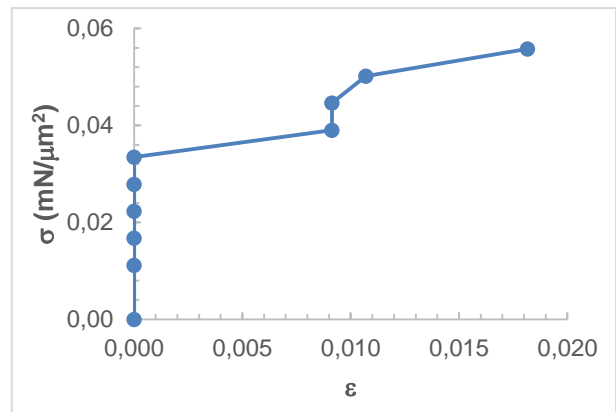


Fig. 35. Gráfica de esfuerzo-deformación de V9/2.

Tabla 35. Datos de la muestra V9/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	70,98	0,0000	0,000
196	70,98	0,0000	0,013
294	70,98	0,0000	0,019
392	70,98	0,0000	0,026
490	71,77	0,0111	0,032
588	71,77	0,0111	0,039
686	71,77	0,0111	0,045
784	71,77	0,0111	0,052
882	72,19	0,0170	0,058
980	72,58	0,0225	0,065

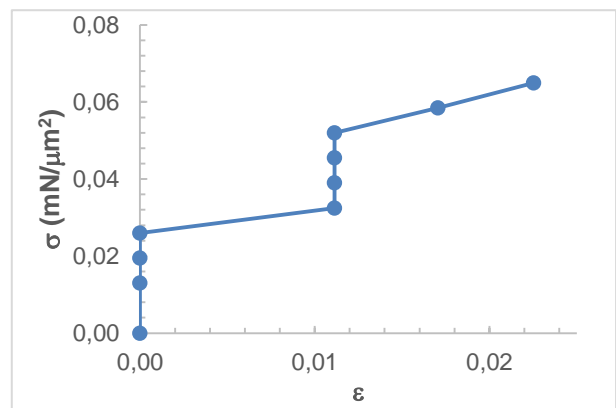


Fig. 36. Gráfica de esfuerzo-deformación de V9/3.

Tabla 36. Datos de la muestra V10/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	73,03	0,0000	0,000
196	73,03	0,0000	0,011
294	73,03	0,0000	0,016
392	73,7	0,0092	0,021
490	73,7	0,0092	0,026
588	74,44	0,0193	0,032
686	74,44	0,0193	0,037
784	74,44	0,0193	0,042
882	74,44	0,0193	0,047
980	74,44	0,0193	0,053

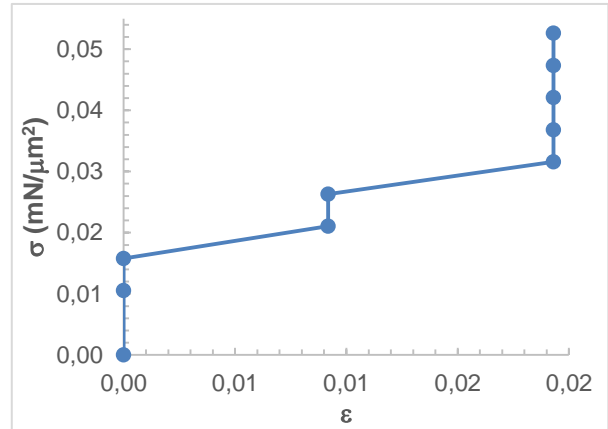


Fig. 37. Gráfica de esfuerzo-deformación de V10/1.

Tabla 37. Datos de la muestra V10/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	69,69	0,0000	0,000
196	69,69	0,0000	0,013
294	69,88	0,0027	0,019
392	69,88	0,0027	0,026
490	69,88	0,0027	0,032
588	69,88	0,0027	0,039
686	70,29	0,0086	0,045
784	70,29	0,0086	0,052
882	70,53	0,0121	0,058
980	70,53	0,0121	0,065

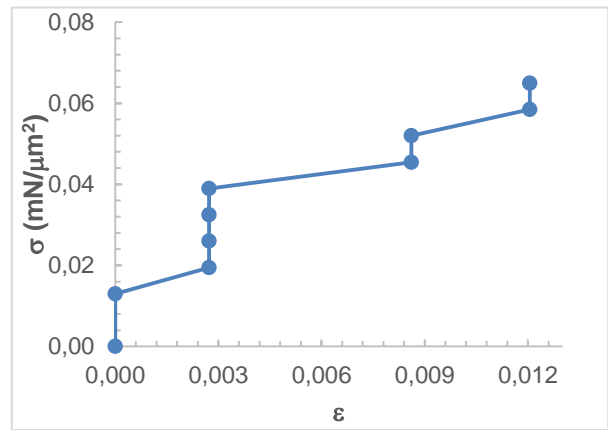


Fig. 38. Gráfica de esfuerzo-deformación de V10/2.

Tabla 38. Datos de la muestra V10/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	69,17	0,0000	0,000
196	69,17	0,0000	0,014
294	69,96	0,0114	0,021
392	69,96	0,0114	0,029
490	69,96	0,0114	0,036
588	69,96	0,0114	0,043
686	69,96	0,0114	0,050
784	70,54	0,0198	0,057
882	70,54	0,0198	0,064
980	70,7	0,0221	0,072

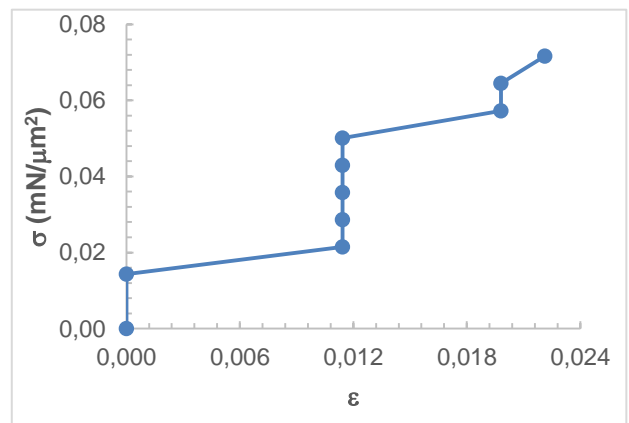


Fig. 39. Gráfica de esfuerzo-deformación de V10/3.

Tabla 39. Datos de la muestra V11/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	65,32	0,0000	0,000
196	65,32	0,0000	0,011
294	65,32	0,0000	0,017
392	65,32	0,0000	0,022
490	65,32	0,0000	0,028
588	66,26	0,0144	0,033
686	66,26	0,0144	0,039
784	66,74	0,0217	0,045
882	66,74	0,0217	0,050
980	67,49	0,0332	0,056

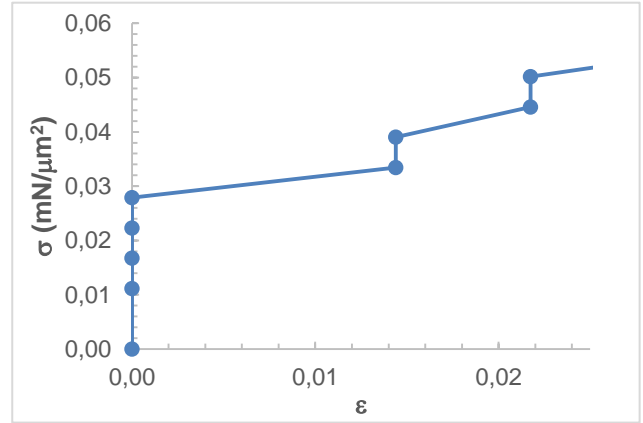


Fig. 40. Gráfica de esfuerzo-deformación de V11/1.

Tabla 40. Datos de la muestra V11/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	63,45	0,0000	0,000
196	63,45	0,0000	0,008
294	63,45	0,0000	0,012
392	63,45	0,0000	0,017
490	63,45	0,0000	0,021
588	63,45	0,0000	0,025
686	63,99	0,0085	0,029
784	63,99	0,0085	0,033
882	64,98	0,0241	0,037
980	64,98	0,0241	0,041

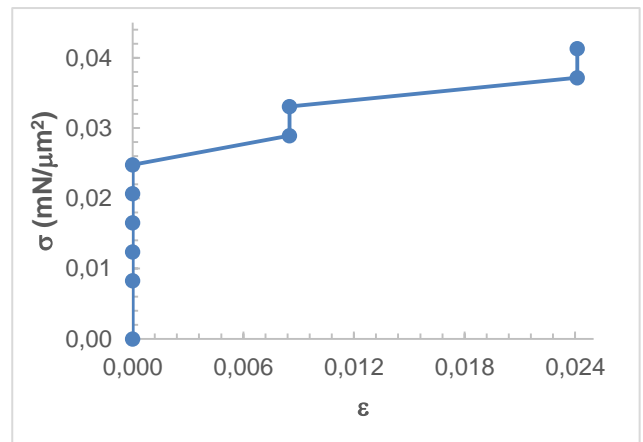


Fig. 41. Gráfica de esfuerzo-deformación de V11/2.

Tabla 41. Datos de la muestra V11/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	64,83	0,0000	0,000
196	64,83	0,0000	0,009
294	64,83	0,0000	0,014
392	65,25	0,0065	0,018
490	66,09	0,0194	0,023
588	66,09	0,0194	0,027
686	66,09	0,0194	0,032
784	66,36	0,0236	0,037
882	66,36	0,0236	0,041
980	66,36	0,0236	0,046

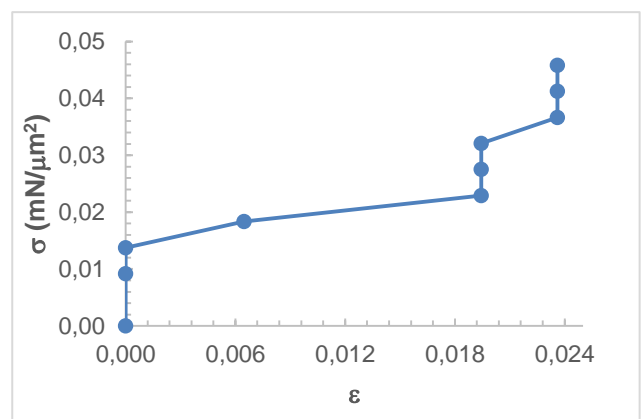


Fig. 42. Gráfica de esfuerzo-deformación de V11/3.

Tabla 42. Datos de la muestra V12/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	84	0,0000	0,000
196	84	0,0000	0,015
294	84,58	0,0069	0,023
392	84,58	0,0069	0,031
490	85,38	0,0164	0,038
588	85,38	0,0164	0,046
686	85,38	0,0164	0,054
784	85,38	0,0164	0,061
882	85,38	0,0164	0,069
980	85,38	0,0164	0,077

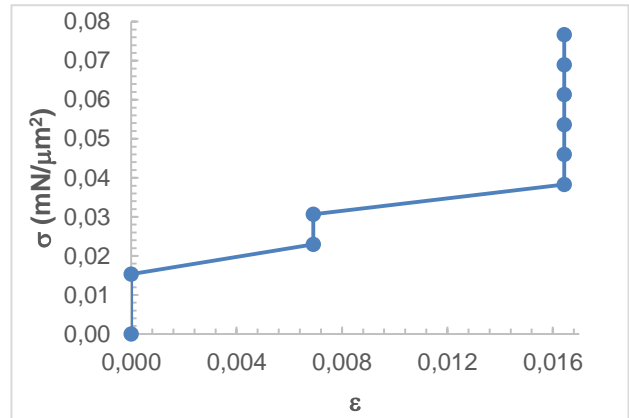


Fig. 43. Gráfica de esfuerzo-deformación de V12/1.

Tabla 43. Datos de la muestra V12/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	68,67	0,0000	0,000
196	68,67	0,0000	0,011
294	68,67	0,0000	0,016
392	69,03	0,0052	0,022
490	69,03	0,0052	0,027
588	69,03	0,0052	0,032
686	69,03	0,0052	0,038
784	69,49	0,0119	0,043
882	69,49	0,0119	0,049
980	70,19	0,0221	0,054

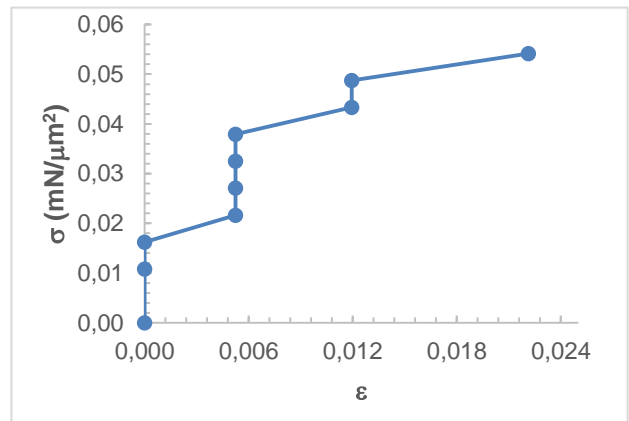


Fig. 44. Gráfica de esfuerzo-deformación de V12/2.

Tabla 44. Datos de la muestra V12/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	67,16	0,0000	0,000
196	67,16	0,0000	0,008
294	67,16	0,0000	0,012
392	67,16	0,0000	0,016
490	67,7	0,0080	0,020
588	67,7	0,0080	0,024
686	67,7	0,0080	0,028
784	67,7	0,0080	0,032
882	67,7	0,0080	0,036
980	67,7	0,0080	0,040

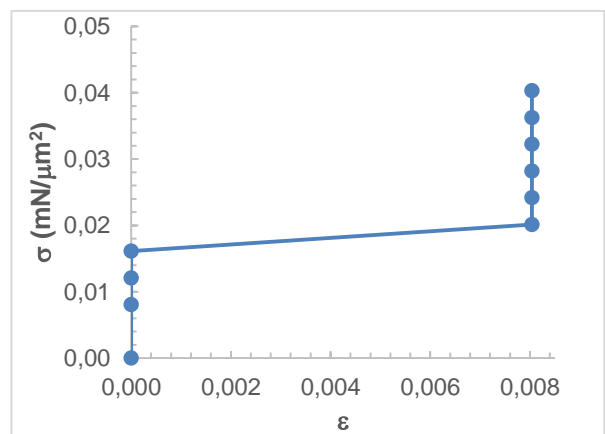


Fig. 45. Gráfica de esfuerzo-deformación de V12/3.

Tabla 45. Datos de la muestra C1/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,007$) mN/ μm^2
0	84,88	0,0000	0,000
196	85,26	0,0045	0,032
294	86,14	0,0148	0,048
392	86,4	0,0179	0,081
490	86,61	0,0204	0,097
588	86,63	0,0206	0,113
686	86,98	0,0247	0,129
784	87,2	0,0273	0,145
882	88,01	0,0369	0,161

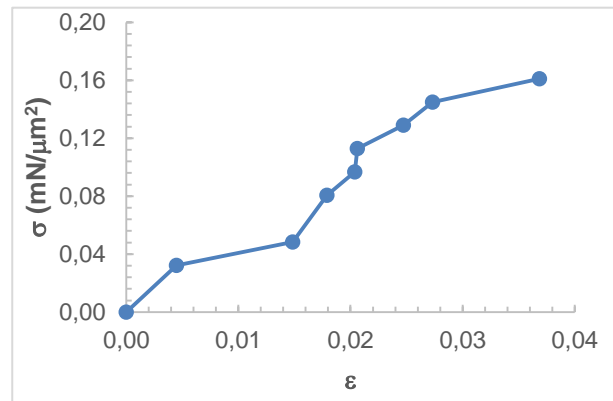


Fig. 46. Gráfica de esfuerzo-deformación de C1/1.

Tabla 46. Datos de la muestra C1/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	81,41	0,0000	0,000
196	82,16	0,0092	0,016
294	82,48	0,0131	0,025
392	83,93	0,0310	0,033
490	86,1	0,0576	0,041
588	86,93	0,0678	0,049
686	87,67	0,0769	0,058
784	87,89	0,0796	0,066
882	88,53	0,0875	0,074
980	91,45	0,1233	0,082

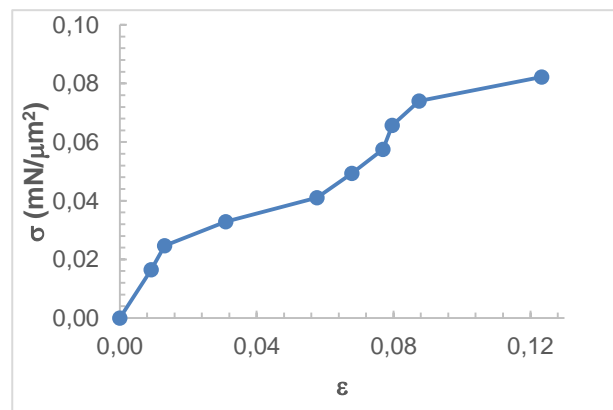


Fig. 47. Gráfica de esfuerzo-deformación de C1/2.

Tabla 47. Datos de la muestra C1/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	86,44	0,0000	0,000
196	87,82	0,0160	0,016
294	88,16	0,0199	0,025
392	88,16	0,0199	0,033
490	88,16	0,0199	0,041
588	88,16	0,0199	0,049
686	88,37	0,0223	0,058
784	89,01	0,0297	0,066
882	89,24	0,0324	0,074
980	89,46	0,0349	0,082

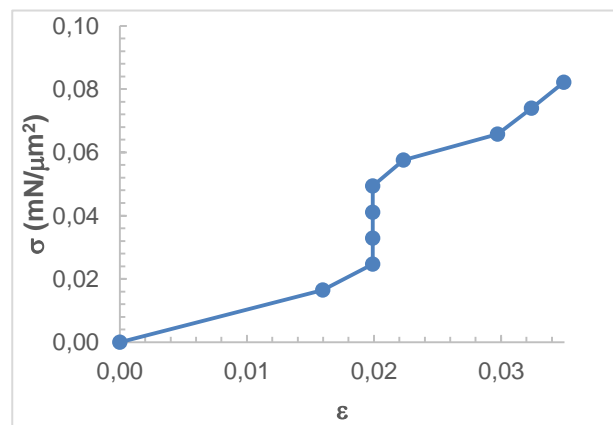


Fig. 48. Gráfica de esfuerzo-deformación de C1/3.

Tabla 48. Datos de la muestra C1/4.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	89,95	0,0000	0,000
196	90,55	0,0067	0,016
294	91,01	0,0118	0,025
392	91,4	0,0161	0,033
490	91,93	0,0220	0,041
588	91,93	0,0220	0,049
686	92,45	0,0278	0,058
784	92,49	0,0282	0,066
882	93,07	0,0347	0,074
980	93,53	0,0398	0,082

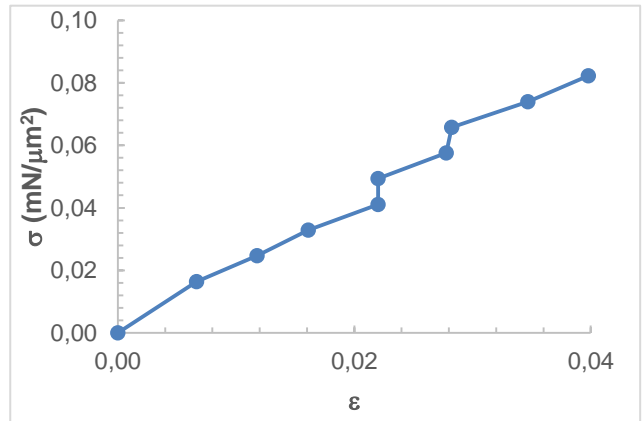


Fig. 49. Gráfica de esfuerzo-deformación de C1/4.

Tabla 49. Datos de la muestra C2/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	66,08	0,0000	0,000
196	66,79	0,0107	0,021
294	67,27	0,0180	0,032
392	67,7	0,0245	0,043
490	68,84	0,0418	0,054
588	70,46	0,0663	0,064
686	78,16	0,1828	0,075

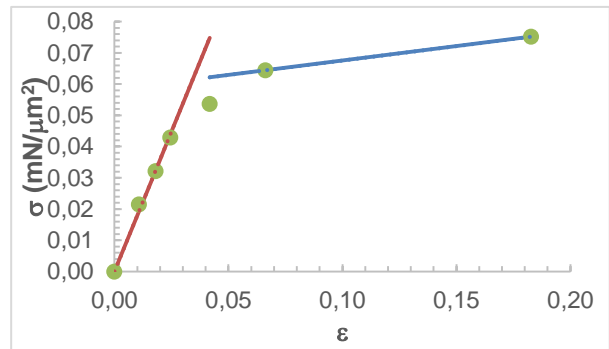


Fig. 50. Gráfica de esfuerzo-deformación de C2/1.

Tabla 50. Datos de la muestra C2/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	76,36	0,0000	0,000
196	77,69	0,0174	0,016
294	78,64	0,0299	0,024
392	79,49	0,0410	0,032
490	82	0,0739	0,040
588	86,87	0,1376	0,048
686	89,58	0,1731	0,056

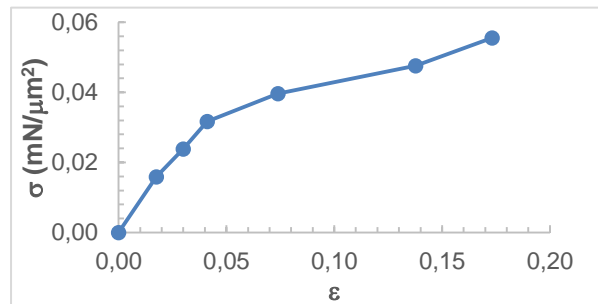


Fig. 51. Gráfica de esfuerzo-deformación de C2/2.

Tabla 51. Datos de la muestra C2/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	75,15	0,0000	0,000
196	76,52	0,0182	0,016
294	76,52	0,0182	0,024
392	76,52	0,0182	0,032
490	77,06	0,0254	0,040
588	77,56	0,0321	0,048
686	77,68	0,0337	0,056
784	78,35	0,0426	0,063
882	80,93	0,0769	0,071
980	90,53	0,2047	0,079

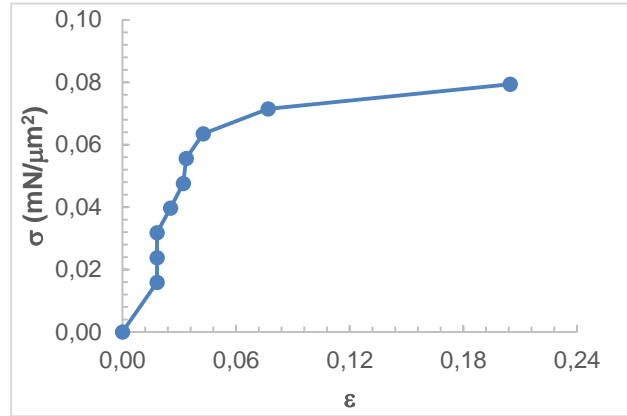


Fig. 52. Gráfica de esfuerzo-deformación de C2/3.

Tabla 52. Datos de la muestra C2/4.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	80,26	0,0000	0,000
196	81,37	0,0138	0,023
294	82,2	0,0242	0,035
392	83,76	0,0436	0,047
490	90,48	0,1273	0,058
588	95,71	0,1925	0,070

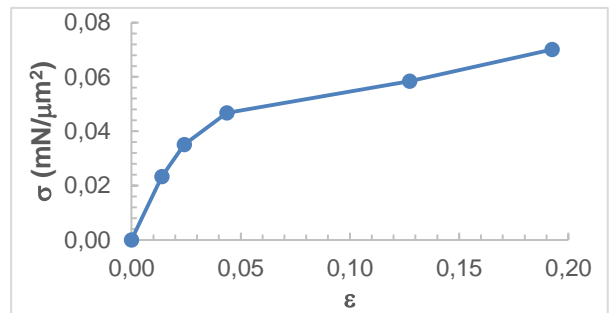


Fig. 53. Gráfica de esfuerzo-deformación de C2/4.

Tabla 53. Datos de la muestra C3/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	78,14	0	0,000
196	79,33	0,02	0,016
294	79,33	0,02	0,024
392	79,34	0,02	0,032
490	79,34	0,02	0,040
588	79,34	0,02	0,048
686	79,34	0,02	0,056
784	79,34	0,02	0,063
882	79,34	0,02	0,071
980	79,34	0,02	0,079

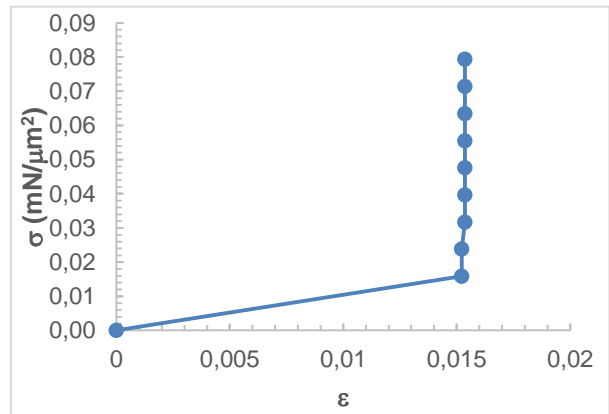


Fig. 54. Gráfica de esfuerzo-deformación de C3/1.

Tabla 54. Datos de la muestra C3/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε	(σ ±0.001) mN/μm ²
0	79,33	0,000	0,000
196	79,33	0,000	0,009
294	79,33	0,000	0,014
392	79,33	0,000	0,019
490	79,33	0,000	0,024
588	79,33	0,000	0,028
686	79,33	0,000	0,033
784	79,33	0,000	0,038
882	79,33	0,000	0,042
980	79,33	0,000	0,047

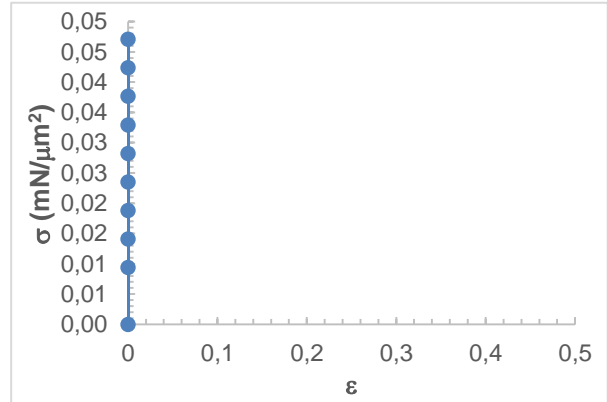


Fig. 55. Gráfica de esfuerzo-deformación de C3/2.

Tabla 55. Datos de la muestra C4/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.002) mN/μm ²
0	79,33	0,0000	0,000
196	79,33	0,0000	0,015
294	79,33	0,0000	0,023
392	79,33	0,0000	0,031
490	79,33	0,0000	0,038
588	79,33	0,0000	0,046
686	79,33	0,0000	0,054
784	79,33	0,0000	0,061
882	80,84	0,0190	0,069
980	80,84	0,0190	0,077

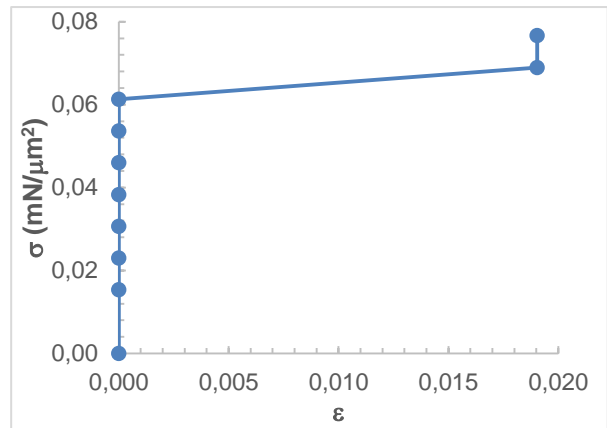


Fig. 56. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/1.

Tabla 56. Datos de la muestra C4/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.002) mN/μm ²
0	77,23	0,0000	0,000
196	77,23	0,0000	0,015
294	77,23	0,0000	0,023
392	77,23	0,0000	0,031
490	78,24	0,0131	0,038
588	78,24	0,0131	0,046
686	78,24	0,0131	0,054
784	78,97	0,0225	0,061
882	78,97	0,0225	0,069
980	79,62	0,0309	0,077

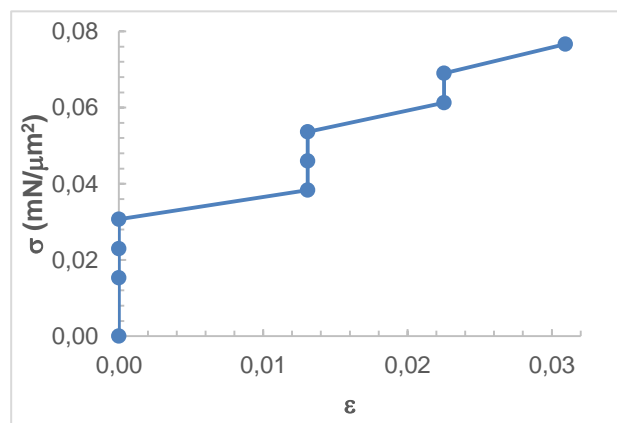


Fig. 57. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/2.

Tabla 57. Datos de la muestra C4/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0002	(σ ±0.007) mN/μm ²
0	90,68	0,0000	0,000
196	90,68	0,0000	0,034
294	90,68	0,0000	0,051
392	91,55	0,0096	0,068
490	92,23	0,0171	0,085
588	93,78	0,0342	0,102
686	95,54	0,0536	0,119
784	108,83	0,2002	0,136
882	113,66	0,2534	0,153

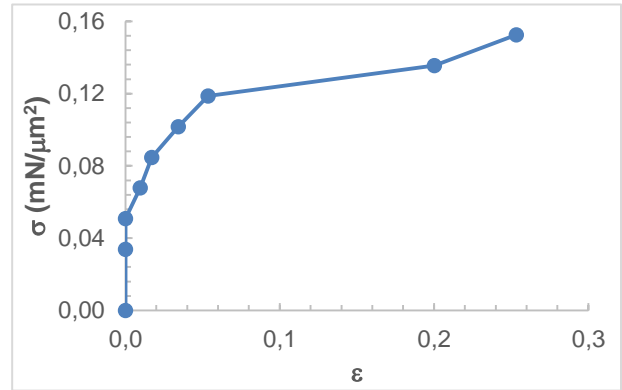


Fig. 58. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/3.

Tabla 58. Datos de la muestra C4/4.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.006) mN/μm ²
0	88,76	0,0000	0,000
196	89,51	0,0084	0,029
294	89,9	0,0128	0,044
392	91,01	0,0253	0,058
490	91,01	0,0253	0,073
588	92,73	0,0447	0,088
686	98,56	0,1104	0,102
784	106,14	0,1958	0,117
882	111,1	0,2517	0,132
980	114,78	0,2932	0,146

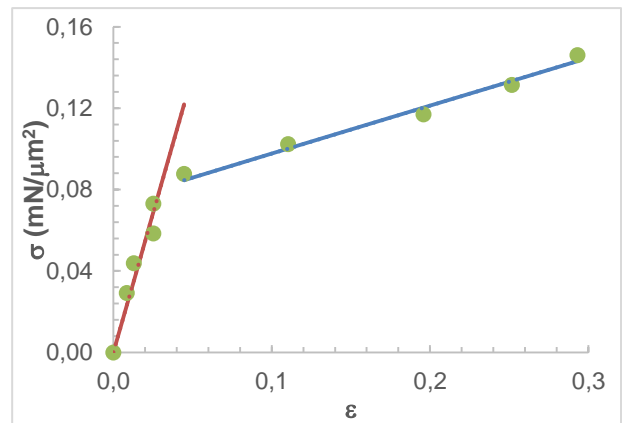


Fig. 59. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/4.

Tabla 59. Datos de la muestra C4/5.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.005) mN/μm ²
0	84,22	0,0000	0,000
196	84,7	0,0057	0,025
294	84,7	0,0057	0,038
392	85,66	0,0171	0,051
490	86,35	0,0253	0,064
588	87,37	0,0374	0,076
686	89,12	0,0582	0,089
784	99,79	0,1849	0,102
882	106,08	0,2596	0,115
980	109,23	0,2970	0,127

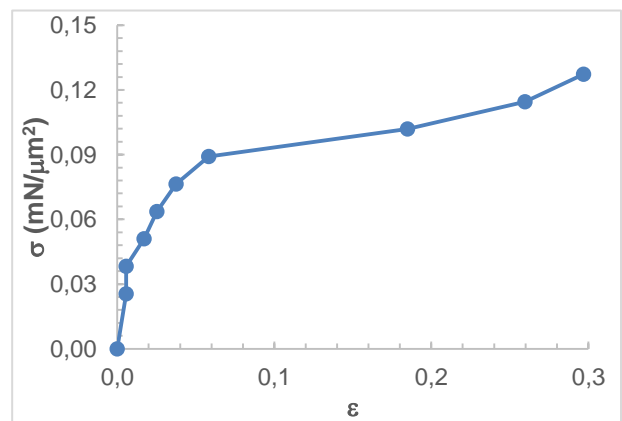


Fig. 60. Gráfica de esfuerzo-deformación de C4/5.

Tabla 60. Datos de la muestra C5/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,006$) mN/ μm^2
0	94,9	0,0000	0,000
196	95,29	0,0041	0,027
294	95,94	0,0110	0,040
392	97,31	0,0254	0,053
490	97,92	0,0318	0,067
588	99,1	0,0443	0,080
686	99,65	0,0501	0,093
784	101,05	0,0648	0,107
882	104,7	0,1033	0,120
980	109,64	0,1553	0,133

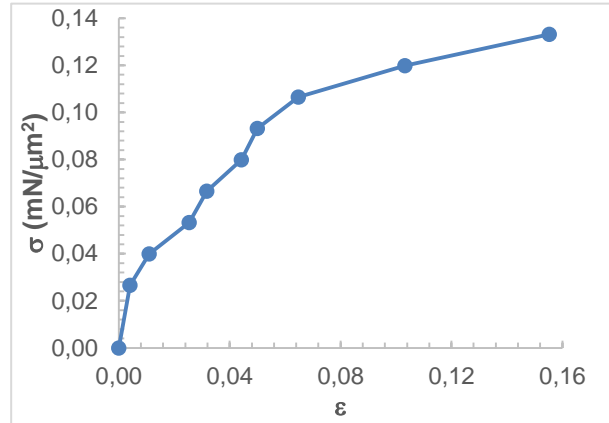


Fig. 61. Gráfica de esfuerzo-deformación de C5/1.

Tabla 61. Datos de la muestra C5/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	85,26	0,0000	0,00
196	85,26	0,0000	0,04
294	85,83	0,0067	0,07
392	86,21	0,0111	0,09
490	86,84	0,0185	0,11
588	87,62	0,0277	0,13
686	88,77	0,0412	0,16
784	92,26	0,0821	0,18
882	98,56	0,1560	0,20
980	109,23	0,2811	0,22

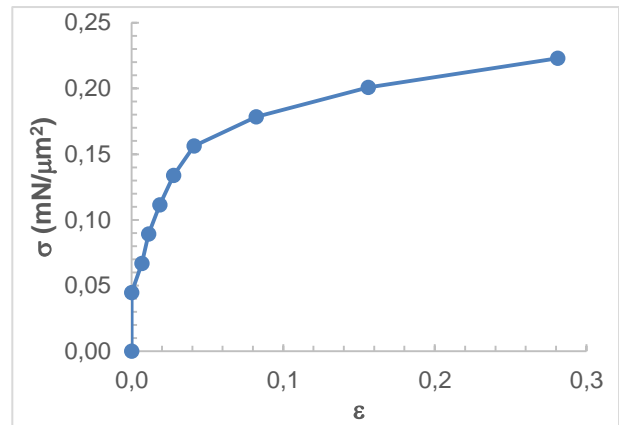


Fig. 62. Gráfica de esfuerzo-deformación de C5/2.

Tabla 62. Datos de la muestra C5/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,006$) mN/ μm^2
0	70,13	0,0000	0,000
196	70,74	0,0087	0,029
294	71,2	0,0153	0,044
392	71,35	0,0174	0,058
490	71,77	0,0234	0,073
588	71,77	0,0234	0,088
686	72,51	0,0339	0,102
784	74,55	0,0630	0,117
882	82,5	0,1764	0,132
980	90,14	0,2853	0,146

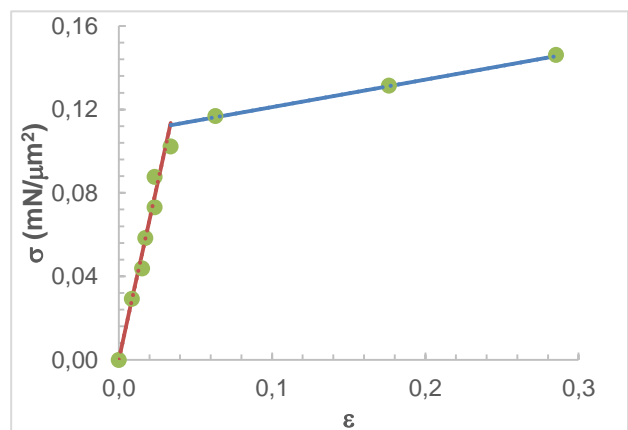


Fig. 63. Gráfica de esfuerzo-deformación de C5/3.

Tabla 63. Datos de la muestra C6/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	81,92	0,0000	0,000
196	82,87	0,0116	0,013
294	82,89	0,0118	0,020
392	83,5	0,0193	0,027
490	84,02	0,0256	0,034
588	84,02	0,0256	0,040
686	84,02	0,0256	0,047
784	84,02	0,0256	0,054
882	84,59	0,0326	0,060
980	85,23	0,0404	0,067

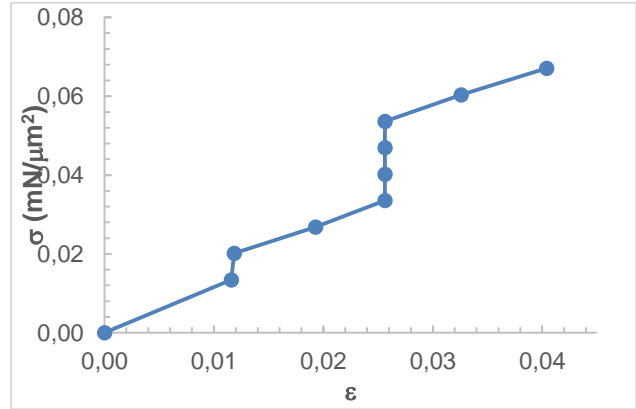


Fig. 64. Gráfica de esfuerzo-deformación de C6/1.

Tabla 64. Datos de la muestra C6/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,001$) mN/ μm^2
0	74,69	0,0000	0,000
196	74,69	0,0000	0,010
294	74,69	0,0000	0,015
392	74,69	0,0000	0,019
490	75,25	0,0075	0,024
588	75,25	0,0075	0,029
686	75,25	0,0075	0,034
784	75,25	0,0075	0,039
882	76,01	0,0177	0,044
980	76,24	0,0208	0,048

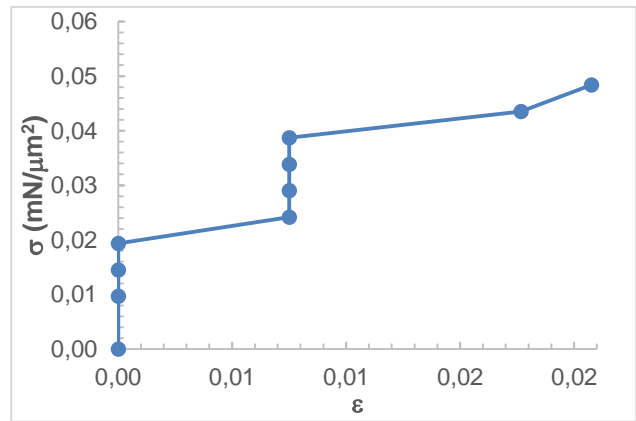


Fig. 65. Gráfica de esfuerzo-deformación de C6/2.

Tabla 65. Datos de la muestra C6/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	68,81	0,0000	0,000
196	68,81	0,0000	0,013
294	68,81	0,0000	0,020
392	68,81	0,0000	0,027
490	68,81	0,0000	0,034
588	68,81	0,0000	0,040
686	69,47	0,0096	0,047
784	69,47	0,0096	0,054
882	69,79	0,0142	0,060
980	69,98	0,0170	0,067

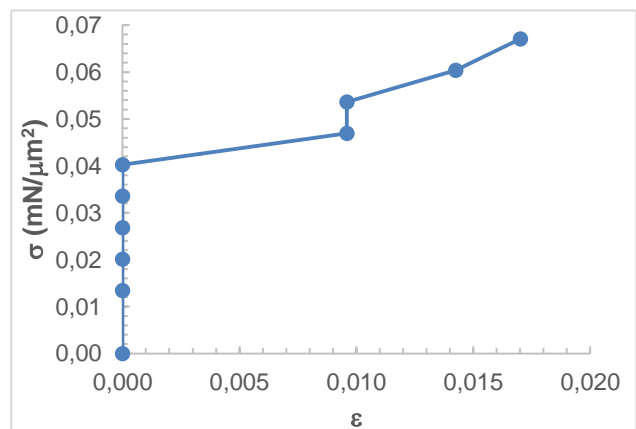


Fig. 66. Gráfica de esfuerzo-deformación de C6/3.

Tabla 66. Datos de la muestra C7/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,004$) mN/ μm^2
0	89,68	0,0000	0,000
196	89,68	0,0000	0,022
294	89,68	0,0000	0,034
392	90,32	0,0071	0,045
490	90,97	0,0144	0,056
588	91,79	0,0235	0,067
686	93,56	0,0433	0,078
784	98,66	0,1001	0,090

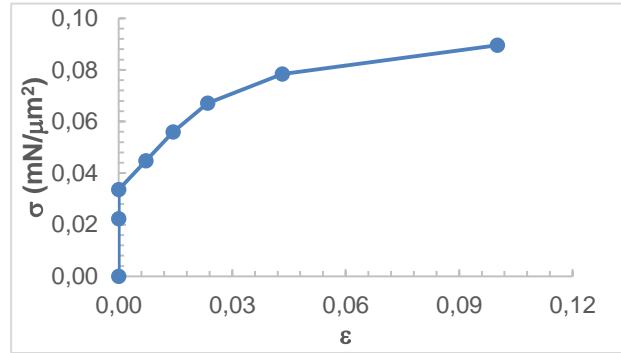


Fig. 67. Gráfica de esfuerzo-deformación de C7/1.

Tabla 67. Datos de la muestra C7/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	78,77	0,0000	0,000
196	80,01	0,0157	0,017
294	80,01	0,0157	0,026
392	80,01	0,0157	0,034
490	80,01	0,0157	0,043
588	80,01	0,0157	0,051
686	81,66	0,0367	0,060
784	81,66	0,0367	0,068
882	83,97	0,0660	0,077
980	93,85	0,1914	0,085

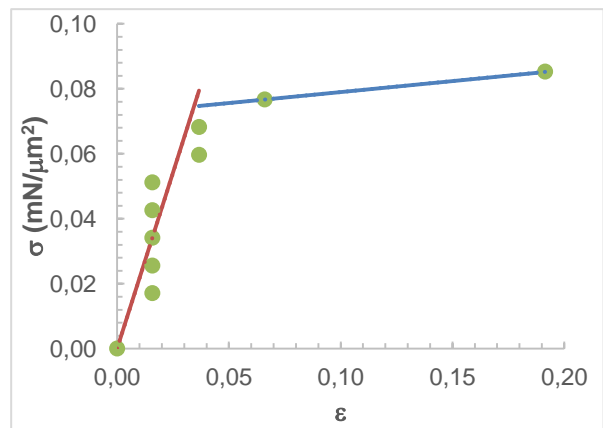


Fig. 68. Gráfica de esfuerzo-deformación de C7/2.

Tabla 68. Datos de la muestra C7/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\varepsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	79,55	0,0000	0,000
196	79,55	0,0000	0,017
294	80,52	0,0122	0,026
392	80,52	0,0122	0,034
490	80,97	0,0179	0,043
588	81,36	0,0228	0,051
686	82,82	0,0411	0,060
784	85,07	0,0694	0,068
882	95,07	0,1951	0,077

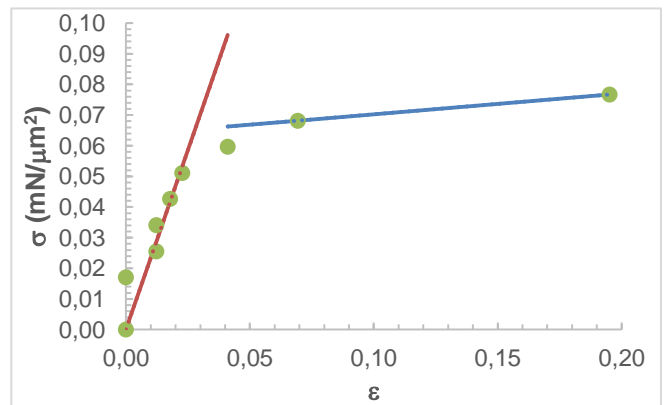


Fig. 69. Gráfica de esfuerzo-deformación de C7/3.

Tabla 69. Datos de la muestra C8/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	81,42	0,0000	0,000
196	81,42	0,0000	0,014
294	81,42	0,0000	0,021
392	81,42	0,0000	0,028
490	81,42	0,0000	0,035
588	81,42	0,0000	0,042
686	82,92	0,0184	0,048
784	82,92	0,0184	0,055
882	82,92	0,0184	0,062
980	82,92	0,0184	0,069

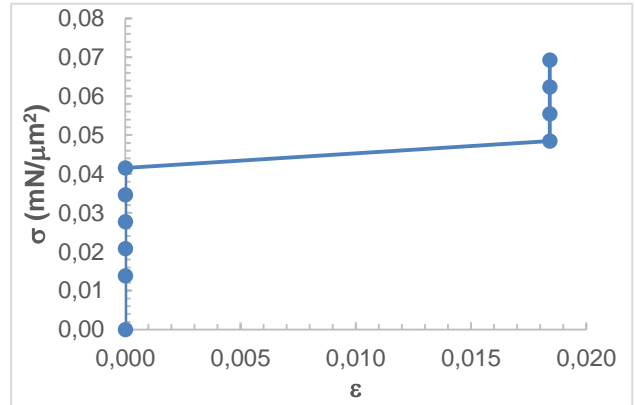


Fig. 70. Gráfica de esfuerzo-deformación de C8/1.

Tabla 70. Datos de la muestra C8/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	79,56	0,0000	0,000
196	80,13	0,0072	0,014
294	80,13	0,0072	0,021
392	80,13	0,0072	0,029
490	80,13	0,0072	0,036
588	80,13	0,0072	0,043
686	80,13	0,0072	0,050
784	80,81	0,0157	0,057
882	80,81	0,0157	0,064
980	80,81	0,0157	0,072

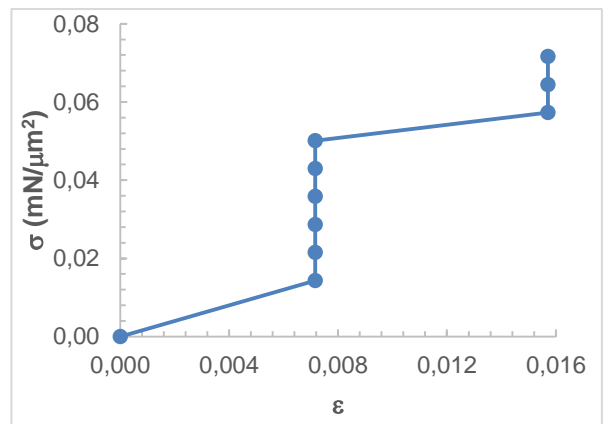


Fig. 71. Gráfica de esfuerzo-deformación de C8/2.

Tabla 71. Datos de la muestra C8/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	90,7	0,0000	0,000
196	90,7	0,0000	0,013
294	90,7	0,0000	0,019
392	90,7	0,0000	0,025
490	90,7	0,0000	0,031
588	91,39	0,0076	0,038
686	91,39	0,0076	0,044
784	91,98	0,0141	0,050
882	91,98	0,0141	0,057
980	91,98	0,0141	0,063

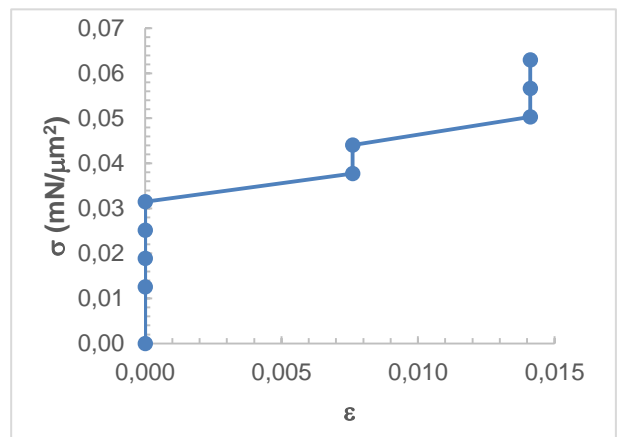


Fig. 72. Gráfica de esfuerzo-deformación de C8/3.

Tabla 72. Datos de la muestra C9/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,002$) mN/ μm^2
0	72,42	0,0000	0,000
196	72,42	0,0000	0,013
294	72,42	0,0000	0,019
392	72,42	0,0000	0,025
490	72,42	0,0000	0,031
588	73,21	0,0109	0,038
686	74,05	0,0225	0,044
784	74,05	0,0225	0,050
882	74,05	0,0225	0,057
980	75,86	0,0475	0,063

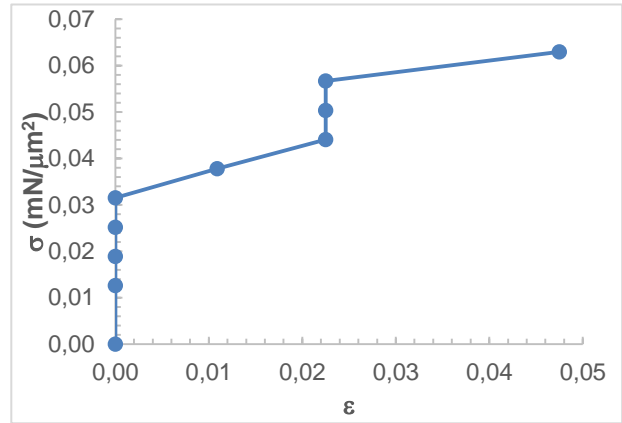


Fig. 73. Gráfica de esfuerzo-deformación de C9/1.

Tabla 73. Datos de la muestra C9/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	89,34	0,0000	0,000
196	89,34	0,0000	0,019
294	89,34	0,0000	0,029
392	89,34	0,0000	0,038
490	89,34	0,0000	0,048
588	89,34	0,0000	0,057
686	90,1	0,0085	0,067
784	90,1	0,0085	0,076
882	90,61	0,0142	0,086
980	91,03	0,0189	0,095

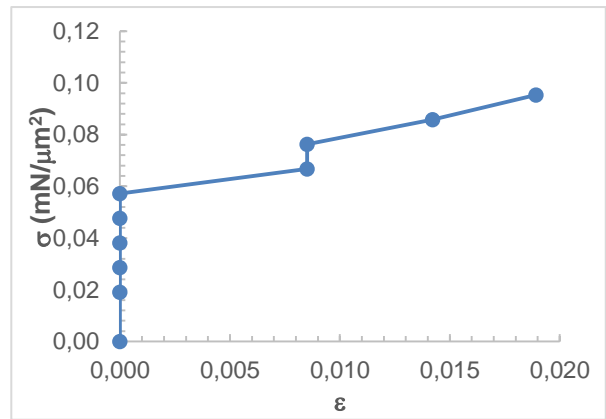


Fig. 74. Gráfica de esfuerzo-deformación de C9/2.

Tabla 74. Datos de la muestra C9/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,003$) mN/ μm^2
0	74,5	0,0000	0,000
196	74,5	0,0000	0,016
294	74,5	0,0000	0,025
392	74,5	0,0000	0,033
490	75,58	0,0145	0,041
588	75,58	0,0145	0,049
686	75,58	0,0145	0,058
784	75,58	0,0145	0,066
882	76,1	0,0215	0,074
980	77,55	0,0409	0,082

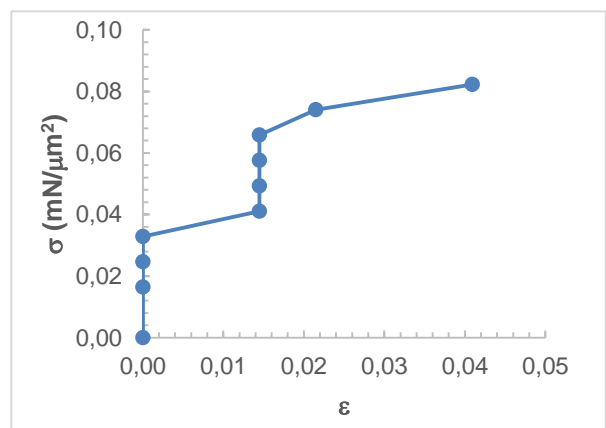


Fig. 75. Gráfica de esfuerzo-deformación de C9/3.

Tabla 75. Datos de la muestra H1/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	84,35	0,0000	0,00
196	86,15	0,0213	0,04
294	88,72	0,0518	0,06
392	99,35	0,1778	0,08
490	106,24	0,2595	0,11
588	109,65	0,2999	0,13
686	113,75	0,3485	0,15
784	118,62	0,4063	0,17
882	124,13	0,4716	0,19

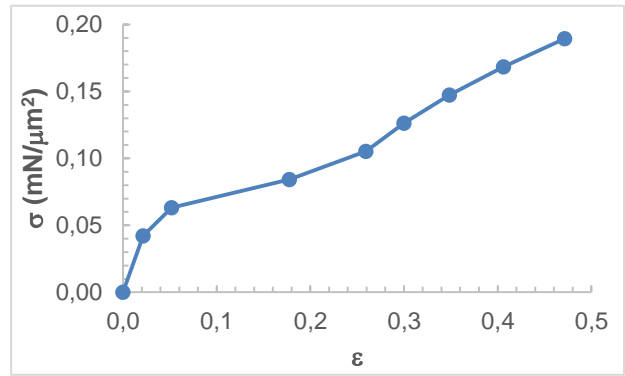


Fig. 76. Gráfica de esfuerzo-deformación de H1/1.

Tabla 76. Datos de la muestra H1/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,008$) mN/ μm^2
0	82,27	0,0000	0,000
196	84	0,0210	0,038
294	86,44	0,0507	0,056
392	101,31	0,2314	0,075
490	105,52	0,2826	0,094
588	110,72	0,3458	0,113
686	114,64	0,3935	0,132
784	120,11	0,4599	0,151

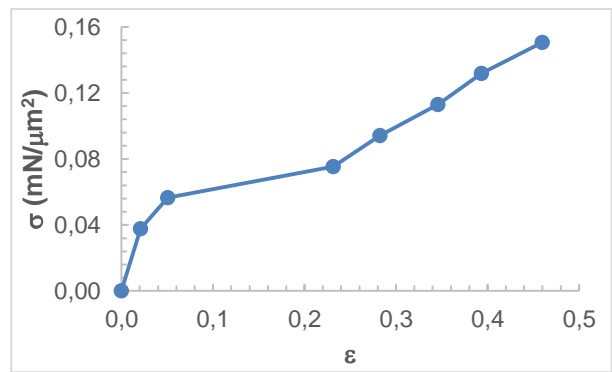


Fig. 77. Gráfica de esfuerzo-deformación de H1/2.

Tabla 77. Datos de la muestra H1/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0002$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	97,19	0,0000	0,00
196	98,45	0,0130	0,04
294	99,17	0,0204	0,07
392	104,39	0,0741	0,09
490	121,72	0,2524	0,11
588	125,02	0,2863	0,13
686	129,42	0,3316	0,16
784	133,22	0,3707	0,18

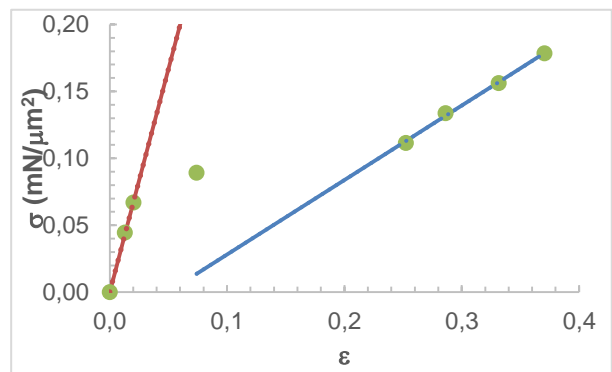


Fig. 78. Gráfica de esfuerzo-deformación de H1/3.

Tabla 78. Datos de la muestra H2/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.01) mN/μm ²
0	74,4	0,0000	0,00
196	75,94	0,0207	0,04
294	76,35	0,0262	0,07
392	77,36	0,0398	0,09
490	86,08	0,1570	0,11
588	94,36	0,2683	0,13
686	98,27	0,3208	0,16
784	101,7	0,3669	0,18
882	103,74	0,3944	0,20
980	108,19	0,4542	0,22

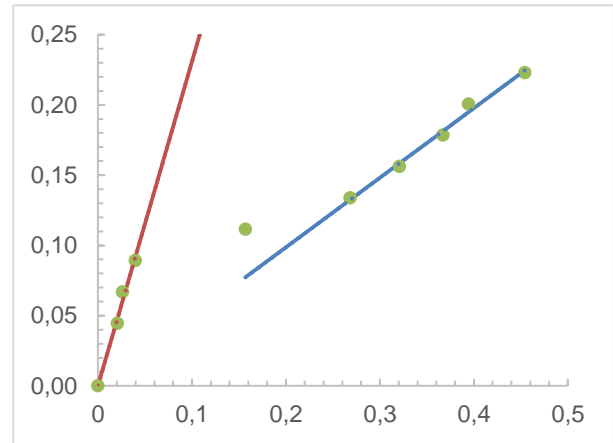


Fig. 79. Gráfica de esfuerzo-deformación de H2/1.

Tabla 79. Datos de la muestra H2/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0002	(σ ±0.01) mN/μm ²
0	96,88	0,0000	0,00
196	100,64	0,0388	0,08
294	104,93	0,0831	0,12
392	122,83	0,2679	0,16

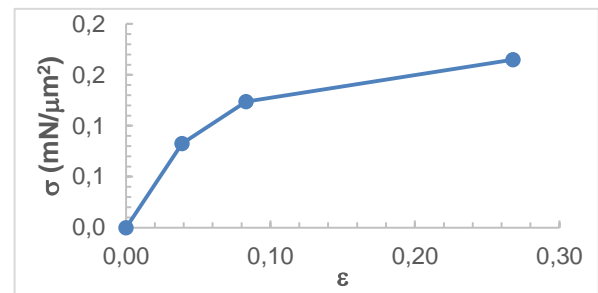


Fig. 80. Gráfica de esfuerzo-deformación de H2/2.

Tabla 80. Datos de la muestra H2/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.03) mN/μm ²
0	73,68	0,0000	0,00
196	76,16	0,0337	0,13
294	85,95	0,1665	0,19
392	95,59	0,2974	0,26
490	99,33	0,3481	0,32

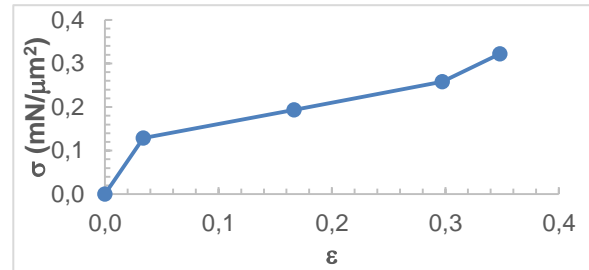


Fig. 81. Gráfica de esfuerzo-deformación de H2/3.

Tabla 81. Datos de la muestra H2/4.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	ε ±0,0003	(σ ±0.008) mN/μm ²
0	80,24	0,0000	0,000
196	82,95	0,0338	0,047
294	85,74	0,0685	0,071
392	94,38	0,1762	0,095
490	99,13	0,2354	0,118
588	103,81	0,2937	0,142

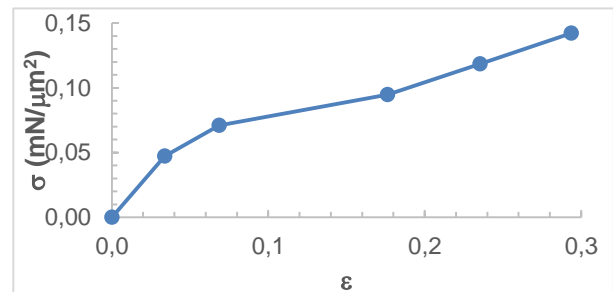


Fig. 82. Gráfica de esfuerzo-deformación de H2/4.

Tabla 82. Datos de la muestra H3/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	88,8	0,0000	0,00
196	91,29	0,0280	0,05
294	92,06	0,0367	0,08
392	95,16	0,0716	0,10
490	111,54	0,2561	0,13
588	116,19	0,3084	0,15
686	120,96	0,3622	0,18
784	124,19	0,3985	0,20

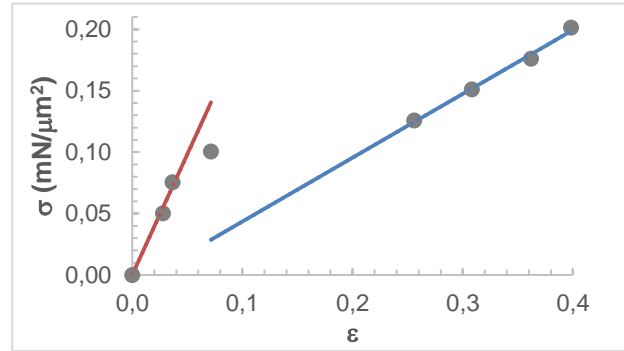


Fig. 83. Gráfica de esfuerzo-deformación de H3/1.

Tabla 83. Datos de la muestra H3/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,02$) mN/ μm^2
0	71,57	0,0000	0,00
196	72,08	0,0071	0,06
294	73,11	0,0215	0,09
392	73,11	0,0215	0,12
490	74,83	0,0455	0,15
588	88,87	0,2417	0,18
686	91,95	0,2848	0,21
784	94,58	0,3215	0,25
882	97,56	0,3631	0,28
980	100,72	0,4073	0,31

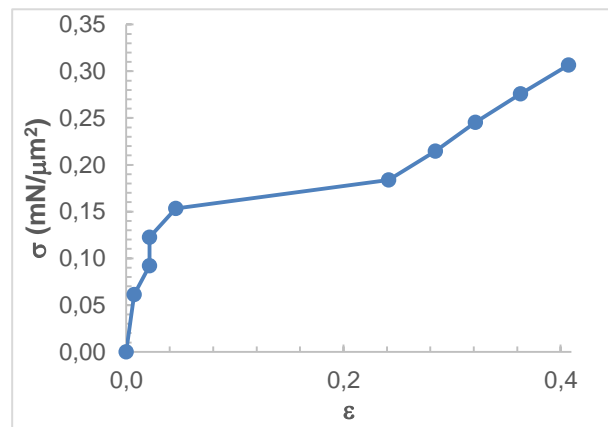


Fig. 84. Gráfica de esfuerzo-deformación de H3/2.

Tabla 84. Datos de la muestra H3/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,009$) mN/ μm^2
0	90,43	0,0000	0,000
196	92,21	0,0197	0,036
294	92,58	0,0238	0,054
392	93,11	0,0296	0,071
490	95,1	0,0516	0,089
588	104,19	0,1522	0,107
686	114,26	0,2635	0,125
784	117,26	0,2967	0,143
882	121,22	0,3405	0,161
980	126,26	0,3962	0,179

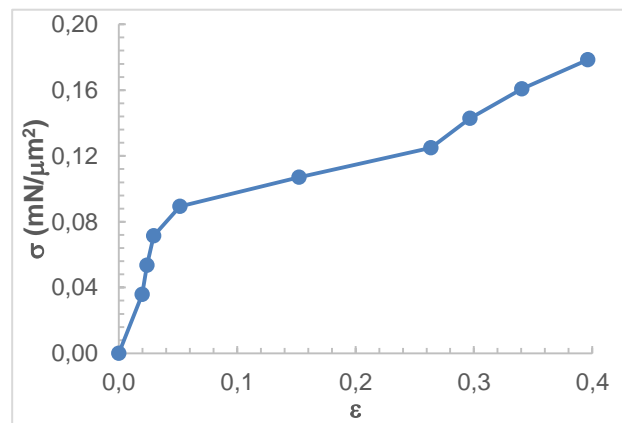


Fig. 85. Gráfica de esfuerzo-deformación de H3/3.

Tabla 85. Datos de la muestra H4/1.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,005$) mN/ μm^2
0	86,3	0,0000	0,000
20	87,78	0,0171	0,028
30	88,86	0,0297	0,042
40	92,05	0,0666	0,056
50	108,93	0,2622	0,070
60	113,32	0,3131	0,084
70	116,97	0,3554	0,098
80	123,06	0,4260	0,112
90	126,46	0,4654	0,125

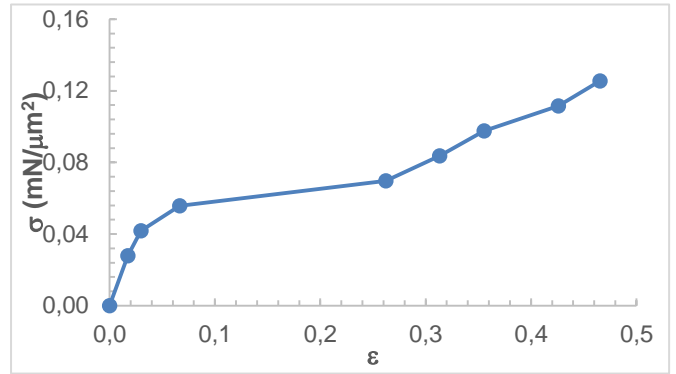


Fig. 86. Gráfica de esfuerzo-deformación de H4/1.

Tabla 86. Datos de la muestra H4/2.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	86,82	0,0000	0,00
20	92,28	0,0629	0,07
30	104,13	0,1994	0,11
40	111,38	0,2829	0,14
50	117,41	0,3523	0,18

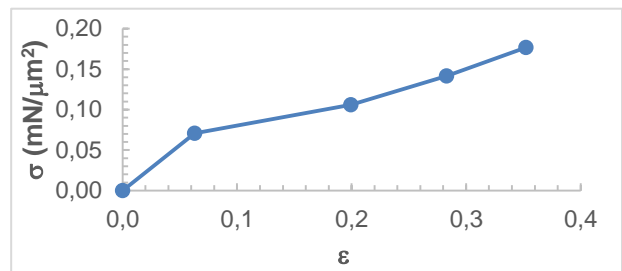


Fig. 87. Gráfica de esfuerzo-deformación de H4/2.

Tabla 87. Datos de la muestra H4/3.

(F ±1) mN	(l ±0,01) mm	$\epsilon \pm 0,0003$	($\sigma \pm 0,01$) mN/ μm^2
0	92,99	0,0000	0,00
20	96,15	0,0340	0,05
30	97,25	0,0458	0,08
40	101,45	0,0910	0,10
50	120,51	0,2959	0,13
60	124,54	0,3393	0,15
70	128,94	0,3866	0,18
80	131,93	0,4188	0,20

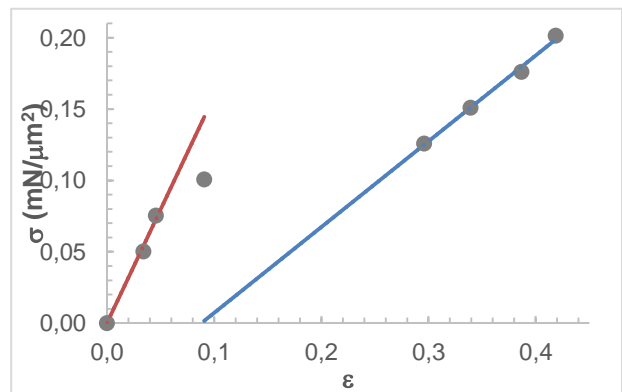


Fig. 88. Gráfica de esfuerzo-deformación de H4/3.