

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ROTURA CAPILAR DE CHORROS LÍQUIDOS ESTIRADOS POR GRAVEDAD

P. Consoli-Lizzi<sup>1</sup>, J. García<sup>2</sup>, H. González<sup>3</sup>, W. Coenen<sup>4</sup> y A. Sevilla<sup>5</sup>

1 Laboratorio de Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina  
paula\_consoli@hotmail.com

2 Departamento de Física Aplicada I, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, España  
gargar@us.es

3 Departamento de Física Aplicada III, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, España  
helio@us.es

4 Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California San Diego, Estados Unidos  
wcoenen@gmail.com

5 Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, España  
asevilla@ing.uc3m.es

### Introducción

La rotura de chorros líquidos en gotas ha atraído la atención de muchos científicos e ingenieros durante los últimos siglos. Se trata de un proceso en el que intervienen perturbaciones que crecen debido a una inestabilidad capilar mientras son advectadas por el flujo, hasta que se hacen lo suficientemente grandes como para provocar la rotura del chorro (Eggers, 2008). Este fenómeno se encuentra ampliamente en la vida cotidiana, ya sea en forma de un hilo de miel que cae por su propio peso o en un chorro de agua del grifo, así como en aplicaciones industriales. En este último ámbito, los chorros estirados son de interés debido a que permiten la producción de pequeñas gotas sin recurrir a inyectores de tamaño micrométrico que podrían obstruirse fácilmente. Se han desarrollado diferentes técnicas para su obtención, de las cuales el estiramiento gravitacional es la más simple y constituye el tema de este trabajo.



**Figura 1.-** Rotura de un chorro estirado por gravedad, donde se observa la región de fuerte estiramiento en el menisco. Se indican la aceleración gravitacional  $g$ , la longitud instantánea  $L(t)$  y el radio del inyector  $R$ .

La configuración de flujo de interés puede observarse en la Figura 1. Un líquido es inyectado verticalmente en una atmósfera en reposo, generando un chorro que se acelera y estira por acción de la gravedad,  $g$ . La tensión superficial es responsable del crecimiento de ciertas perturbaciones, seleccionando las longitudes de onda más inestables, mientras que la inercia, la viscosidad y el estiramiento son estabilizantes. Cuando el radio de las perturbaciones advectadas iguala al radio local del chorro, se produce la rotura del mismo en gotas.

Si bien la literatura existente cubre ampliamente la estabilidad de chorros cilíndricos y cuasi-paralelos, el efecto estabilizante del menisco aún no ha sido caracterizado.

### Objetivos

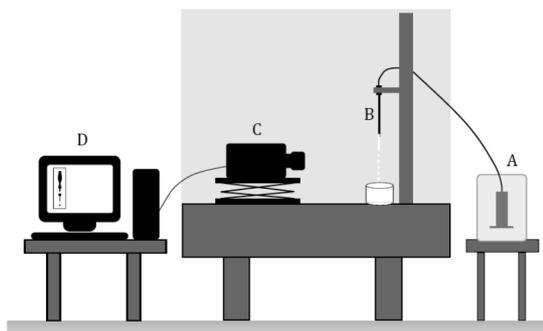
El objetivo del presente trabajo es investigar experimentalmente el efecto del estiramiento gravitatorio sobre la rotura de chorros líquidos, caracterizada mediante la medición de la frecuencia de las perturbaciones más amplificadas y la longitud intacta resultante,  $L_b$ . Ésta última se define como la longitud instantánea del chorro  $L(t)$  en el momento en que se desprende una gota.

Es de interés evaluar la estabilidad de chorros en que se varían los tres parámetros de control del flujo: el caudal inyectado, el radio del inyector y la viscosidad del fluido. A su vez, se contempla que las perturbaciones a las que está sujeta esta configuración pueden ser las naturalmente presentes en la instalación, o bien otras específicamente impuestas de amplitud inicial y frecuencia conocidas.

### Materiales y Métodos

Hemos diseñado una campaña experimental que se divide en dos casos según el origen de las perturbaciones: rotura natural y rotura forzada. En el primer caso, las perturbaciones se deben al ruido ambiente y sólo se controlan pasivamente, presentando el espectro de ruido un rango amplio de frecuencias. En un experimento de rotura controlada, por el contrario, las perturbaciones se imponen al flujo en forma de un forzado mecánico armónico, que se manifiesta en fluctuaciones de la velocidad axial media de amplitud y frecuencia conocidas a la salida del inyector. Tras el diseño y la construcción de las dos instalaciones experimentales, se han generado chorros con diferentes viscosidades del fluido (aceites de silicona de 50 a 200 cSt), diámetros de inyector (2.5 a 7 mm) y caudales inyectados (0.09 a 0.9 ml/s). Su rotura se ha examinado analizando las imágenes adquiridas con una cámara de alta velocidad.

La Figura 2 muestra el esquema de la instalación experimental para observar la rotura natural de chorros. Una bomba de jeringa  $A$  impulsa un caudal constante que es inyectado usando un tubo dispuesto verticalmente,  $B$ . El chorro es generado dentro de una cámara de PMMA y sobre una mesa antivibraciones, a fin de minimizar las perturbaciones procedentes del ambiente. Una cámara de alta velocidad  $C$  registra imágenes de la rotura del chorro, que posteriormente se analizan con un código especialmente desarrollado.



**Figura 2.-** Instalación experimental para el estudio de la rotura natural.

La Figura 3 presenta un esquema de la instalación experimental para estudiar la rotura controlada de chorros. La bomba de jeringa *A* permite establecer el caudal constante del chorro, mientras que la estimulación mecánica sinusoidal de frecuencia y amplitud controlada se proporciona en una cámara de estimulación *B*. En otra cámara aguas arriba del chorro *C*, se miden las fluctuaciones de presión para obtener la amplitud de las perturbaciones aplicadas (García, 2014). Una vez que el chorro se establece, estas perturbaciones consisten en fluctuaciones de la velocidad axial mientras la línea de contacto permanece fija. Se adquieren imágenes de la rotura usando una cámara de alta velocidad *F*, para ser posteriormente analizadas.

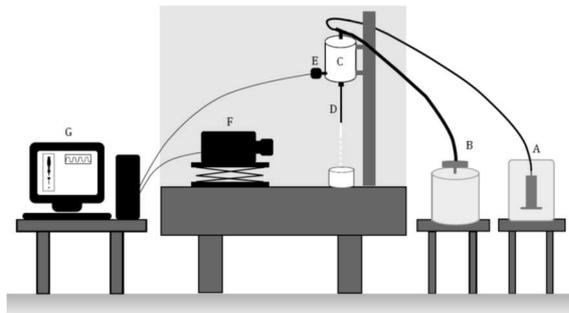


Figura 3.- Instalación experimental para el estudio de la rotura controlada de chorros.

### Evaluación de Resultados

En los experimentos de rotura natural se ha observado una rotura irregular, caracterizada por una gran dispersión de resultados, como se aprecia en la Figura 4. Se ha valorado la dependencia de la longitud intacta y la frecuencia más amplificada en función de los tres parámetros de control. Al igual que para chorros cuasi-paralelos, la longitud intacta se incrementa con la viscosidad y el caudal (Figura 5), y decrece ligeramente con el uso de mayores inyectores. La interpretación de la frecuencia de las perturbaciones más amplificadas, que no ha sido reportada en la literatura, es un trabajo en progreso.

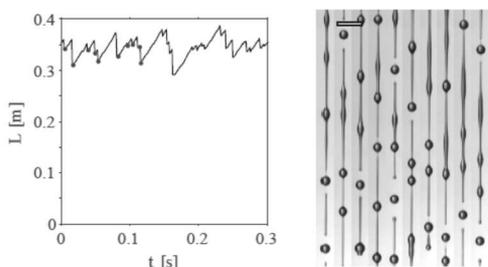


Figura 4.- Rotura natural de un chorro. A la izquierda, evolución temporal de la longitud instantánea  $L$ . Los círculos indican la longitud de rotura  $L_b$ , cuyas fotografías se muestran a la derecha.

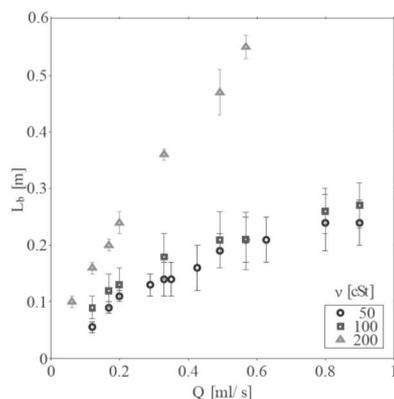


Figura 5.- Longitud intacta  $L_b$  en función del caudal  $Q$ , para diferentes viscosidades cinemáticas  $\nu$  del fluido de trabajo.

En los experimentos de rotura controlada, la frecuencia y la amplitud de la estimulación se han variado para distintas configuraciones del flujo (50 a 600 rad/s, con amplitud de 20% a 80% de la velocidad media en el inyector), observando una transición de rotura irregular a periódica. La Figura 6 constituye un ejemplo de rotura controlada. Asimismo, para ciertos valores de los parámetros de control se ha establecido por primera vez un régimen de goteo oscilante como el de la Figura 7, el cual tiene lugar para caudales por encima del valor crítico de transición de régimen de goteo a chorro.

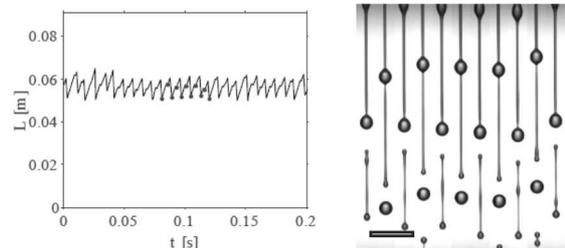


Figura 6.- Rotura controlada de un chorro. A la izquierda, evolución temporal de la longitud instantánea  $L$ . Los círculos indican la longitud de rotura  $L_b$ , cuyas fotografías se muestran a la derecha (roturas consecutivas).

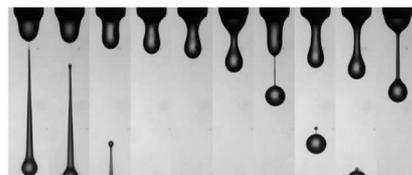


Figura 7.- Secuencia de fotografías de un ciclo de goteo oscilante.

### Conclusiones

La campaña experimental ha permitido estudiar el efecto del estiramiento gravitatorio sobre la rotura de chorros líquidos, para distintos valores de las variables de control del problema (viscosidad del fluido, diámetro del inyector y caudal, así como amplitud y frecuencia de las perturbaciones). En todos los casos, el flujo es fuertemente no paralelo en el menisco, donde las perturbaciones inicialmente estables de longitud de onda corta se estiran hasta que se vuelven inestables.

Si bien no se ofrecen detalles en el presente Resumen, nuestras observaciones han permitido validar un planteo teórico-numérico propio del problema (Consoli, 2016) basado en el modelo desarrollado por Eggers (1994) y García (1994), confirmando el retardo en el crecimiento de las perturbaciones en la región cercana al inyector.

### Referencias Bibliográficas

Consoli, P. (2016). *Capillary break-up of stretched liquid jets*. PhD Thesis, Universidad Carlos III de Madrid.

Eggers, J. & Dupont, T.F. (1994). "Drop formation in a one-dimensional approximation of the navier-stokes equation". *J. Fluid Mech.* 262, 205–222.

Eggers, J. & Villermaux, E. (2008). "Physics of liquid jets". *Rep. Prog. Phys.* 71, 036601.

García, F.J. & Castellanos, A. (1994) "One-dimensional models for slender axisymmetric viscous liquid jets". *Phys. Fluids* 6 (8), 2676–2689.

García, F. J., González, H., Castrejón-Pita, J. R. & Castrejón-Pita, A. A. (2014). "The break-up of harmonically stimulated capillary jets". *App. Phys. Lett.* 105 (094104).