

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PANDEO DE UN FILAMENTO SEMIFLEXIBLE EN UN MEDIO COMPLEJO

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE BUCKLING OF A SEMI-FLEXIBLE FILAMENT IN A COMPLEX MEDIUM

G. van der Velde <sup>a</sup>, C. Gómez <sup>a</sup>, M. Freytes <sup>b,c</sup>, L. Bruno <sup>a,c</sup>, M.V. D'Angelo <sup>b,c</sup>, \*

<sup>a</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física

<sup>b</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Grupo de Medios Porosos

<sup>c</sup> CONICET

Recibido: 05/06/17; aceptado: 05/04/18

En este trabajo se estudia la deformación por compresión de un filamento delgado inmerso en un fluido. Se estudia la forma del filamento variando la magnitud de la compresión aplicada y las propiedades reológicas del medio: puramente viscoso, puramente elástico y con comportamiento viscoelástico. Se observan transiciones entre regímenes de diferente estabilidad.

*Palabras clave: filamentos flexibles, fluidos complejos..*

In this work we study the deformation of a thin filament immersed in different fluids when subjected to a compressive force.

The filament shape is analyzed for different magnitudes of the applied compression and for different rheological properties of the medium: purely viscous, purely elastic and displaying viscoelastic behavior.

Transitions between different regimes are observed

*Keywords: flexible filaments, complex fluids*

### I. INTRODUCCIÓN

La deformación de filamentos en medios complejos se presenta en numerosas aplicaciones que involucran un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Como ejemplos podemos mencionar: las estructuras metálicas para la construcción de edificios antisísmicos, la utilización de soluciones poliméricas para la recuperación asistida del petróleo [1] o de fibras como medio de sostén en fracturación hidráulica [2], el empleo de fibras ópticas como hidrófonos o como sensores para la medición de temperatura y presión de aguas subterráneas [3]; en la formación y evolución de biofilms [4] o en el movimiento de los microtúbulos del citoesqueleto, que están involucrados en el transporte de organelas en las células [5].

Aunque la dinámica de filamentos flexibles en fluidos viscosos [6] o elásticos [7] es conocida, el comportamiento en el caso de estar sumergido en un medio complejo no ha sido analizado en profundidad y faltan estudios a escala de laboratorio. La gran cantidad de fenómenos donde la deformación de filamentos en medios complejos es relevante, hacen que este tema sea de interés no sólo desde el punto de vista académico, sino también por sus posibles aplicaciones tecnológicas.

Es este trabajo describiremos experiencias de compresión controlada de filamentos delgados en distintos medios: viscosos, elásticos y viscoelásticos.

### II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Las experiencias se realizaron dentro de una celda de vidrio de 35 cm de largo, 15 cm de ancho y 20 cm de alto. Por un orificio de 4 mm de diámetro en una de las caras laterales se introdujo una varilla de acrílico que dispone, en el extremo interior, de una pieza que permite sujetar el filamento. El otro extremo se acopló al émbolo de una jeringa, sujeta al pistón de una bomba comercial Harvard MA 1 55-2226, modelo 22. En la cara opuesta de la celda se fijó otra varilla similar, alineada con la primera. Entre ambas varillas se sujetó el filamento. El dispositivo completo se muestra en la figura 1.

El procedimiento empleado para estudiar la deformación del filamento consistió en tomar imágenes del proceso con una cámara digital de alta resolución (1024x768 pixeles) Sony XCD- SX910 de la serie IEEE 1394. Se utilizó una lente marca Nikon de 28mm de distancia focal.

Para generar un contraste de intensidad adecuado se iluminó la parte posterior con una placa luminosa difusa. Las imágenes se adquirieron con el software VirtualDub y se analizaron con los programas ImageJ (<https://imagej.nih.gov/ij/>) y Matlab (The MathWorks, Inc.).

---

\* [vdangelo@fi.uba.ar](mailto:vdangelo@fi.uba.ar).

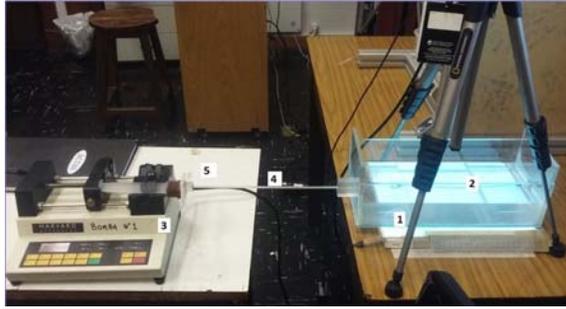


Figura 1. Dispositivo experimental para el estudio de la deformación por compresión de filamentos delgados, 1. celda, 2. filamento, 3. bomba, 4. varilla para la compresión, 5. pistón.

### Filamentos: caracterización

Los filamentos utilizados consistieron en cintas de acetato de sección rectangular de ancho  $a$  entre 4,6 y 8,1 mm, espesor  $e$  entre 170 y 210  $\mu\text{m}$ , y longitud  $L$  igual a 23,5cm. Se utilizaron filamentos planos y no cilíndricos para reducir posibles torsiones e inducir la deformación en el plano perpendicular al eje óptico de la cámara, favoreciendo de este modo el registro de las experiencias. Se calculó el momento de inercia seccional, según la expresión  $I = (ae^3)/12$ .

El módulo de Young de los filamentos se determinó por el método de cantilever, midiendo la deflexión del filamento sujeto en uno de sus extremos cuando se le ejerce una fuerza transversal en el extremo libre [8]. Esta determinación se realizó en aire, con cintas de longitud  $L_c$  (de aproximadamente 5 cm) y utilizando pesos de diferente magnitud ubicados en el extremo libre de la cinta. Usando la siguiente expresión

$$y = \frac{FL_c^3}{3EI} \quad (1)$$

donde  $F$  es el peso aplicado,  $y$  es el desplazamiento del extremo libre, se determinó el módulo de Young,  $E$ , de los filamentos. La rigidez flexural de los filamentos se determinó como  $K=EI$  y se obtuvieron valores de  $K=6,65 \pm 2 \text{ Pa}\cdot\text{m}^4$  para la cinta de acetato.

### Preparación y caracterización de los fluidos

En las experiencias se usaron agua y soluciones de agua-glicerina al 70% como fluidos newtonianos, soluciones de poliacrilamida en agua al 1% o 2% como fluidos viscoelásticos, y una solución de agar-agar en agua al 0,3% como medio elástico.

Para la preparación de poliacrilamida se mezcló la cantidad de gramos de polímero necesaria (Sigma), dependiendo de la concentración deseada, cada 100  $\text{cm}^3$  de agua destilada, agregando lentamente de a pequeñas cantidades, y se agitó la solución por 24 horas en un agitador magnético para obtener su correcta disolución.

La solución de agar se preparó mezclando 3g d agar en polvo por cada litro de agua, y se calentó en el microondas hasta alcanzar el punto de ebullición. Una vez enfriado, se vertió en la celda con el filamento, y se esperó dos días para que gelificara.

Para caracterizar la reología de los fluidos viscoelásticos, se utilizó un reómetro de plato como marca Anton-Paar Modular Compact Rheometer Physica 300. El mismo está provisto de un plato horizontal, sobre el que se vierte una pequeña muestra de fluido a analizar, y un cono de revolución se posiciona a una distancia de típicamente 1 mm, con su eje perpendicular al plano. El cono rota creando un gradiente de velocidades en el fluido (velocidad de corte) y un sensor permite medir el esfuerzo de corte resultante.

El gráfico de la figura 2 muestra las mediciones de viscosidad,  $\mu$ , en función de velocidad de corte,  $\dot{\gamma}$ , para poliacrilamida al 1%, y se las compara con las obtenidas para glicerina y agua. Para el caso de los fluidos newtonianos se observa un valor constante exceptuando las mediciones para las velocidades de corte más bajas. En ese rango, las frecuencias de giro del cono son las más chicas y el sistema no habría alcanzado un régimen estacionario durante el tiempo de medición (nótese, por ejemplo, que para glicerina se obtienen valores estacionarios para velocidades de corte más bajas que para agua).

Para las mediciones de poliacrilamida ese fenómeno inicial se hace menos relevante por ser precisamente un fluido más viscoso. En este caso, como era de esperarse, la viscosidad no es constante, y tiende al valor del solvente para velocidades de corte grandes.

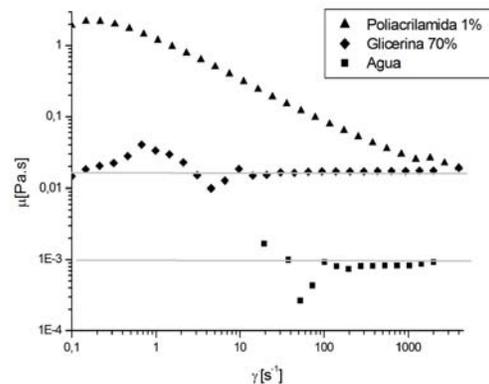


Figura 2. Gráfico de viscosidad en función de la velocidad de corte, ambos en escala logarítmica, para los tres fluidos analizados. Las mediciones se realizaron a temperatura constante (25°C).

### III. EXPERIENCIAS DE COMPRESIÓN

Para las experiencias de compresión se coloca el filamento en los sostenes (uno fijo a la celda y otro al cilindro acoplado al émbolo móvil) comprobando que se encuentre completamente estirado y sin torsión. Luego, se activa la bomba de inyección que permite mover el émbolo a una velocidad constante, empujando el extremo móvil del filamento. Las imágenes se registran con la cámara y luego son analizadas.

### Medios viscosos

La figura 3(a) muestra la deformación adquirida por una cinta de longitud  $L=(23,5\pm 0,1)$  cm,  $a=(4,6\pm 0,1)$  mm, y  $e=(170\pm 5)$   $\mu$ m, en glicerina al 70% para distintas compresiones, en la figura 3(b) se observa la imagen final de la experiencia de compresión de la figura 3(a). Deformaciones análogas se obtuvieron en las experiencias realizadas en agua y/o con cintas de espesor y ancho diferentes.

Se ajustaron las formas del filamento con la solución de la ecuación de Euler-Bernoulli,  $y=B[\cos(2\pi x/L)-1]$ , para el caso que el filamento se comprima lateralmente un valor  $\Delta L$ , por una fuerza  $P$  [7], comprobando para cada compresión analizada que la forma funcional propuesta describe satisfactoriamente la deformación adquirida. Para el caso de pequeñas deflexiones, donde  $B\approx(\Delta L)^{1/2}/\pi$ , se verificó que la amplitud de la deformación, varía con la raíz de la compresión, independientemente de la rigidez del material y la viscosidad del medio.

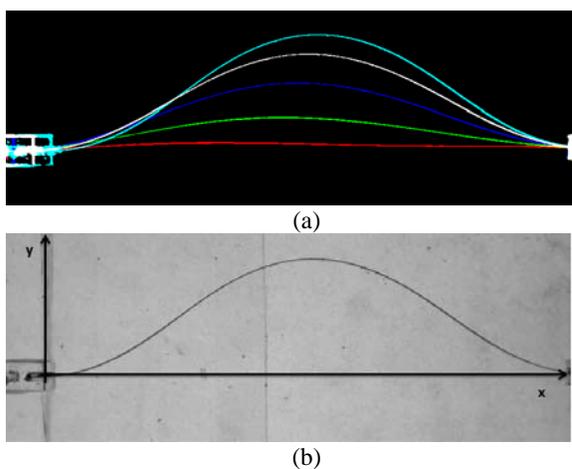


Figura 3. (a) Deformaciones superpuestas para distintas compresiones de la cinta de acetato en glicerina 70%:  $\Delta=0$ mm (rojo),  $\Delta=1,8$ mm (verde),  $\Delta=7,8$ mm (azul),  $\Delta=16,6$ mm (blanco),  $\Delta=24,4$ mm (celeste). (b) Cuadro del video de compresión en glicerina 70%, correspondiente a la mayor compresión  $\Delta=24,4$ mm

### Medios elásticos

La figura 4(a) muestra la deformación adquirida por la cinta acetato en agar para distintas compresiones, en la figura 4(b) se observa la imagen final de la experiencia de compresión de la figura 4(a). Nótese que a diferencia de lo observado en la figura 3(a) para medios viscosos puros, aquí se observa una deformación con una longitud característica menor que  $L$ .

En la figura 4(a), la forma inicial del filamento presenta una curvatura no nula, que no pudo ser corregida para evitar romper la estructura del medio gelificado. Aún así, el filamento adquiere una forma ondulada al ser comprimido.

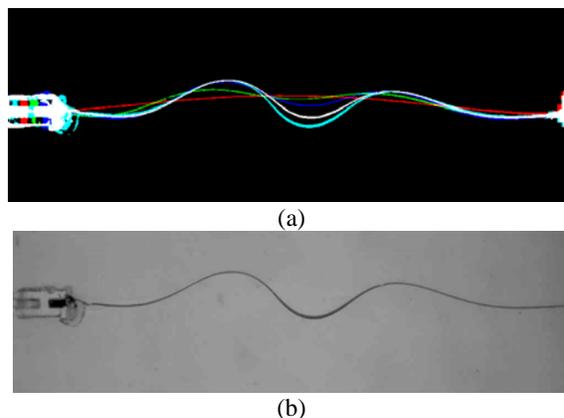


Figura 4. (a) Deformaciones superpuestas para distintas compresiones de la cinta verde en agar 0,3%:  $\Delta=0$ mm (rojo),  $\Delta=3,7$ mm (verde),  $\Delta=10,4$ mm (azul),  $\Delta=19,1$ mm (blanco),  $\Delta=30,2$ mm (celeste). (b) Cuadro del video de compresión en agar 0,3%, correspondiente a la mayor compresión  $\Delta=30,2$ mm

### Medios viscoelásticos

La figura 5(a) muestra las deformaciones superpuestas para distintas compresiones adquiridas por la cinta acetato en poliacrilamida al 2%, en la figura 5(b) se observa la imagen final de la experiencia de compresión de la figura 5(a). Esta deformación tiene el mismo aspecto armónico que la observada en agar, figura 4(a), aunque de mayor longitud de onda

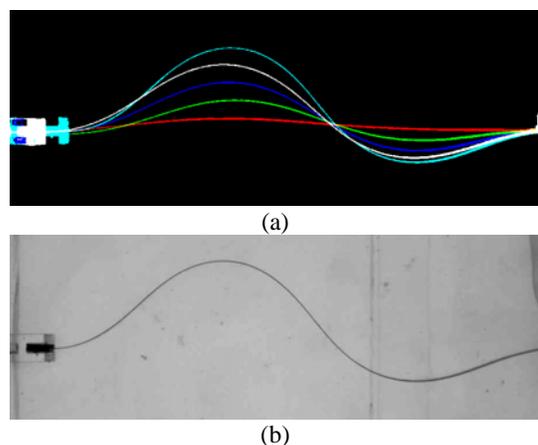


Figura 5. (a) Deformaciones superpuestas para distintas compresiones de la cinta verde en poliacrilamida 2%:  $\Delta=0$ mm (rojo),  $\Delta=5,8$ mm (verde),  $\Delta=11,5$ mm (azul),  $\Delta=16,1$ mm (blanco),  $\Delta=20,5$  (celeste). (b) Cuadro del video de compresión en poliacrilamida 2%, correspondiente a la mayor compresión  $\Delta=20,5$ mm.

Otro fenómeno a destacar es que, luego de realizar las experiencias de compresión, la deformación adquirida relaja a la observada en un medio viscoso (ver figura 6). Si bien inicialmente la reología del medio favorece la formación de una longitud de onda característica menor que  $L$ , la dinámica del problema está fuertemente influenciada por la viscosidad del medio. Esta viscosidad llega a ser dos órdenes de magnitud mayor que la de la solución de glicerina al

70% agregando un término disipativo que no puede despreciarse.

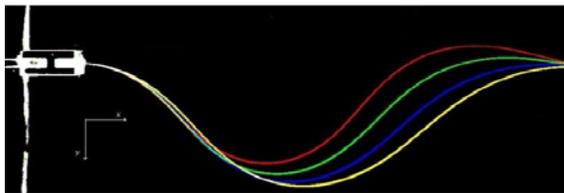


Figura 6. Relajación del filamento hasta la deformación característica de un medio viscoso.  $\Delta t=0$  seg (rojo),  $\Delta t=100$  seg (verde),  $\Delta t=200$  seg (azul),  $\Delta t=300$  seg (amarillo)

#### IV. CONCLUSIONES

Si bien se corroboró experimentalmente la deformación esperada para medios viscosos puros, el análisis de la compresión en poliacrilamida sugiere que se trata de un comportamiento restringido a un límite de bajas velocidades y/o viscosidades. La diferencia entre las deformaciones en la poliacrilamida y en glicerina al 70%, podría explicarse teniendo en cuenta que la poliacrilamida tiene una viscosidad varios órdenes de magnitud mayor a la de la glicerina.

Se realizarán experiencias que permitan comprimir con velocidades mayores, o bien empleando medios con mayor viscosidad, para verificar esta hipótesis.

#### V. REFERENCIAS

- 1- Afsharpoor, A., Balhoff, M.T., Bonnacaze, R., Huha, C., Journal of Petroleum Science and Engineering, **94-95**, 79-88 (2012), [dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.027](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.027)
- 2- Liang, F., Sayed, M., Al-Muntasheri, G.A., Chang, F.F., Li, L., Petroleum, **2**, 1, 26-39 (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.petlm.2015.11.001>
- 3- Selker, J., N. van de Giesen, M. Westhoff, W. Luxemburg, and M. B. Parlange, Geophys. Res. Lett., **33**, L24401, (2006), doi:10.1029/2006GL027979.
- 4- Autrusson, N., Guglielmini, L., Lecuyer, S., Rusconi, R., Stone, H.A., Phys. Fluids, **23**, 063602 (2011), doi:10.1063/1.3601446
- 5- Brangwynne, C.P., MacKintosh, F.C., Kumar, S., Geisse, N.A., Talbot, J., Mahadevan, L., Parker, K.K., Ingber, D. E., Weitz, D. A., JCB **173**, 5, 733, (2006). doi:10.1083/jcb.200601060
- 6- Landau, L.D., Lifshitz, E.M., "Theory of Elasticity" Pergamon Press, Oxford, (1959),
- 7- Timoshenko, S.P., Gere, J.M., "Theory of Elastic Stability" Dover Publications, (2009)
- 8- Jonathon Howard. "Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton". Sinauer Associates. (2001)