



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Ingeniería Civil – Ingeniería de Costas y Ríos

INFLUENCIA DE LA ESTELA NEGATIVA EN LA DEFORMACIÓN DE GOTAS  
VISCOELÁSTICAS.

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

FERNANDO ADRIÁN CARRIL NARANJO

TUTORES PRINCIPALES:

BALTASAR MENA INIESTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

BERNARDO FIGUEROA ESPINOZA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

Sisal, Yucatán

Diciembre del 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Salles Afonso De Almeida Paulo

Secretario: Dr. Torres Freyermuth Alec

Vocal: Dr. Mena Iniesta Baltasar

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Figueroa Espinoza Bernardo

2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. López González José

Sisal, Yucatán. Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Baltasar Mena Iniesta

-----  
**FIRMA**

*A mí madre*

Sé que estas en algún lugar con tu cara de orgullo; esa que siempre ponías cuando hacía algo que valiera la pena. Sé que estas rebosando de alegría y que si pudieras prepararías mi comida favorita con tal de hacerme feliz.

Pero para mí no hay mayor felicidad que brindarte estos momentos de dicha y orgullo, por eso te prometo que mi vida estará llena de logros y alegrías que te harán sentir orgullosa de mi. Te amo Marrisca, y te amare hasta el último de mis días.

## Agradecimientos.

Agradezco el apoyo de la UNAM, al Instituto de Ingeniería, al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, así como el apoyo económico de CONACYT.

Agradezco a mis tutores el Dr. Baltasar Mena y el Dr. Bernardo Figueroa por brindarme la oportunidad de trabajar con ustedes, por compartir sus conocimientos y guiarme a lo largo de este proceso.

Al Dr. Enrique Geffroy y al Dr. Marco Reyes quienes me prestaron sus laboratorios en el Instituto de Materiales y me trataron como un integrante más de su equipo de trabajo, especialmente a Liz quien de forma amable y paciente me ayudo con las pruebas reométricas.

La paciencia y disposición de Susana, Gerardo y Rebeca para darme consejos sobre la preparación fluidos y elaboración de los experimentos. A mis buenos amigos y amigas Alvaro, Ana, Berenice, Clemente, Daniel, Gicela, Ivette, Karen, Macario, Mariana, Marvin y Melissa, todos ustedes se volvieron mi gran familia Yucateca.

A mi papá, quien sigue siendo mi héroe y un ejemplo a seguir. Sin tu apoyo, este trabajo no sería posible. A mis hermanos Eduardo y Javier, por ayudarme a convertir los momentos de tristeza en alegría y lo de estrés en diversión, son los mejores hermanos que la vida puede ofrecer.

Finalmente agradezco y dedico este trabajo a mi mamá, quien me brindo apoyo y amor incondicional, gracias por todo.

## Resumen.

Se lanzaron gotas de un fluido Newtoniano y de un fluido viscoelástico a través de diferentes fluidos viscoelásticos. Mediante la técnica de visualización PIV se analizó el perfil de flujo alrededor de las gotas.

Los resultados experimentales muestran que las gotas Newtonianas presentan una estela negativa desplazada sobre el cuerpo de la gota, mientras que las gotas viscoelásticas presentan la estela negativa unos centímetros por debajo del cuerpo de la gota.

Adicionalmente se observaron gotas viscoelásticas viajando a través de un fluido viscoelástico sin sufrir deformación a pesar de exhibir estela negativa. Con estos resultados es posible concluir que la estela negativa no es determinante en la deformación de las gotas viscoelásticas.

# Índice General

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	7
1.1 Técnica de Visualización PIV.	7
1.2 Estela Negativa.	8
1.3 Gotas Newtonianas a Través de Medios Viscoelásticos.	12
1.4 Sedimentación de Esferas Sólidas en Medios Viscoelásticos.	13
1.5 Gotas Viscoelásticas a Través de Medios Newtonianos.	14
1.6 Gotas Viscoelásticas a Través de Medios Viscoelásticos.	15
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	18
2.1 Pruebas con Técnica PIV.	18
2.2 Calibración de la Cámara.	20
2.3 Composición y Elaboración de los Fluidos.	21
2.4 Caracterización de Fluidos.	22
<b>3. RESULTADOS.</b>	26
3.1 Gotas Newtonianas.	26
3.1.1 Gotas Newtonianas a Través de Medios Newtonianos.	26
3.1.2 Gotas Newtonianas a Través de Medios Viscoelásticos.	27
3.2 Cuerpo Sólido.	29
3.3 Gotas Viscoelásticas.	31
3.3.1 Fluido Exterior Newtoniano.	31
3.3.2 Flex 1.	32
3.3.3 Flex 2.	34
<b>4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>	38
<b>5. CONCLUSIONES.</b>	41
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.</b>	42
<b>7. ÍNDICE DE FIGURAS.</b>	45
<b>8. ÍNDICE DE TABLAS.</b>	49

# 1. INTRODUCCIÓN.

En esta sección se exponen de forma breve diferentes experimentos relacionados con el trabajo actual, donde se presentan algunas de las teorías y conclusiones más importantes a las que se han llegado al lanzar burbujas, objetos sólidos y gotas Newtonianas y viscoelásticas a través de medios viscoelásticos. Se incluye una breve descripción de la técnica de visualización empleada (Particle Image Velocimetry o PIV).

## 1.1 Técnica de Visualización PIV.

PIV es una técnica de visualización en la cual se introducen partículas reflejantes y de flotabilidad neutra en un fluido; estas partículas se iluminan mediante un haz de luz (generalmente luz de rayo láser). Los reflejos producidos por las partículas se captan mediante una serie de fotografías y se analizan con ayuda de un algoritmo, el cual permite conocer el desplazamiento de las partículas a través del tiempo.

La técnica PIV no indica el movimiento individual de las partículas (a diferencia de la técnica PTV), sino el movimiento promedio de un conjunto de partículas dentro de un “área de interrogación”, de esta forma se genera un vector de velocidad y dirección para cada área de interrogación.

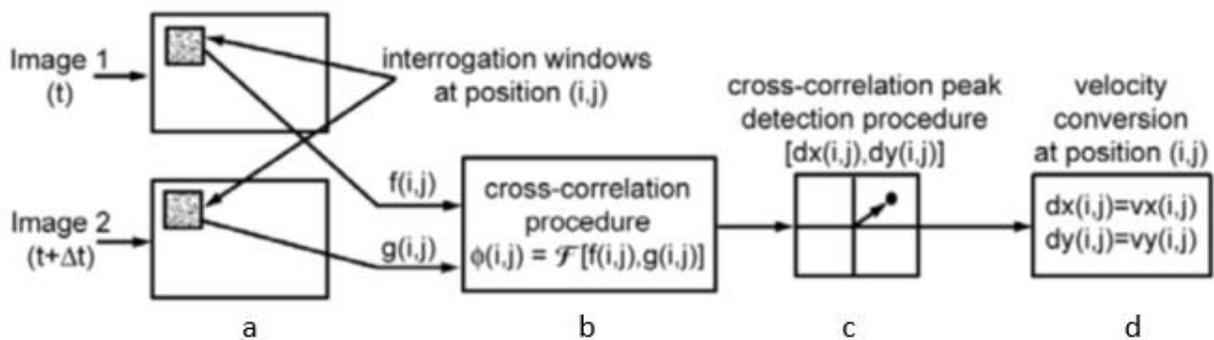


Figura 1. Algoritmo de procesamiento de imágenes de técnica PIV a) partición de imágenes en áreas de interrogación b) análisis estadístico de las partículas en cada una de las áreas de interrogación c) con base en la relación de imágenes se obtiene el promedio del cambio de las partículas d) el promedio se relaciona con espacio y se obtiene un vector de velocidad y dirección[1].

Los componentes que conforman un sistema PIV son las partículas de flotabilidad neutra, un elemento de iluminación (haz de luz láser), cámaras de alta resolución y un software especializado en el procesamiento de imágenes. En la figura 2 se muestra la configuración estándar de un sistema PIV.

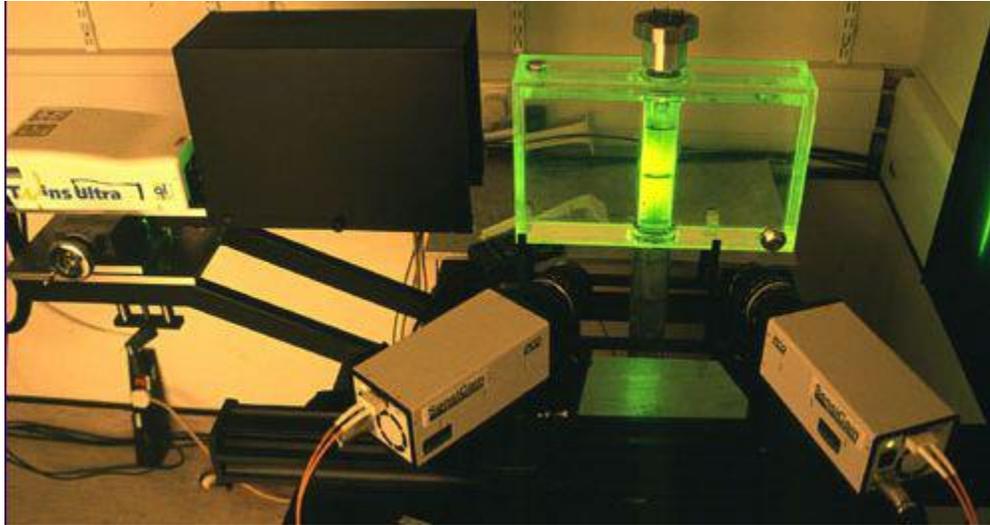


Figura 2. Disposición usual del equipo utilizado durante mediciones con técnica PIV. Se muestra un generador de rayos laser el cual ilumina un fluido de estudio y cámaras ubicadas de forma perpendicular al haz de luz. (Imagen obtenida de la página del laboratorio de química de la Universidad de Cambridge).

## 1.2 Estela Negativa.

En 1977 Sigli y Coutanceau [2] reportaron una zona de recirculación secundaria en la estela de esferas sólidas que descendían a través de un medio viscoelástico, la cual viajaba en sentido contrario al movimiento de las esferas. Hassager [3] nombró este fenómeno como estela negativa. A partir de 1977 se han realizado numerosos estudios en los que se describe el perfil de flujo de la estela negativa [4][5], en los que es posible identificar 3 zonas características:

- Zona Aguas Arriba: Ubicada en la parte superior de la gota o burbuja, el flujo es en el sentido de estas.
- Punto de Estancamiento: Se localiza a poca distancia por debajo de la gota o burbuja. Se caracteriza por ser el punto donde el flujo se invierte.
- Zona Aguas Abajo: Se ubica por debajo del punto de estancamiento, el flujo es en el sentido opuesto al movimiento de la gota o burbuja, también se conoce como estela negativa.

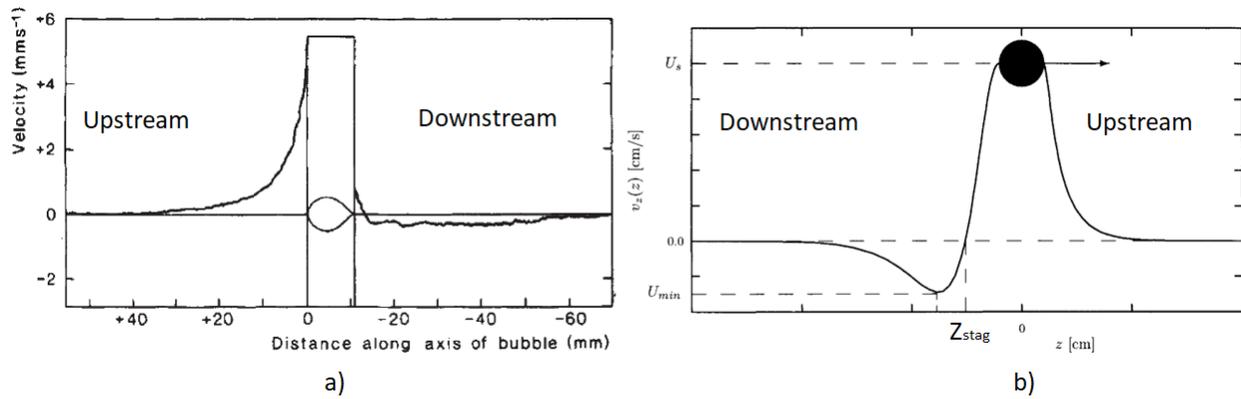


Figura 3. Perfil de velocidades de la estela negativa a) alrededor de una burbuja con estela negativa [3] b) alrededor de una esfera sólida con estela negativa. En la imagen se ilustran 3 zonas: Zona Aguas Arriba en la parte anterior de la esfera, Punto de Estancamiento indicado con la leyenda  $Z_{stag}$  y Zona Aguas Abajo [6].

Utilizando técnicas de visualización como Birrefringencia [7] y PIV [8][9] es posible conocer el perfil de velocidades de la estela negativa en 2D; estas técnicas han demostrado la presencia de 3 zonas claramente identificables (figura 4):

- Zona 1. Existe flujo ascendente en la parte superior de la burbuja.
- Zona 2. Flujo ascendente de forma cónica alrededor de la zona 3.
- Zona 3. Flujo descendente en la parte inferior de la burbuja.

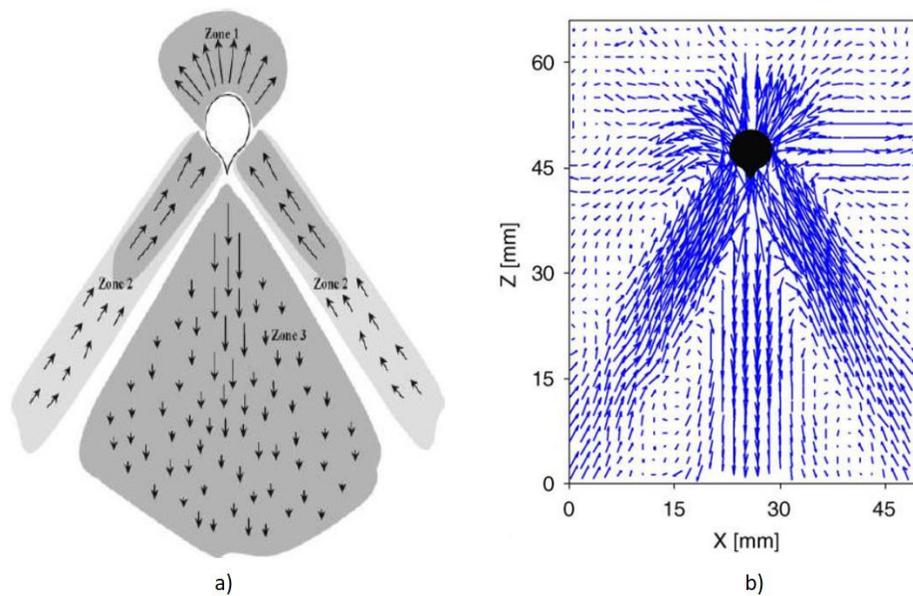


Figura 4. Estela negativa en 2D a) Esquema donde se muestran las tres zonas que conforman la estela negativa [7] b) Imagen típica de la estela negativa obtenida mediante técnica PIV [10].

Imaizumi [11] sugiere que las técnicas de visualización PIV, Birrefringencia y Anemometría de Laser Doppler no son adecuadas para conocer las causas de la estela negativa, por lo que decidió utilizar una malla de microburbujas para estudiar la dinámica de la estela negativa en función del tiempo.

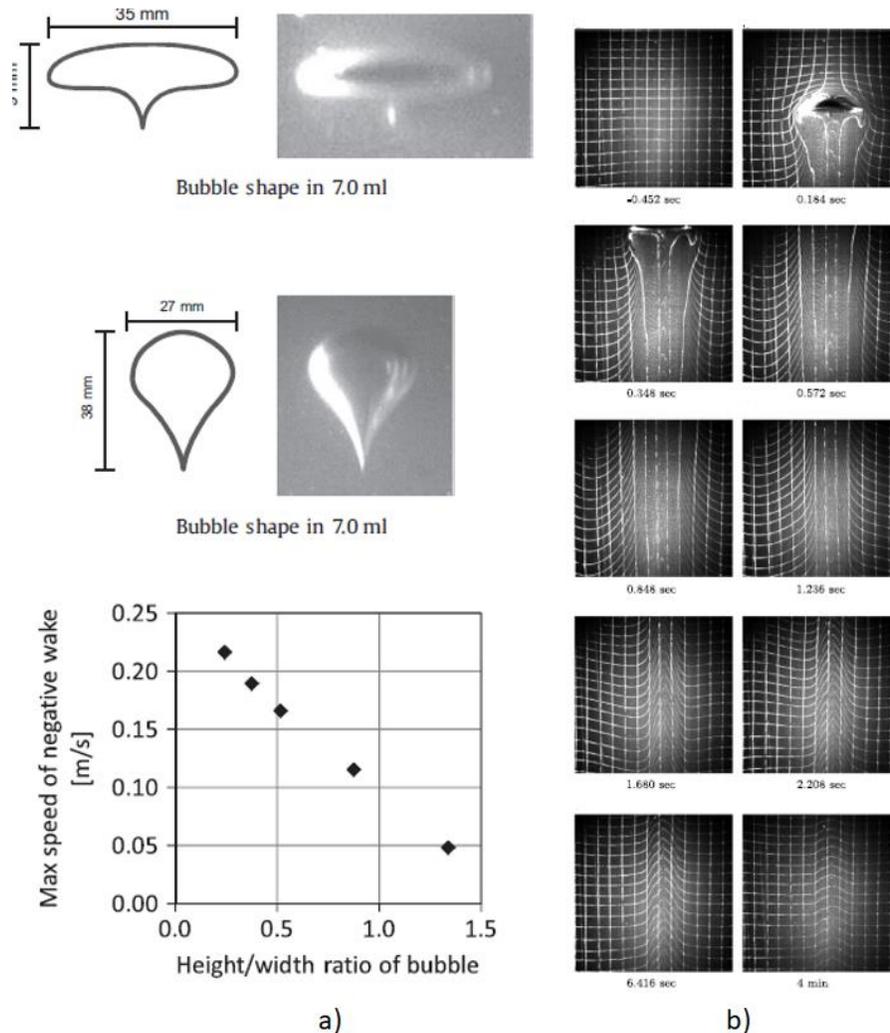


Figura 5. Resultados encontrados mediante técnica de microburbujas a) relación entre relación de radios de una burbuja y el flujo de una estela negativa b) evolución de un fluido viscoelástico tras el paso de una burbuja en el cual se observa la recuperación de su forma original después de 4 minutos.

Imaizumi observó que la deformación provocada por el paso de la burbuja desaparece casi en su totalidad pasado un tiempo (figura 5.b), y asegura que la estela negativa se debe a la liberación de la energía elástica generada por la tensión de corte de la burbuja sobre el material viscoelástico. Encontró que la intensidad de la estela negativa es función de la forma y tamaño de las burbujas (figura 5.a); las burbujas de menor tamaño y de forma elongada generan una estela negativa de menor intensidad y longitud, mientras que las burbujas de mayor tamaño y de forma aplanada provocan una estela negativa de mayor intensidad.

Frank y Li [12] lograron reproducir mediante modelos computacionales, el fenómeno de la estela negativa para el caso de burbujas y esferas solidas que ascienden a través de un medio viscoelástico, partiendo de la ecuación de movimiento:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \Gamma$$

Dónde:

$$\Gamma^{eq} = \frac{1}{Re} D$$

$$D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Finalmente obtuvieron el siguiente modelo:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\frac{1}{De} (\Gamma - \Gamma^{eq})$$

El número de Deborah se define como  $De = \frac{\lambda u}{d}$  y Reynolds como  $Re = \frac{\rho d u}{\mu}$ , donde  $u$  representa la velocidad de ascenso de la esfera con diámetro  $d$  a través de un fluido con viscosidad  $\mu$ , densidad  $\rho$  y tiempo característico  $\lambda$ .

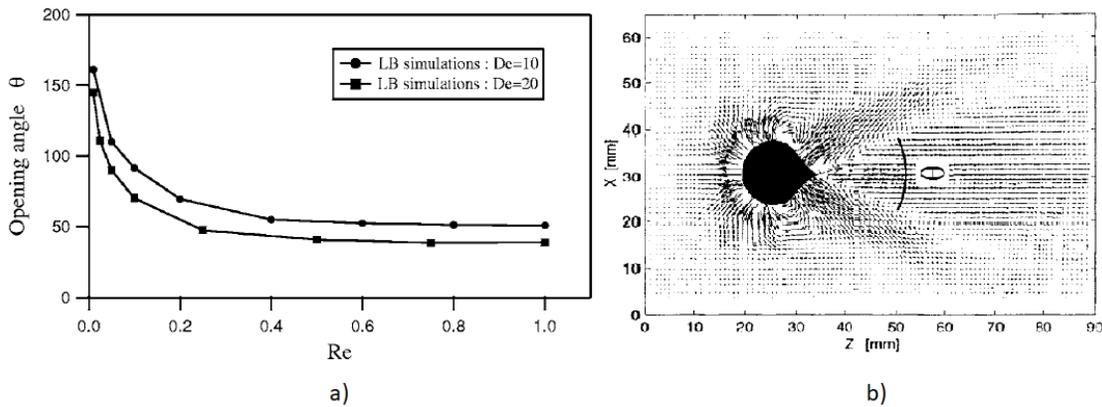


Figura 6. Resultados obtenidos por Frank y Li mediante métodos computacionales, a) Ángulo de apertura de la estela negativa en función de Reynolds, b) Ilustración gráfica del ángulo de apertura [12].

Con ayuda del modelo computacional y los resultados experimentales, Frank y Li concluyeron que el ángulo de apertura del cono de la Zona 2 de la estela negativa, es función del número de Reynolds y en menor medida del número de Deborah (figura 6); el ángulo de apertura será cercano a los 180 grados para valores de Reynolds bajos y disminuirá de forma asintótica conforme Reynolds aumente.

### 1.3 Gotas Newtonianas a Través de Medios Viscoelásticos.

Las gotas Newtonianas que descienden a través de un medio continuo viscoelástico adoptarán forma esférica, oblata o prolata [13], la forma de la gota dependerá de los valores de Reynolds y Eotvos (figura 7):

- Esférica. Para  $0.1 < Eo < 1$  y  $Re < 20$ ,
- Oblata. Para  $0.1 < Eo < 1$  y  $Re > 20$
- Prolata. Para  $10 < Eo < 100$

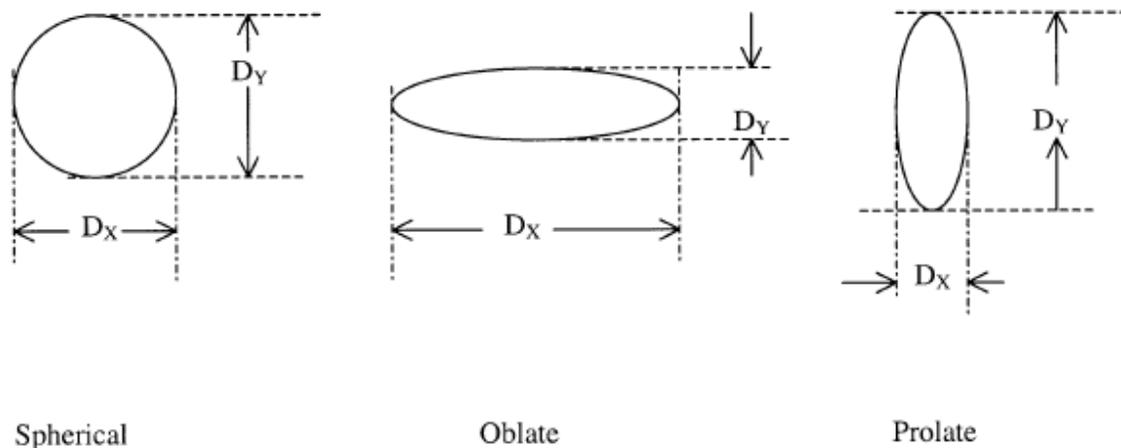


Figura 7. Caracterización de la forma gota [13]

Por otro lado, se ha observado que las gotas de fluido Newtoniano que ascienden a través de un fluido viscoelástico, adoptarán forma esférica o de lágrima siempre que su volumen sea menor a un volumen crítico; si el volumen crítico es superado las gotas desprenderán material mediante una estela de gotas satélite [14].

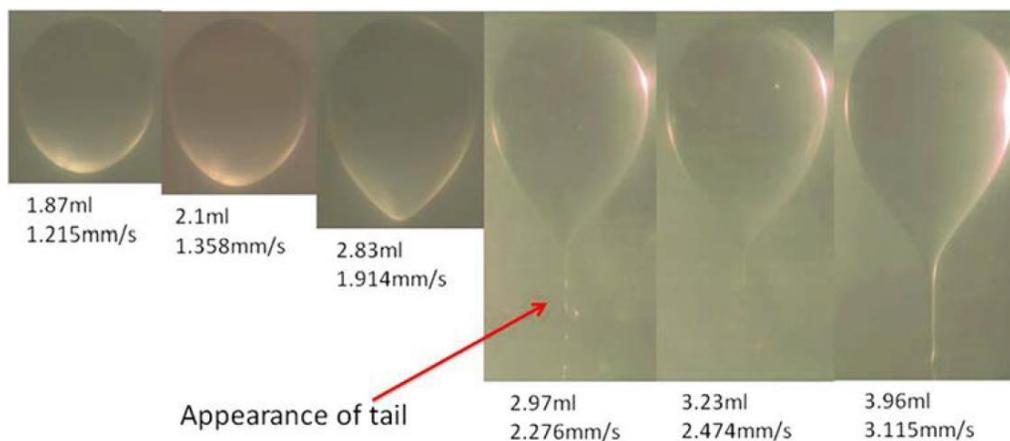


Figura 8. Gotas Newtonianas de diferentes volúmenes, en las que se puede apreciar la aparición de una cola que libera material en forma de gotas satélite al superar el volumen crítico de 2.9 [ml] [14].

## 1.4 Sedimentación de Esferas Sólidas en Medios Viscoelásticos.

En diferentes campos de la industria como el petrolero, el minero, alimenticio, etc. Es común encontrarse con procesos en los que intervienen partículas suspendidas en materiales viscoelásticos [15][16].

Estos experimentos se realizan principalmente con esferas sólidas, debido a que la mayoría de los procesos antes mencionados involucran partículas que se pueden aproximar a esta forma [17]; Existen básicamente dos configuraciones en las cuales se lanzan estas esferas:

- Dos esferas lado a lado
- Dos esferas una arriba de la otra.

Las esferas que caen lado a lado a través de un medio Newtoniano tienden a separarse si se encuentran a poca distancia sin embargo, existe una distancia crítica, que si es superada, provoca que las esferas viajen sin “enterarse” la una de la otra [16].

Por otro lado, si las esferas viajan a través de un medio viscoelástico, estas tenderán a atraerse y terminarán por colocarse una por encima de la otra (figura 9). Estos resultados se han logrado repetir de forma experimental [18] y numérica [19].

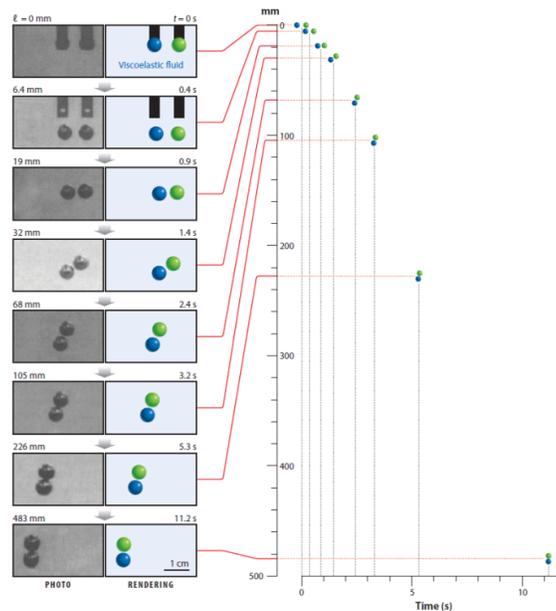


Figura 9. Evolución de esferas liberadas lado a lado a través de un medio viscoelástico [16]

Cuando dos esferas son liberadas en la configuración “una arriba de la otra” tienden a atraerse y viajar como si se tratara de un solo cuerpo, esto se ha observado para fluidos viscoelásticos adelgazantes[16] y fluidos de Boger [20].

## 1.5 Gotas Viscoelásticas a Través de Medios Newtonianos.

Sostarecz [21] sostiene que las gotas de fluido viscoelástico con volumen inferior a 0.35 [ml] que desciende a través de un medio Newtoniano adoptarán forma esférica, mientras que las gotas con un volumen superior a 0.35 [ml] presentarán un hoyuelo en su parte superior.

Este resultado fue reproducido mediante simulaciones numéricas [22], las cuales indican que las fuerzas de tensión superficial, provocan que las gotas de volúmenes pequeños tengan forma esférica. Cuando el volumen de las gotas aumenta, las tensiones viscoelásticas superan a las fuerzas de tensión superficial, lo que provoca la formación de un hoyuelo.

Si la gotas superan el volumen de 1 [ml], el hoyuelo se volverá inestable y terminará formando una cola al interior de la gota, si el volumen de la gota aumenta, la gota colapsará en su interior formando un toroide.

De acuerdo con Sostarecz, la formación de este filamento se debe a los efectos viscoelásticos de la gota y el motivo por el cual se introduce por la parte superior, se debe a los efectos de la gravedad, la cual impide que el filamento caiga por detrás de la gota (figura 10).

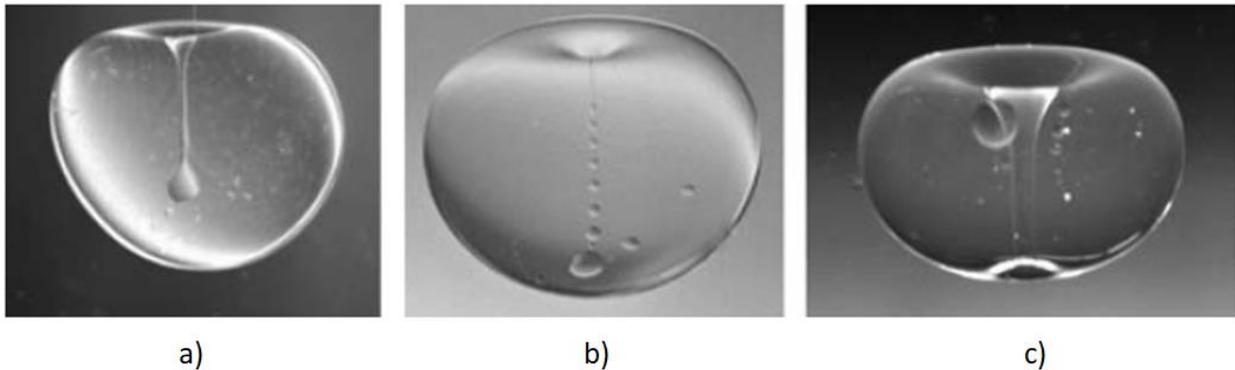


Figura 10. Formación de filamento interno en gotas viscoelásticas que descienden a través de un fluido Newtoniano a) 1.4 [ml] b) 1.5 [ml] c) 7 [ml] gota con forma de toroide [21].

Las gotas utilizadas por Sostarecz consistían en un compuesto de 0.16% Xantana en 80:20 glicerol/agua  $(\rho = 1.27 \frac{gr}{cm^3})$  y como medio continuo utilizó un aceite de polidimetilsiloxano  $(\rho = 0.98 \frac{gr}{cm^3})$ .

## 1.6 Gotas Viscoelásticas a Través de Medios Viscoelásticos.

Numerosos trabajos analizan lo que sucede cuando se aplican esfuerzos de corte sobre una gota viscoelástica en una matriz viscoelástica [23][24][25], la ruptura de gotas viscoelásticas en medios viscoelásticos [26][27] o la deformación de gotas viscoelásticas debido a flujos extensionales [28][29] sin embargo, solo existe un artículo en el cual se deja ascender y evolucionar de forma libre a una gota viscoelástica inmersa en un fluido viscoelástico [14], por lo que los resultados y fenómenos observados aun requieren mucho estudio.

Los experimentos de Ortiz consistieron en lanzar burbujas de aire, gotas de agua, aceite y material viscoelásticos a través de diferentes fluidos viscoelásticos (Polyox 5%wt y Separan AP30 0.3%) y estudiar el perfil de velocidades alrededor de las gotas y las burbujas mediante la técnica PIV. Los experimentos se dividieron en dos etapas:

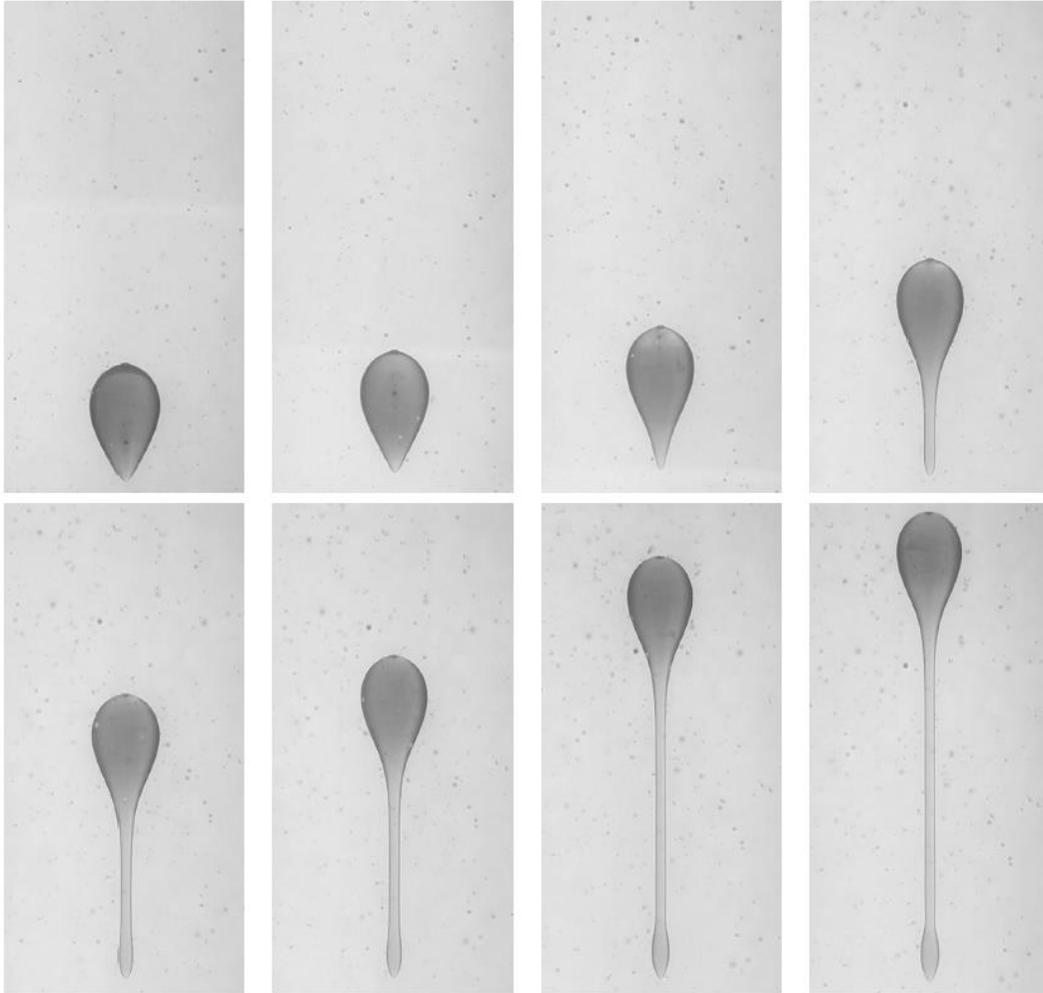
- Gotas y Burbujas Newtonianas en Fluidos Viscoelásticos

Las burbujas de aire y las gotas de agua presentaron los fenómenos de salto de velocidad y estela negativa al superar un volumen crítico [30]; debido a esto se concluyó que la estela negativa está relacionada con el salto de velocidad, cuando sucede el salto de velocidad, la estela negativa aparece.

Las gotas de aceite presentaron el fenómeno de salto de velocidad y estela negativa una vez que alcanzaron el volumen crítico sin embargo, se observó la formación de una cola, la cual desprendía material en forma de gotas satélite. Según Ortiz las gotas viscosas presentan este fenómeno siempre que superen un volumen crítico y no dejarán de presentarlo hasta que hayan liberado todo el material excedente y su volumen caiga por debajo del crítico.

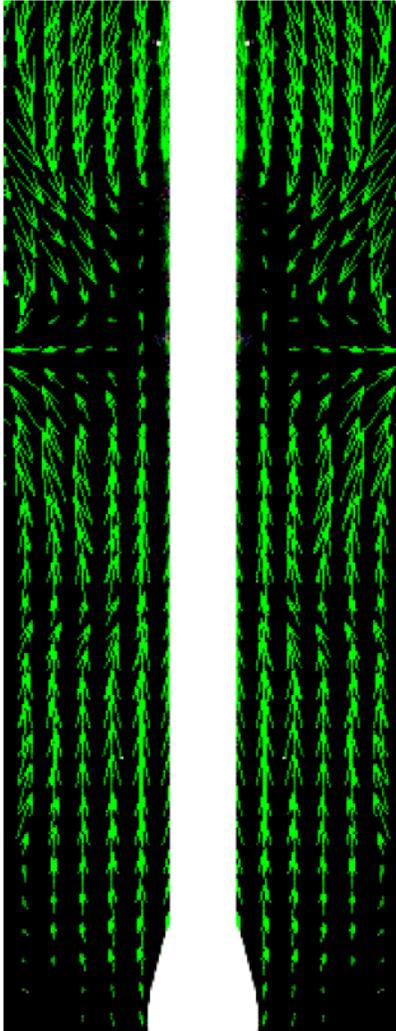
- Gotas Viscoelásticas en Fluidos Viscoelásticos

Las gotas viscoelásticas presentan una cola ovalada y resistente a la ruptura, esta cola se formará debido a los efectos de la estela negativa. La estela negativa tiende a jalar la cola en dirección opuesta al movimiento de la gota, creando así una zona de extensión uniaxial. El balance de fuerzas entre el esfuerzo elongacional y el esfuerzo cortante a lo largo de la cola, definirá si la gota se rompe o no.



*Figura 11. Evolución de una gota viscoelástica de 3 [ml] desde que es inyectada hasta su forma final elongada.*

Las mediciones realizadas por Ortiz indican que la estela negativa perderá intensidad conforme se acerca al final de la cola, para finalmente desaparecer justo antes de la ruptura. Esto se puede observar en la figura 12, donde se muestra el perfil de flujo a los costados de la cola de una gota viscoelástica.



*Figura 12. Perfil de flujo a los costados de una gota deformada, donde se aprecia un cambio en la dirección del flujo.*

Si el fluido externo es muy viscoso y altamente elástico, la zona de la cola no se romperá y será muy larga. La longitud de esta será función de las propiedades elásticas de la gota. La velocidad de ascenso de las gotas fue pequeña (menor a 1 [mm/s]), por lo que los esfuerzos inerciales son despreciables, siendo las fuerzas elásticas y viscosas las fuerzas que dominan este fenómeno.

Es importante mencionar que los experimentos conducidos por Ortiz se realizaron en un contenedor de 15x15x80 [cm], por lo que algunas gotas llegaron a la parte superior del contenedor sin romperse, por lo que no es posible saber si estas gotas alcanzarán un estado de equilibrio y viajarán como si se tratara de un cuerpo sólido o terminarán por romperse.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El experimento se realizó en un contenedor de acrílico con forma de prisma cuadrangular (dimensiones internas de 15 x 15 x 80 [cm]) relleno con un material viscoelástico, a través del cual se lanzaron gotas de material viscoelástico, gotas de líquido Newtoniano y un objeto sólido cuya forma asemeja a la de una gota deformada. Las gotas fueron lanzadas de forma individual a través de un orificio situado en el fondo y al centro del contenedor con ayuda de una bomba tipo jeringa.

Las variables de las cuales se desea conocer la influencia en la formación de cola y ruptura de las gotas son: la viscosidad del fluido externo, el volumen de la gota, el tiempo de relajación de la gota, la velocidad de ascenso de la misma y la presencia de la estela negativa.

La viscosidad del fluido externo se controló mediante la concentración de Separan AP-30, las concentraciones utilizadas fueron 3%wt y 5%wt. Para cada uno de los fluidos externos se lanzaron gotas de 1 [ml], 3 [ml] y 5 [ml] de material viscoelástico y de fluido Newtoniano.

### 2.1 Pruebas con Técnica PIV.

La técnica de visualización PIV se efectuó con un láser de la marca Evergreen de 529 [nm] y con potencia de 300 [mJ]; el láser se colocó de forma perpendicular a una de las caras del contenedor de acrílico a una distancia de aproximadamente 1.2 [m]. Así se generó un plano de luz láser alineado con el orificio a través del cual se generaron las gotas.

Las gotas fueron fotografiadas con una cámara Flow sense EO M4, la cual es capaz de tomar hasta 15 fotografías por segundo con resolución de 2048 [px] por 2048 [px]. Las cámaras se colocaron de forma perpendicular frente a una de las caras del contenedor de acrílico a una distancia de aproximadamente ochenta centímetros y de forma perpendicular al plano de luz láser; el lente utilizado es un gran angular de 16 pasos y la apertura utilizada fue el noveno paso, siempre evitando los reflejos excesivos del láser.

La cámara se colocó sobre un sistema móvil de tres ejes, el cual permitió alinear con gran precisión la cámara con la ruta de ascenso de las gotas, además de permitir el seguimiento de las gotas en algunas pruebas.

La temperatura del cuarto en el cual se realizaron las pruebas se conservó a 25 [°C] y no se utilizó ningún tipo de luz adicional a la generada por el láser. Los reflejos no deseados generados por el láser se eliminaron mediante una tela negra colocada a espaldas del contenedor en la parte opuesta a la ubicación del láser.

Se utilizaron partículas trazadoras de plata de 10 [µm] de la marca Dantec Dynamics, las cuales reflejan el haz de luz del láser. Estos reflejos fueron captados por la cámara y las imágenes obtenidas fueron analizadas mediante el software Dynamic Studio. La disposición final de todos los elementos utilizados se muestran en la figura 13, donde se puede observar de forma esquemática la naturaleza de los experimentos.

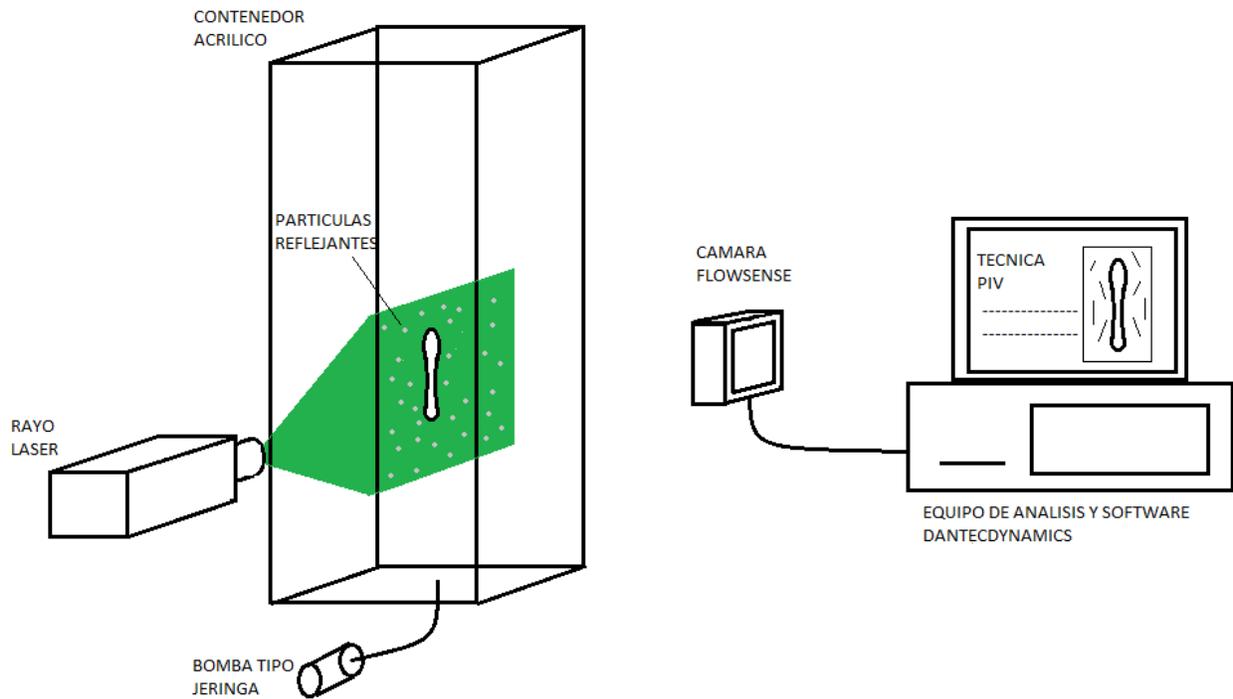


Figura 13. Configuración esquemática de los elementos utilizados durante las pruebas experimentales.

La frecuencia de muestreo fue directamente proporcional a la velocidad de ascenso de las gotas y del cuerpo sólido; las pruebas realizadas con un fluido externo altamente viscoso tuvieron frecuencias de muestro de 0.2 [Hz], mientras que las pruebas realizadas con fluido externo poco viscoso se hicieron con una frecuencia de muestreo de hasta 15 [Hz], este ajuste facilitó el análisis de las imágenes y generó resultados de mejor calidad.

## 2.2 Calibración de la Cámara.

La calibración de la cámara se realizó con una placa de calibración provista por Dantec Dynamics, la cual consiste en una placa cuadrada de 100x100 [mm] de color blanco, con un arreglo de puntos negros en bajo relieve en su parte anterior.

La parte anterior de la placa de calibración se coloca de forma perpendicular a la cámara y se alinea con la trayectoria de las gotas. Posteriormente se enfoca la cara anterior de la placa tratando de obtener una imagen clara del arreglo de puntos negros.

Finalmente se alinea el plano laser con la cara anterior de la placa, de esta forma aseguramos que el láser y la cámara estén alineados con la trayectoria de las gotas. Es importante recordar que este proceso se debe realizar disparando el láser en modo de calibración.

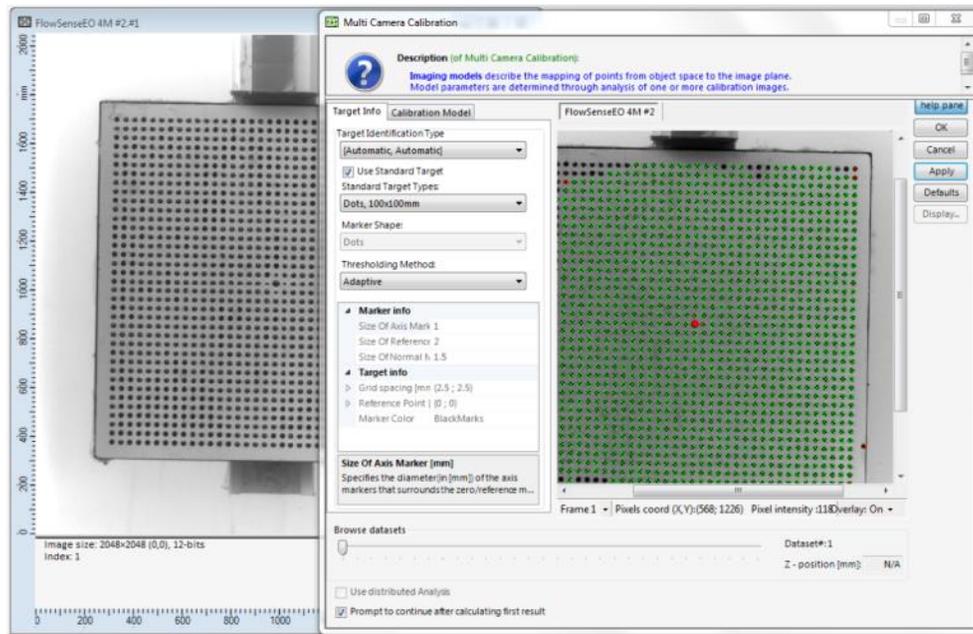


Figura 14. Calibración de la cámara mediante el sistema "multicamera calibration" incluido en la paquetería DynamicStudio.

Posterior a la calibración se toman 20 fotografías, las cuales sirven como punto de referencia para el análisis de las pruebas experimentales. En la figura 14 se muestra una captura de calibración, con la cual el software es capaz de identificar la distancia que existe entre diferentes puntos de la imagen, utilizando como referencia los puntos negros que se encuentran en la placa de calibración.

## 2.3 Composición y Elaboración de los Fluidos.

El proceso de elaboración de los fluidos experimentales es crucial para el correcto desarrollo de las pruebas; la mezcla de los materiales que conforman los fluidos se debe realizar considerando diferentes factores como el tiempo de mezcla, el orden en que se agregan los ingredientes, etc.

Los fluidos externos (a los que llamaremos Flex) consisten en una solución polimérica conformada por agua y poliacrilamida. Los Flexs se elaboraron vertiendo la poliacrilamida en el agua de forma paulatina. Para evitar la formación de grumos (los cuales son difíciles de disolver y remover) el agua se debe mantener en constante movimiento mientras se vierte la poliacrilamida. La solución se mezcló durante 7 horas y finalmente se dejó reposar durante 3 días; con este proceso se aseguró la homogeneidad de los fluidos externos.

Las gotas viscoelásticas consistieron en una mezcla de poli-isobutileno, decalina y aceite de polibuteno. La mezcla se elaboró cortando el poli-isobutileno en pequeños trozos, los cuales se disolvieron en decalina haciendo uso de una mezcladora de rodillos (la cual giraba a 5 [rpm]). Una vez disuelto el poli-isobutileno se agregó el aceite de polibuteno; esta mezcla se revolvió durante 5 días.

Tabla 1 Composición de los fluidos utilizados en las pruebas experimentales

<i>FLUIDO</i>	<i>COMPONENTES</i>	<i>PORCENTAJE</i>
<i>Flex 1</i>	Poliacrilamida	3 % wt
	Agua	97 % wt
<i>Flex 2</i>	Poliacrilamida	5 % wt
	Agua	95 % wt
<i>Flex Newtoniano</i>	Miel Karo	No aplica
	Poli-isobutileno	5 % wt
<i>S1A</i>	Decalina	46.3 % wt
	Aceite de polibuteno	48.7 % wt
<i>Aceite</i>	SAE 80W-90	No aplica

En la tabla 1 se muestran los materiales que conforman los líquidos utilizados durante los experimentos. Las propiedades físicas y químicas de los ingredientes, así como la compañía que los provee se presentan a continuación:

- Poli-isobutileno: Marca Sigma-Aldrich; Mw aprox. 1,000,000, Mn aprox. 600,000, Mv aprox. 1,200,000, densidad  $0.92 \left[ \frac{g}{ml} \right]$
- Aceite de Polibuteno: Marca Sigma-Aldrich; Mw 920, viscosidad 200–250 [cSt] en condiciones estándar, densidad  $0.89 \left[ \frac{g}{ml} \right]$
- Decalina: Sigma-Aldrich; Mn approx. 138.25, density  $0.896 \left[ \frac{g}{ml} \right]$
- Poliacrilamida: Marca Wuhan Luoke Fine Chemicals Co; Separan AP-30; Mw 71.08  $\left[ \frac{g}{mol} \right]$
- Aceite para motor SAE 80W-90: Marca Quaker State, viscosidad 0.225 [P], densidad  $0.962 \left[ \frac{g}{ml} \right]$
- Miel Karo (bebé): Marca Karo, viscosidad 2.5 [P], densidad  $1.31 \left[ \frac{g}{ml} \right]$

## 2.4 Caracterización de Fluidos.

Las pruebas reométricas se realizaron en un reómetro LS-ARES de deformación controlada de TA Instruments. Se hicieron mediciones de flujo cortante simple y flujo oscilatorio; todas las pruebas se realizaron a 25[°C].

Los resultados de las pruebas de flujo cortante simple se muestran en la figura 15, las cuales se hicieron con una geometría tipo Couette. Las figuras 16, 17 y 18 muestran los resultados de las pruebas oscilatorias, estas pruebas se realizaron con geometría de cono y plato de 6 [mm] y ángulo de 2[°].

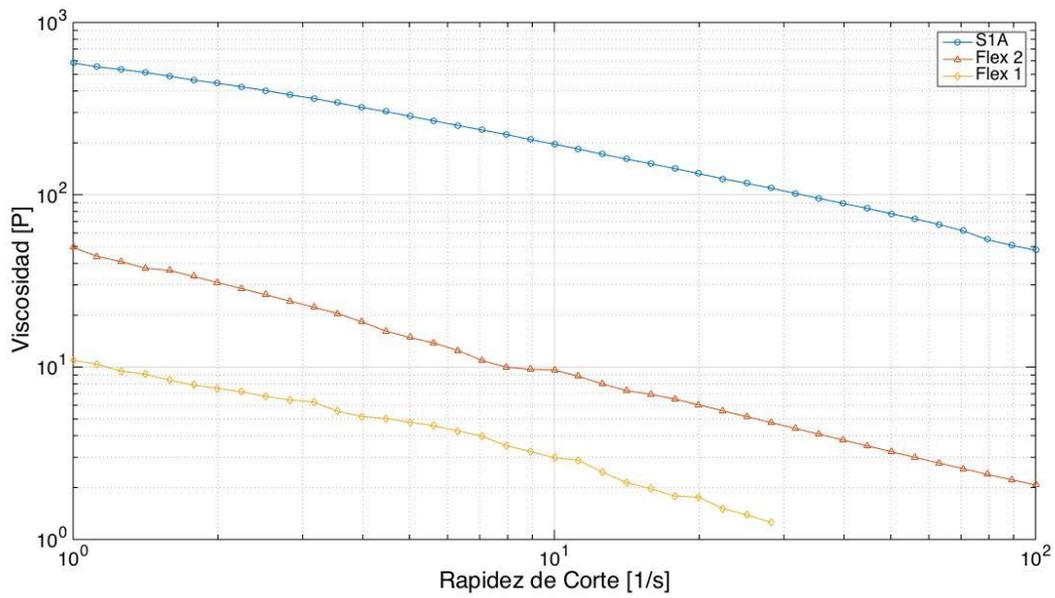


Figura 15. Viscosidad vs Rapidez de corte para los fluidos S1A, Flex1 (poliacrilamida 3% wt), Flex 2 (poliacrilamida 5% wt).

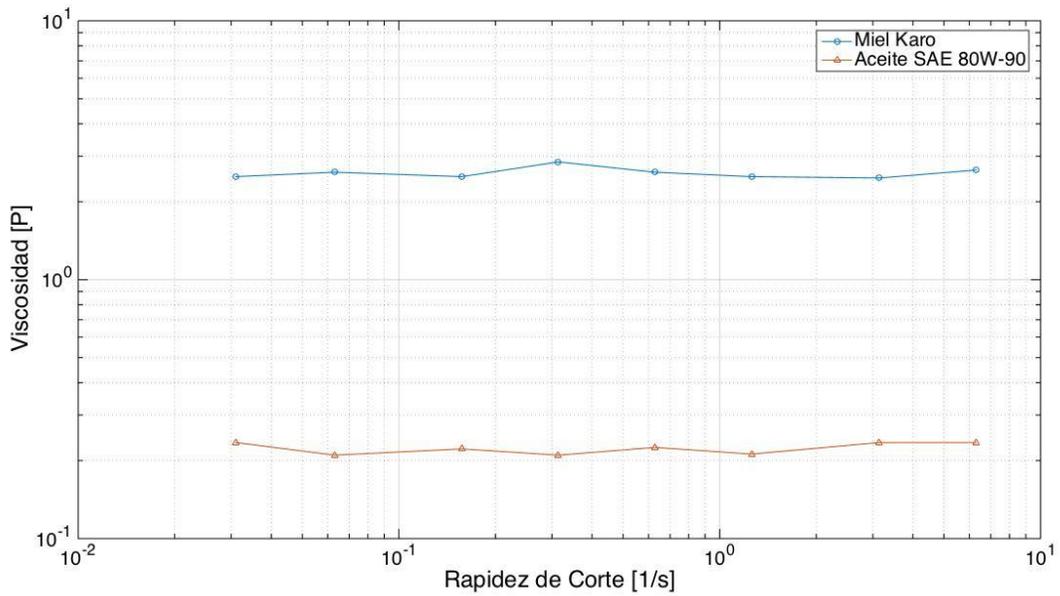


Figura 16. Viscosidad vs Rapidez de corte del aceite SAE 80W-90 y la Miel karo (Fluidos Newtonianos).

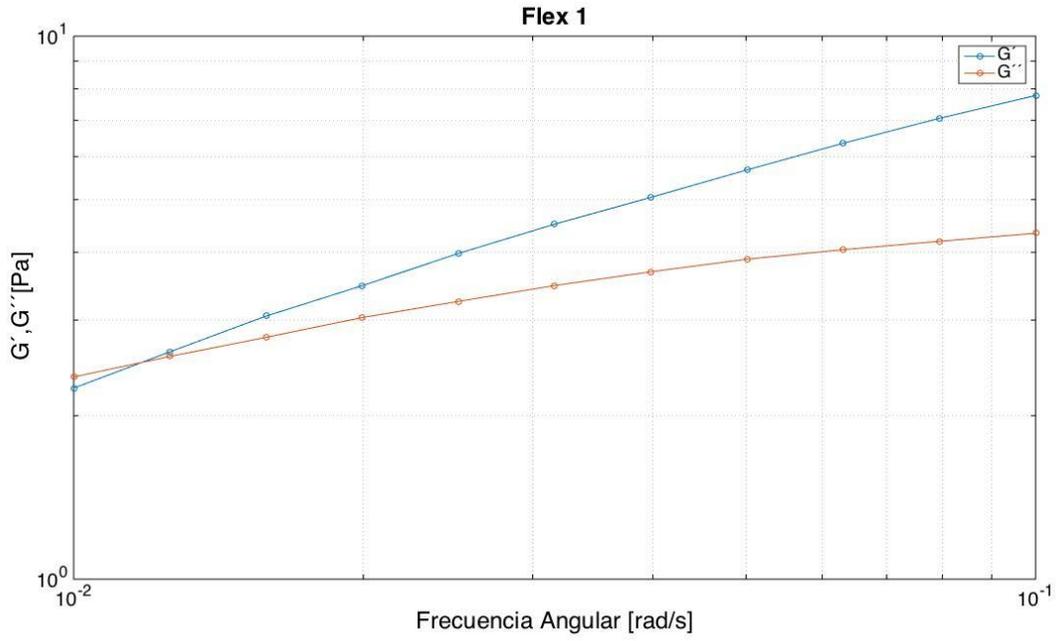


Figura 17. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del Flex 1.

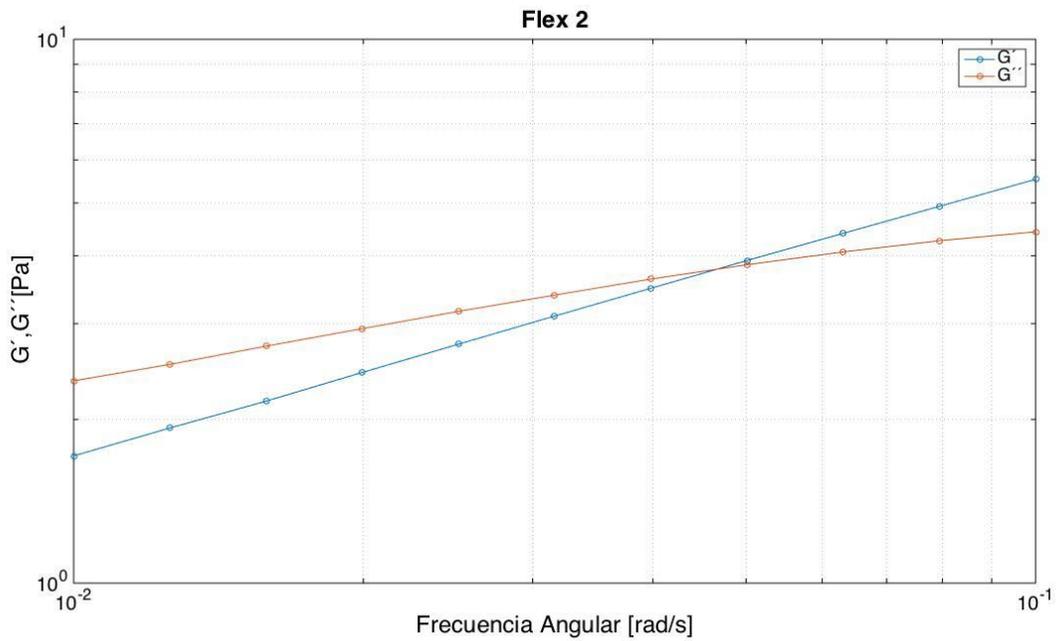


Figura 18. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del Flex 2.

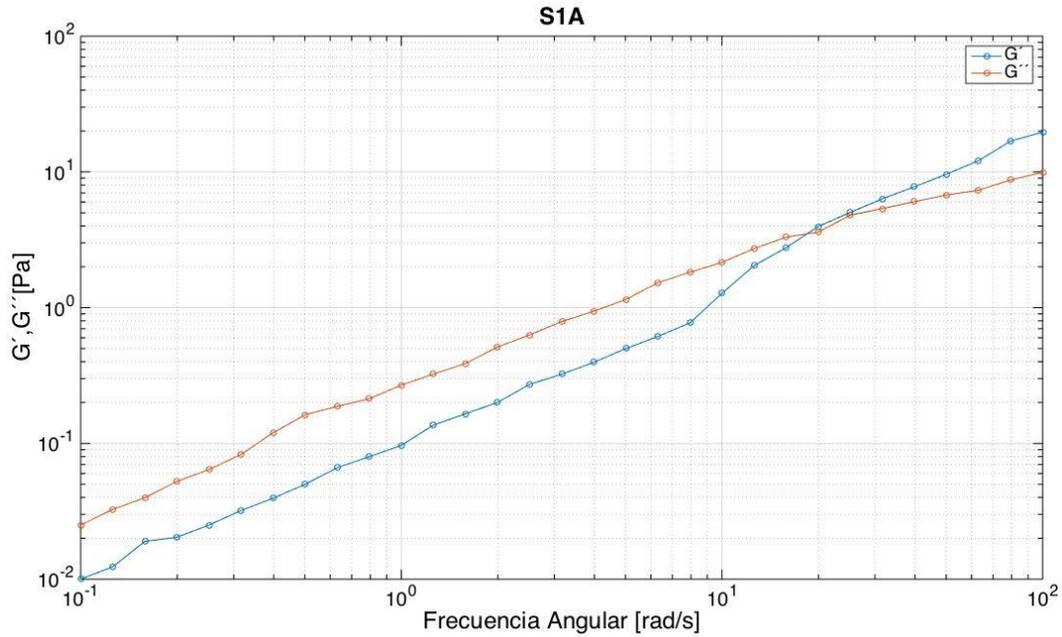


Figura 19. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del fluido S1A.

En la tabla 2 se presentan la densidad y tiempo de relajación de los fluidos, es importante destacar que la diferencia de densidades entre el Flex 1 y el Flex 2 es poca, por lo que los cambios en los experimentos se deberán a la diferencia de viscosidades y propiedades viscoelásticas.

Tabla 2. Densidad y tiempo de relajación de fluidos utilizados en las pruebas experimentales.

Fluido	Densidad [g/ml]	Tiempo de relajación [s]
Flex 1	0.997	0.097
Flex 2	0.992	0.142
Flex Newtoniano	1.353	No aplica
S1A	0.903	13.09
Aceite	0.926	No Aplica

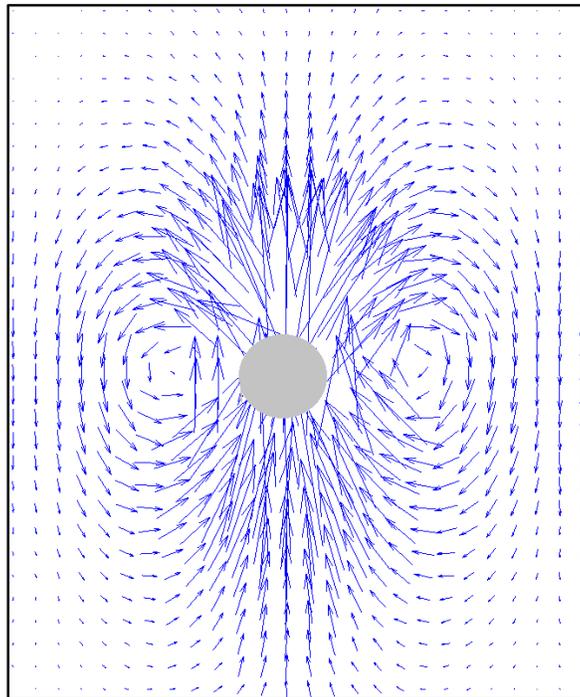
### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Gotas Newtonianas.

El desplazamiento de una gota Newtoniana a través de un fluido Newtoniano es bien conocido y entendido; existen ecuaciones que predicen la velocidad terminal de la gota en función de las densidades de los fluidos, el diámetro de la gota y la viscosidad del fluido externo[31], también se conoce la forma que esta gota adquirirá a partir de su número de Reynolds [32][33][34].

##### 3.1.1 Gotas Newtonianas a Través de Medios Newtonianos.

Se lanzaron gotas del aceite SAE 80W-90 de tres volúmenes diferentes (1 [ml], 3 [ml] y 5 [ml]) a través de un medio continuo Newtoniano; en todos los casos las gotas adquirieron una forma esférica ligeramente achatada en los polos, el perfil de flujo alrededor de ellas es el típico observado para esferas viajando a través de medios Newtonianos.



*Figura 20. Perfil de flujo alrededor de una gota Newtoniana de 5 [ml] a través de un medio Newtoniano, la gota se representa en color gris. Se observa el típico perfil de flujo para gotas Newtonianas esféricas o cuerpos rígidos esféricos que se desplazan a través de un medio Newtoniano.*

### 3.1.2 Gotas Newtonianas a Través de Medios Viscoelásticos.

Las gotas Newtonianas de 1[ml] lanzadas a través del Flex 1 adquirieron forma de lagrimea con una cola muy fina, la cual desprende material en forma de gotas satélite. Las gotas de 3 [ml] y 5 [ml] presentaron una cola larga y ancha, la cual se rompe en grandes gotas que liberan material en forma de gotas satélite. Todas las gotas Newtonianas lanzadas a través del Flex 1 presentaron estela negativa en su perfil de flujo (figura 21).

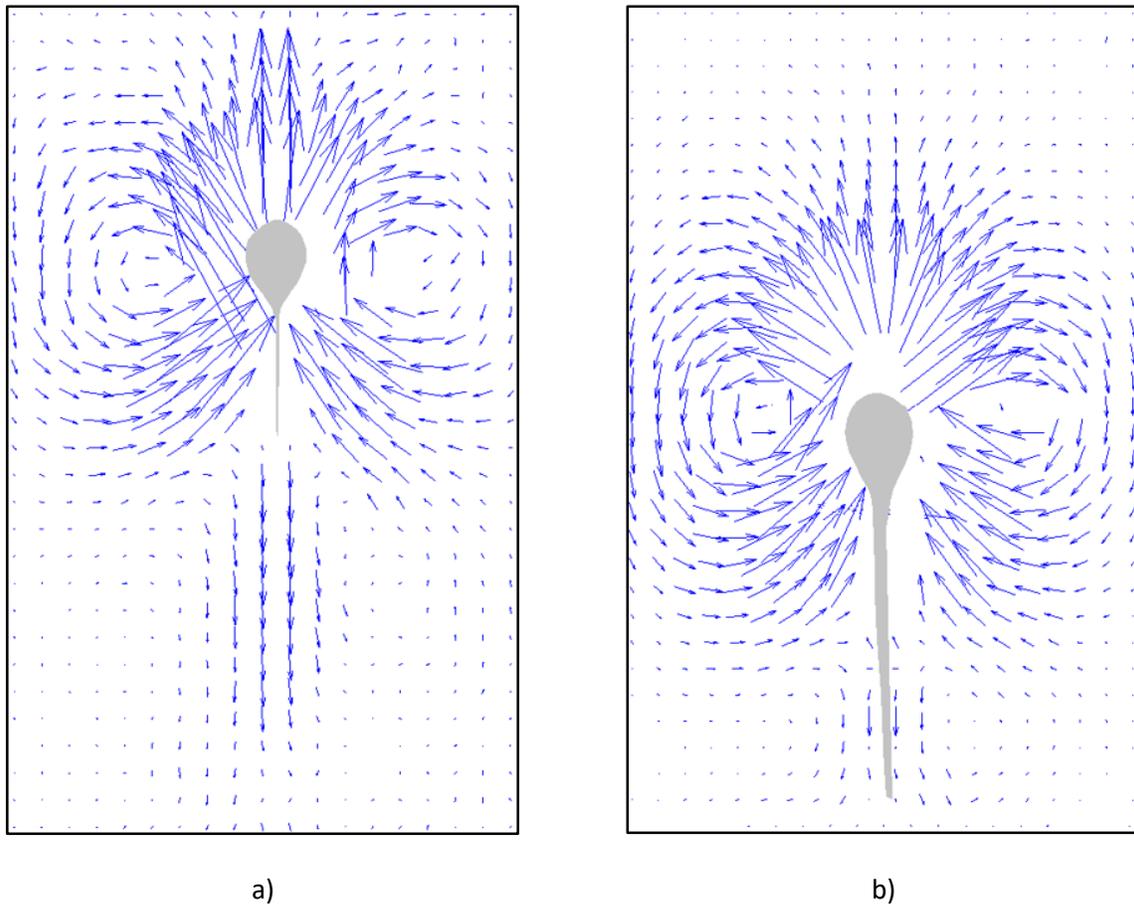


Figura 21. Perfil de flujo alrededor de gotas Newtonianas que ascienden a través de Flex 1 a) gota de 1 [ml] de aceite de motor b) gota de 5 [ml] de aceite de motor.

Las gotas de aceite lanzadas a través del Flex 2 adquirieron una forma muy similar a las gotas lanzadas en el Flex 1 sin embargo, ninguna de ellas presentó en su perfil de flujo estela negativa.

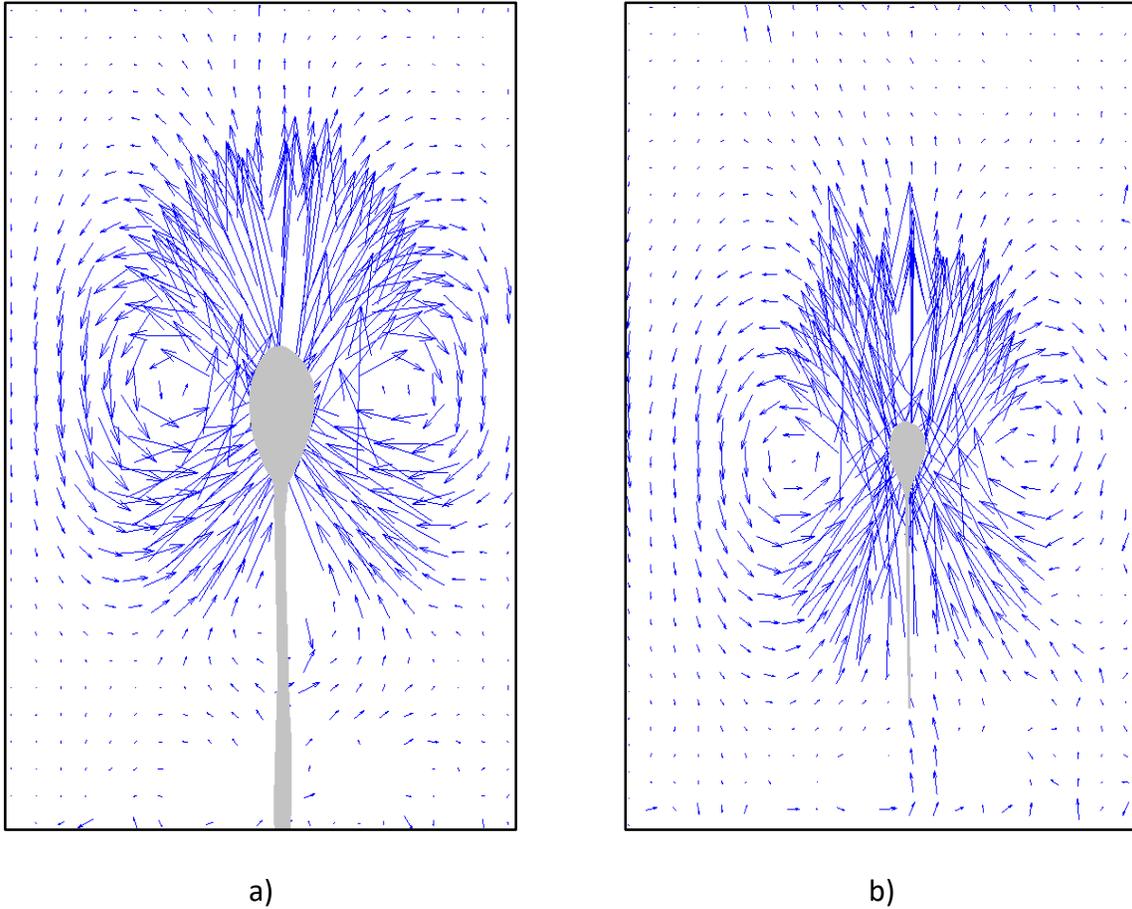


Figura 22. Perfil de flujo alrededor de gotas Newtonianas a través del Flex 2 a) gota de 3 [ml] de aceite de motor b) gota de 1 [ml] de aceite de motor. En ninguno de los casos es posible observar estela negativa.

En la figura 22 se muestra el perfil de flujo de dos gotas de aceite que ascienden a través del Flex 2, en las que se observa la ausencia de la estela negativa. Es importante notar que el diámetro de la cola de las gotas lanzadas a través del Flex2, es mayor al diámetro de las colas de las burbujas lanzadas en el Flex1 (tabla 3). Las medidas del diámetro se tomaron a dos centímetros de distancia de la base de la cabeza.

Tabla 3. Diámetro de la cola de las gotas de aceite que se desplazan a través de los fluidos viscoelásticos Flex 1 y Flex 2.

Volumen Gota [ml]	$\varnothing_{Flex1}$ [mm]	$\varnothing_{Flex2}$ [mm]
1	0.92	1.12
3	1.43	1.99
5	1.96	2.23

### 3.2 Cuerpo Sólido.

Se lanzó un cuerpo sólido cuya forma asemeja al de una gota deformada a través de tres fluidos diferentes, se midió la velocidad terminal de ascenso del cuerpo sólido y se visualizó su perfil de flujo mediante la técnica PIV.

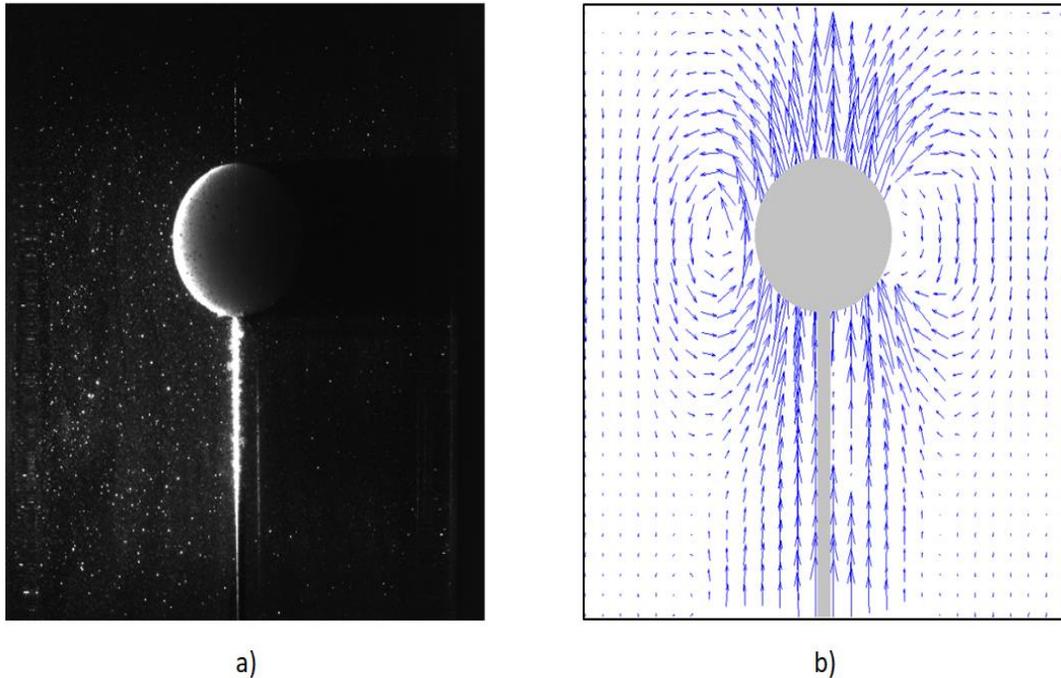


Figura 23. Técnica de visualización PIV utilizada para medir la velocidad del cuerpo sólido y el perfil de flujo a su alrededor a) fotografía típica obtenida mediante técnica PIV b) perfil de flujo alrededor de la gota sólida, la cual se muestra en color gris.

Debido a que la densidad de la gota sólida es mayor que la de los fluidos viscoelásticos, no fue posible realizar una prueba ascendente de la gota sólida en estos sin embargo, como los efectos de la gravedad no influyen en la forma de la gota, es posible comparar los resultados ascendentes con los descendentes.

Para todos los casos se encontró que el perfil del flujo en la cabeza, es similar al reportado para esferas sólidas que se desplazan a través de un fluido Newtoniano, este tipo de perfil se puede observar en la figura 23.

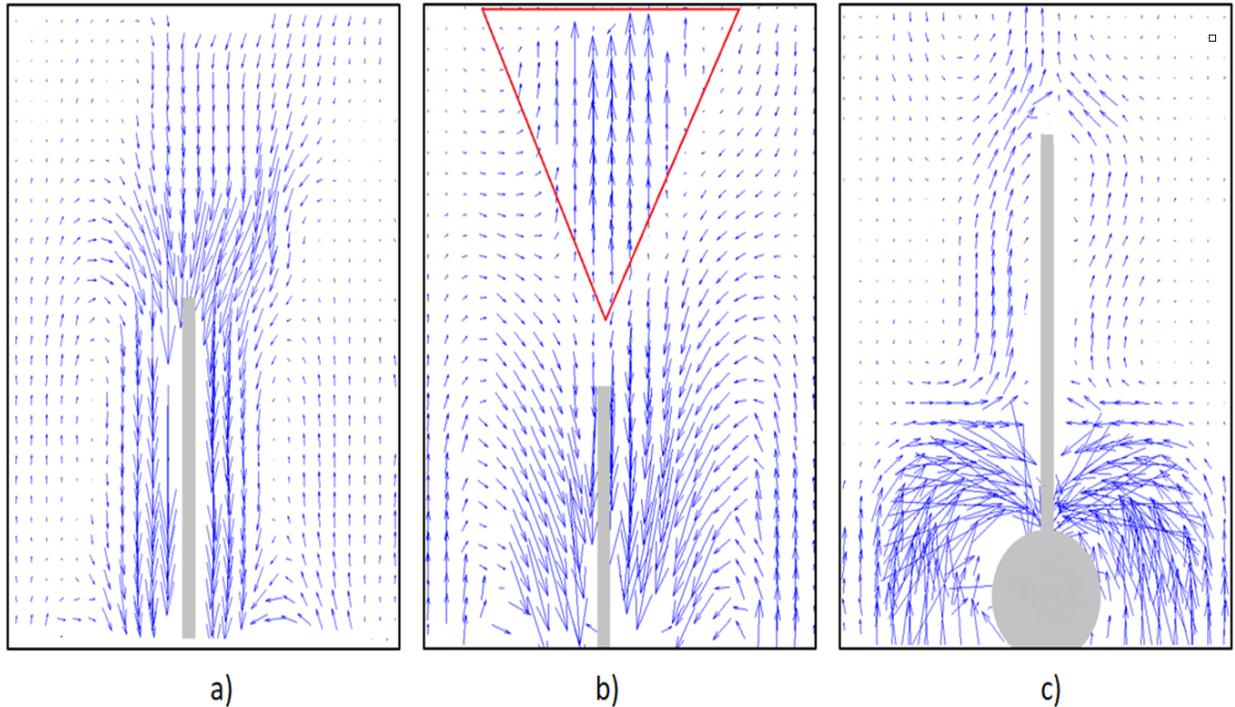


Figura 24. Perfil de flujo alrededor del cuerpo sólido en tres fluidos externos diferentes a) fluido externo Newtoniano b) fluido externo 1 No-Newtoniano donde resalta la presencia de la estela negativa (enmarcada en rojo) c) Fluido externo 2 No-Newtoniano

La figura 24 muestra los resultados obtenidos para cada uno de los fluidos externos:

- Fluido Externo Newtoniano: Se aprecia un flujo en el sentido del movimiento de la gota a los costados y después de la cola.
- Flex 1: Se encontró un flujo en la dirección del sólido a los costados de la cola, seguido por una estela negativa (enmarcada en color rojo en la figura 24.b)
- Flex 2: Se muestra una estela negativa (con todas sus zonas características) desplazada espacialmente sobre los costados de la gota, seguida por una zona de convergencia de dos flujos, estas zonas se muestran en la figura 24.c y son las siguientes:
  - Zona Aguas Arriba (zona roja)
  - Punto de Estancamiento (zona verde)
  - Zona Aguas Abajo (estela negativa) (zona purpura)
  - Zona de convergencia (zona café)

Las pruebas realizadas con el cuerpo sólido sientan las bases de lo que podemos esperar en los experimentos con las gotas viscoelásticas.

### 3.3 Gotas Viscoelásticas.

Debido a que los experimentos con las gotas viscoelásticas son el tema principal de este trabajo, esta sección se divide en tres partes en las que se explica con detalle el comportamiento de las gotas viscoelásticas a través de un fluido externo Newtoniano y dos fluidos viscoelásticos. Se describe además la evolución del perfil del flujo alrededor de una gota desde su forma inicial de lagrima hasta su forma final elongada.

#### 3.3.1 Fluido Exterior Newtoniano.

Las gotas de fluido S1A lanzadas a través del fluido Newtoniano presentaron una cola larga y resistente a la ruptura, con un final inestable que libera pequeñas gotas de material, además de un ascenso oscilatorio el cual dificultó su análisis mediante la técnica PIV.

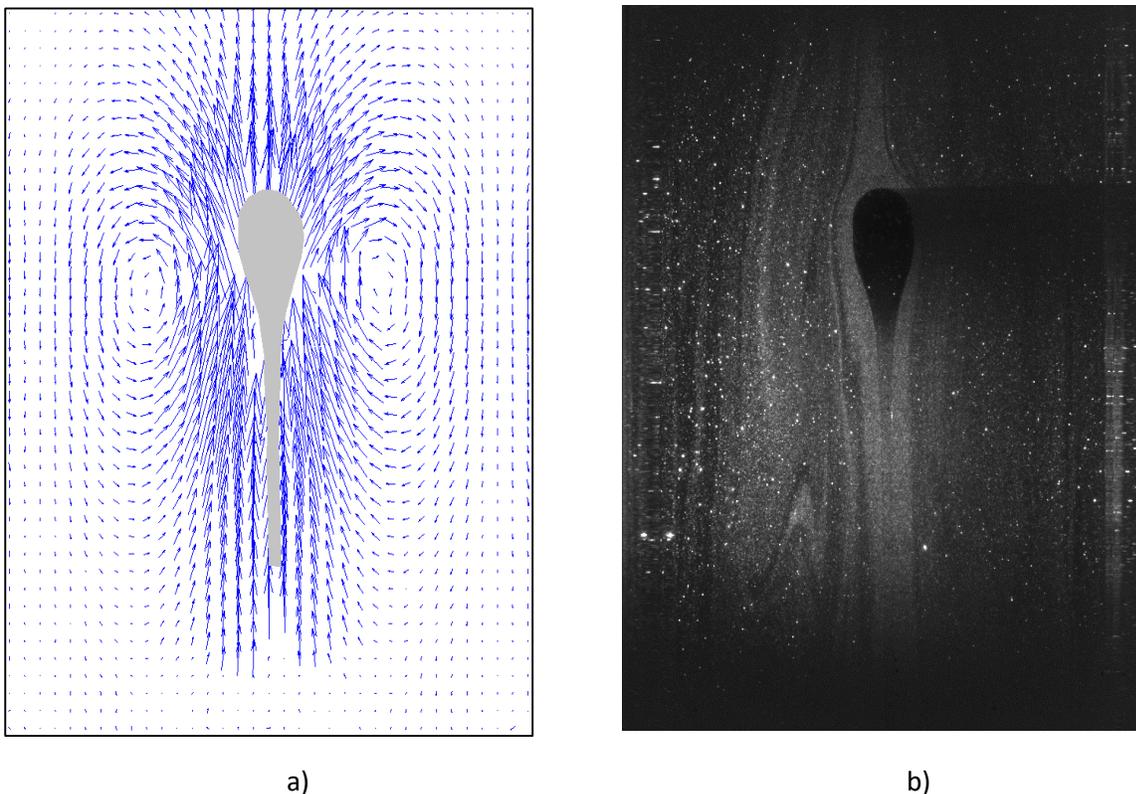
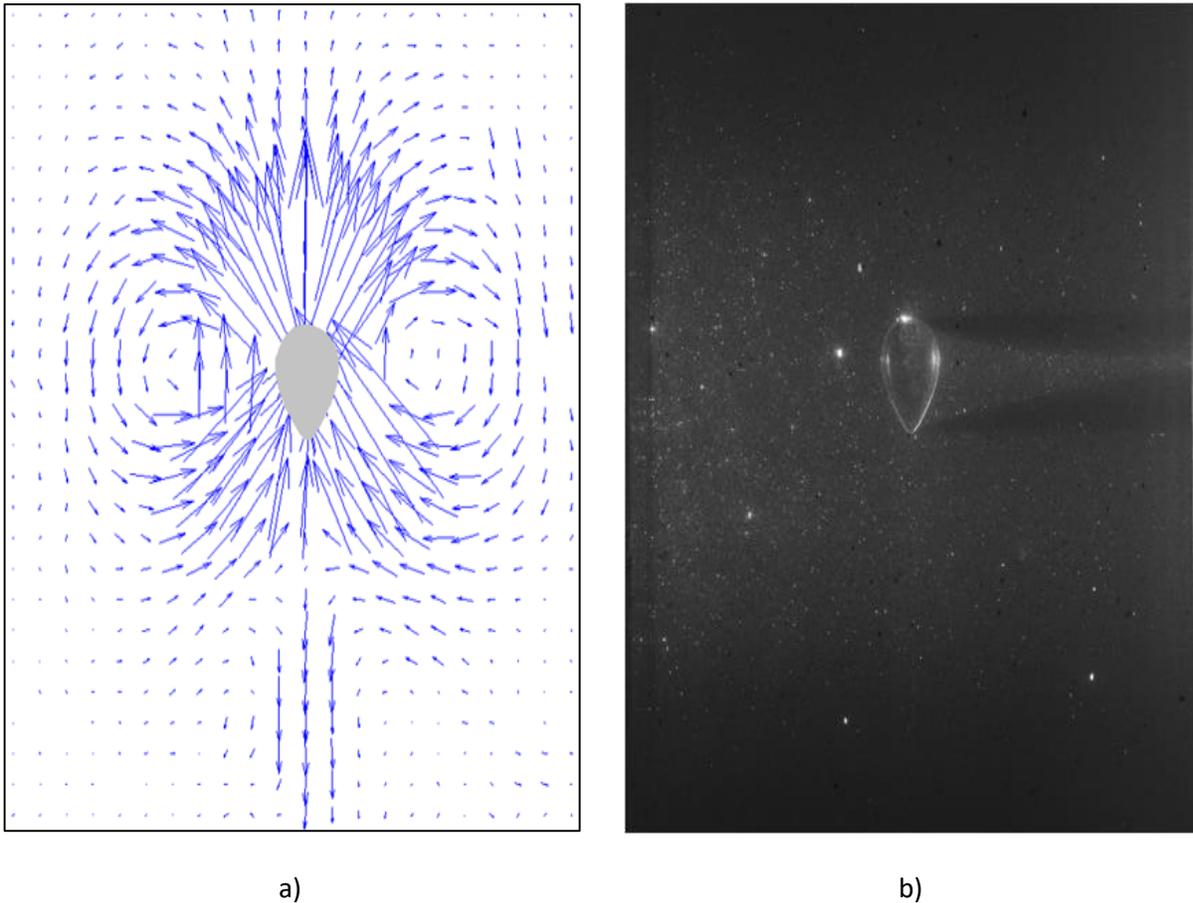


Figura 25. Gota viscoelástica en un fluido Newtoniano a) perfil de flujo alrededor de la gota b) gota viscoelástica de 5 [ml]

La figura 25 muestra una gota 5 [ml] de fluido viscoelástico la cual presenta una cola larga y ancha que parece desvanecerse (esto se debe a los cambios de trayectoria de la gota, los cuales provocan que la cola escape del plano láser). El perfil de flujo es muy similar al presentado por el cuerpo sólido, donde se observa un flujo ascendente a los costados de la cola de la gota.

### 3.3.2 Flex 1.

Las gotas de fluido viscoelástico lanzadas a través del Flex 1 presentaron dos comportamientos diferentes en función de su volumen. Las gotas de 1 [ml] adquirieron forma de lágrima y conservaron esta forma durante todo su trayecto. El perfil de flujo se muestra en la figura 26, donde resalta la presencia de la estela negativa con todas sus zonas características; este perfil de flujo es clásico en burbujas con forma de lágrima que se desplazan a través de fluidos viscoelásticos adelgazantes.



*Figura 26. Gota No-Newtoniana de 1 [ml] con forma de lágrima a) perfil de flujo donde se observan las zonas características de la estela negativa b) gota No-Newtoniana con forma de lágrima la cual no sufre deformación en todo su trayecto a pesar de la presencia de la estela negativa.*

Las gotas de 3 [ml] y 5 [ml] sufrieron cambios en su forma a lo largo del trayecto, comenzando con forma de lágrima para después mostrar una cola chata, la cual se estira para finalmente romperse en gotas de diferentes volúmenes. Debido a que no fue posible abarcar toda la gota en

una sola imagen, se muestra el perfil de flujo de las gotas deformadas en 2 secciones, las cuales llamaremos cabeza y cola.

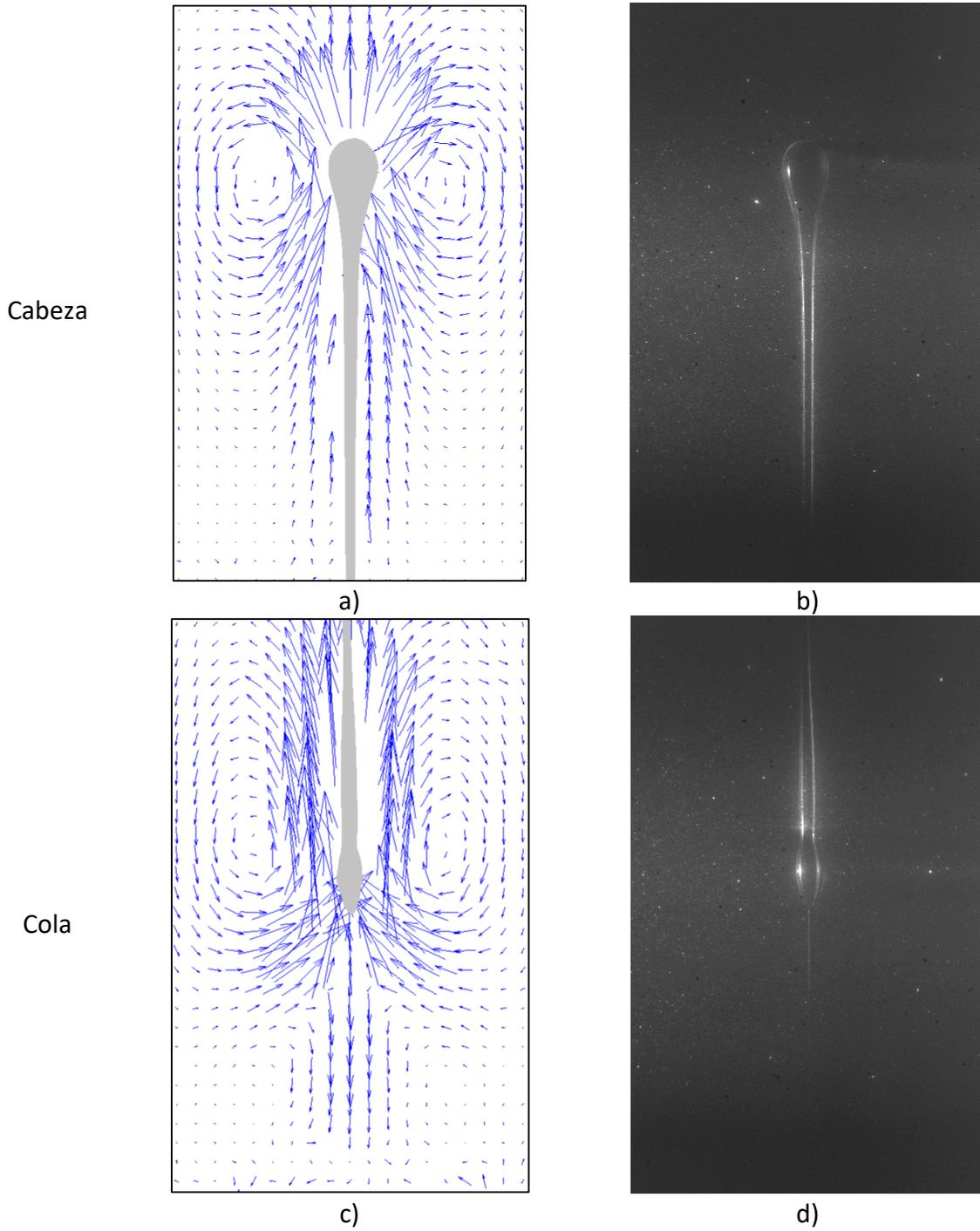


Figura 27. Gota de fluido S1A de 3 [ml] en la que se observa el perfil de flujo alrededor de la cabeza y de la cola, para el caso de la cabeza se muestra el perfil esfera seguido de un flujo ascendente a los costados del cuerpo de la cola mientras que en la cola se observa un flujo ascendente a los costados de la cola seguido por una estela negativa.

En la figura 27 se muestra el perfil de flujo alrededor de una gota viscoelástica deformada. En la cabeza podemos apreciar el perfil típico de esferas sólidas que se desplazan a través de un fluido viscoelástico. En los costados de la cola se observa un flujo aguas arriba, el cual comienza justo por debajo de la cabeza y termina unos centímetros por debajo de la cola. Después de la cola se observa un cambio en el sentido del flujo (estela negativa); este resultado es inesperado ya que no se asemeja al presentado por el cuerpo sólido ni por las gotas Newtonianas.

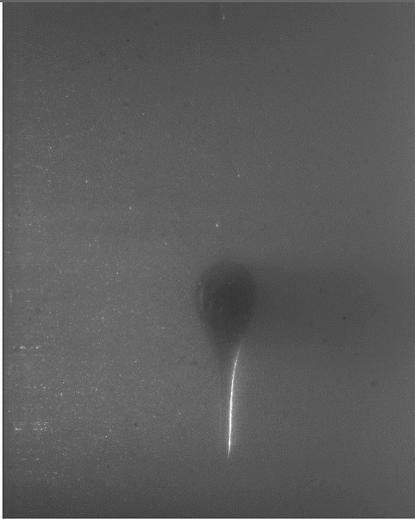
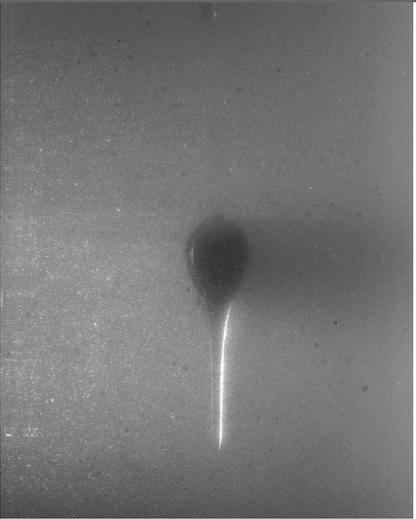
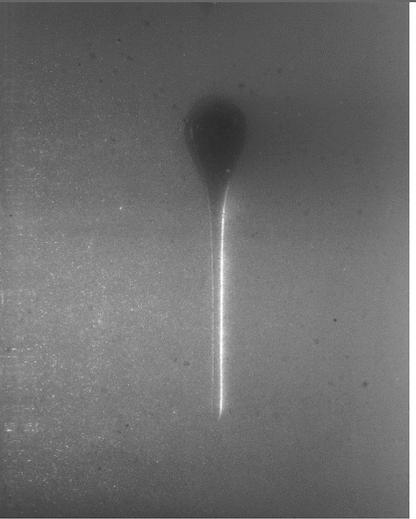
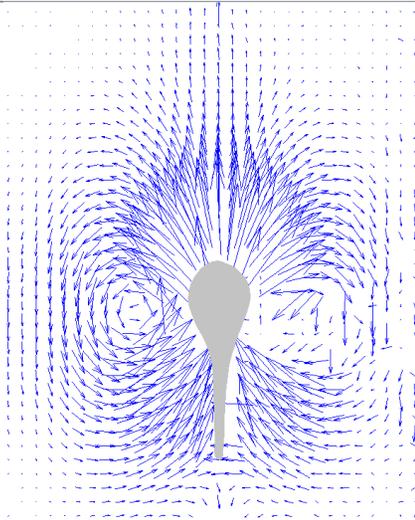
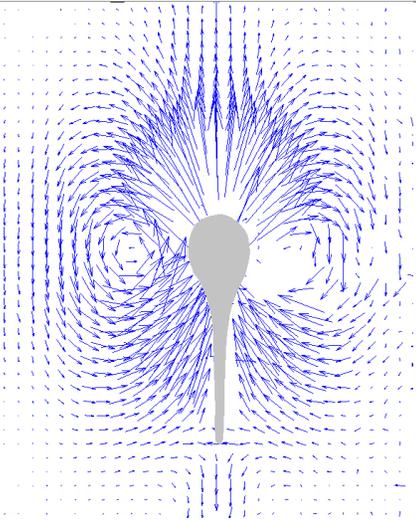
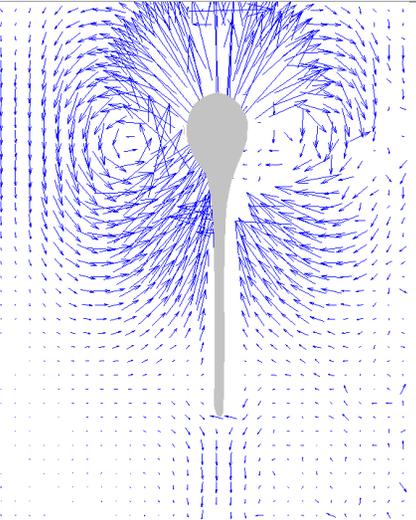
### 3.3.3 Flex 2.

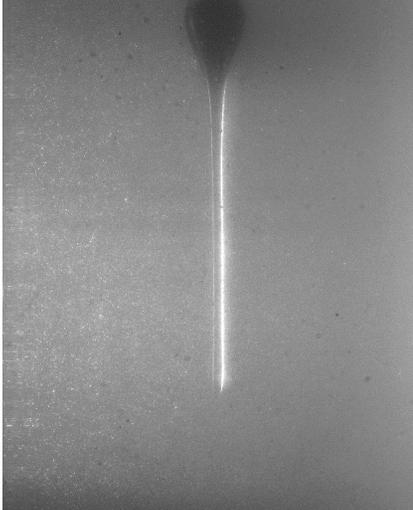
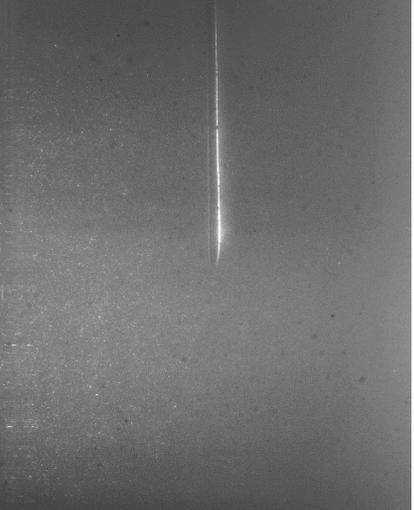
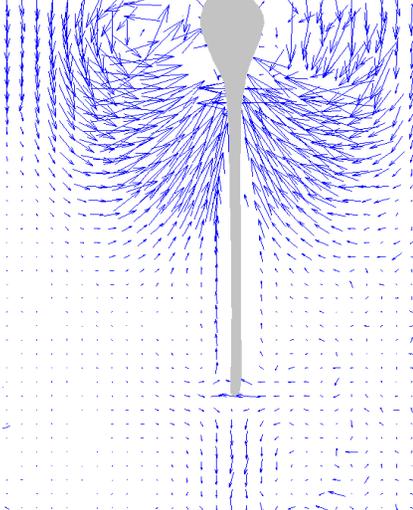
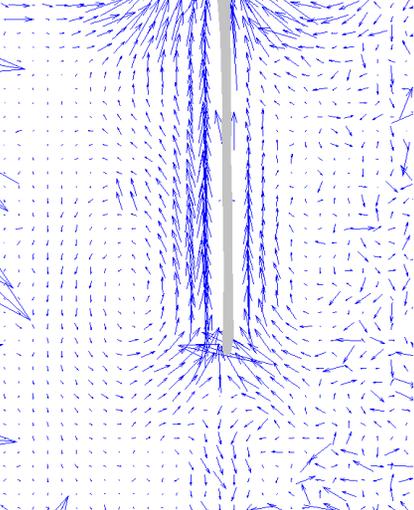
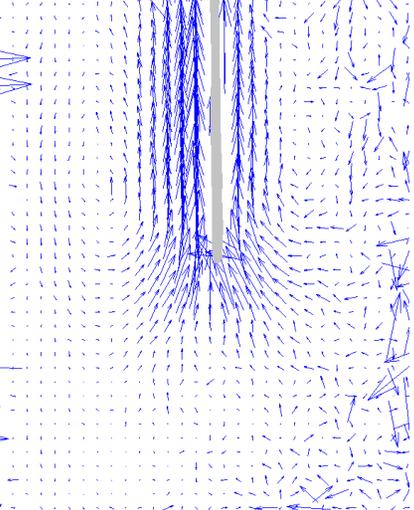
Todas las gotas de fluido viscoelástico lanzadas a través del Flex 2 presentaron una evolución en su forma a lo largo de su trayecto, iniciando con forma de lágrima y terminando con una cola larga y resistente a la ruptura.

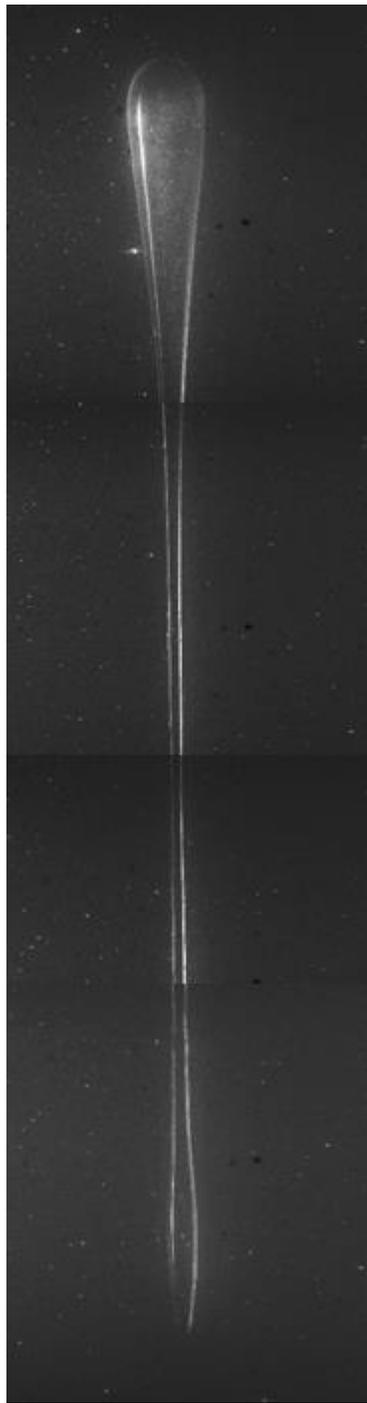
A continuación se muestra de forma detallada la evolución de una gota de 5 [ml] de fluido S1A que se desplaza a través del Flex 2, así como la evolución en su perfil de flujo.

Con los resultados mostrados hasta el momento es posible identificar dos tipos de deformaciones, a las que llamaremos de “cabeza doble” y “cabeza única”, en la figura 28 se muestran la diferencia entre este tipo de deformación.

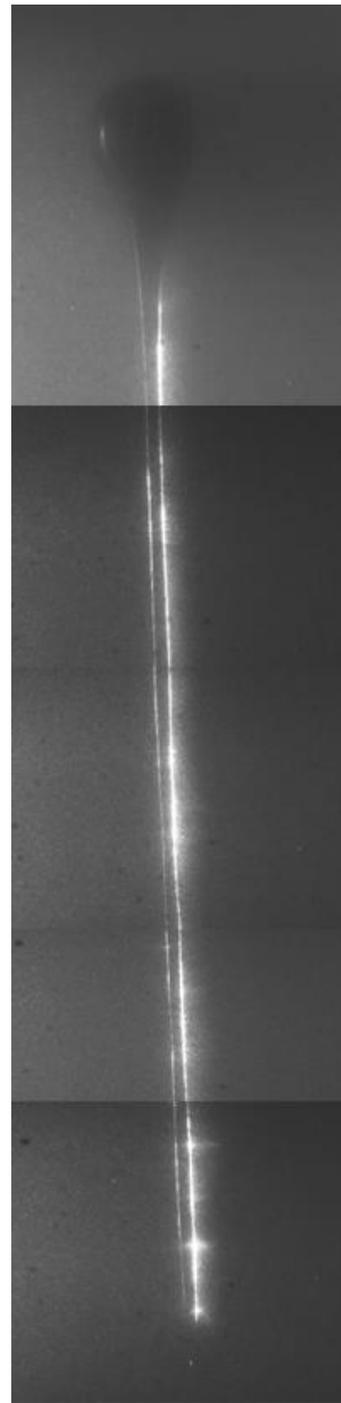
Tabla 4. Evolución del perfil de flujo alrededor de una gota No-Newtoniana de 5 [ml] en deformación.

Descripción	a) Aparición de cola, el perfil de flujo es el clásico para burbujas con forma de lágrima.	b) La forma de la gota no sufre cambios significativos sin embargo, la estela negativa adquiere intensidad.	c) La cola ha ganado algunos centímetros, el perfil de flujo muestra un flujo ascendente que pierde intensidad conforme se aleja de la cabeza.
Forma de la gota			
Perfil de flujo			
tiempo	t = 0 [s]	t = 10 [s]	t = 30 [s]

<b>Descripción</b>	d) La gota continua estirándose, la velocidad de ascenso se mantiene constante en la cabeza mientras que la cola desacelera. El perfil de flujo se mantiene sin cambios.	e) La velocidad de la cola se mantiene constante, la estela negativa comienza a perder intensidad.	f) La estela negativa desaparece por completo. Al igual que todas aquellas que se deforman, terminará por romperse.
<b>Forma de la gota</b>			
<b>Perfil de flujo</b>			
<b>tiempo</b>	t = 50 [s]	t = 70 [s]	t = 90 [s]



a)

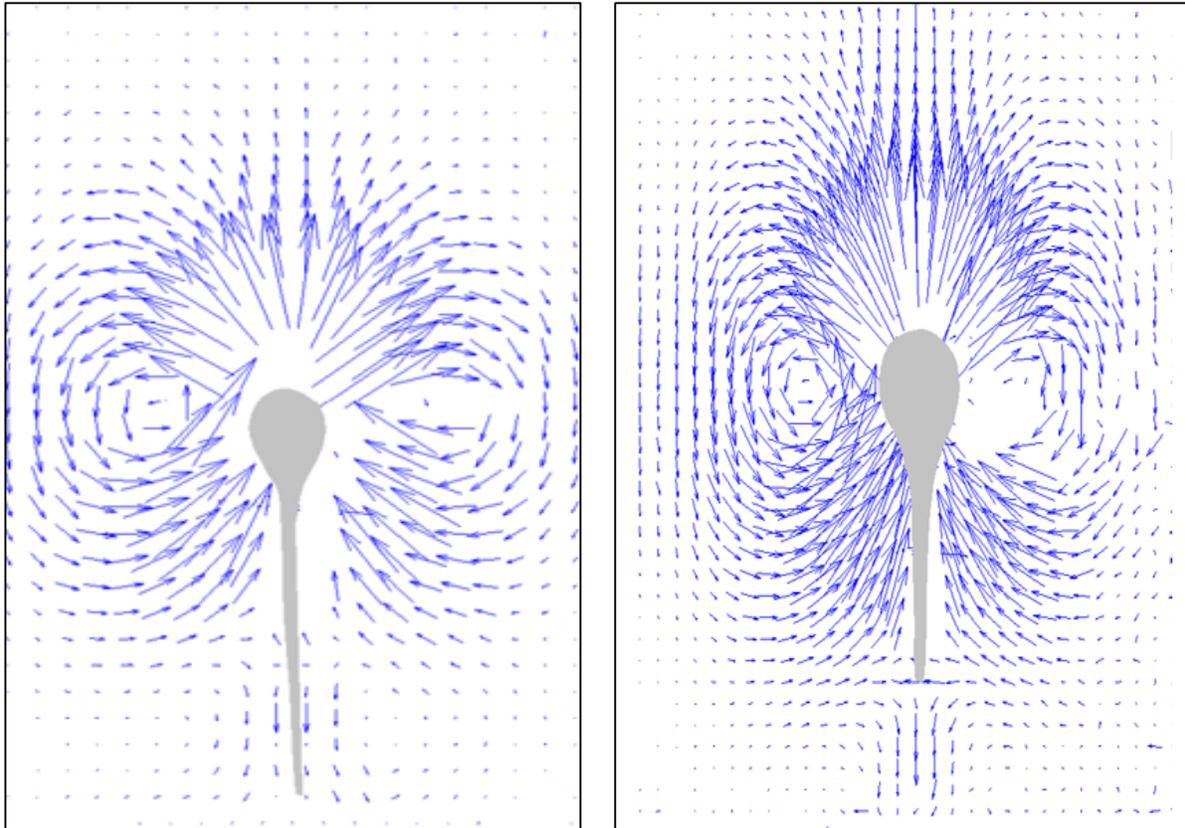


b)

*Figura 28. Gotas de fluido S1A 3 [ml] donde se muestra la deformación de cabeza doble y cabeza única, debido a que no fue posible captar toda la gota en una sola toma, se muestra la forma completa de las gotas mediante la unión de varias fotos a) deformación de cabeza doble, la cual se caracteriza por la formación de un pequeño lóbulo en la parte final de la gota, este tipo de deformación se presentó para todas las gotas lanzadas en el Flex 1 b) deformación de cabeza única, este tipo de deformación se caracteriza por mostrar una cola larga de diámetro uniforme, este tipo de deformación se observó en todas las gotas lanzadas a través del Flex2.*

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Si observamos las figura 21 y la tabla 4.b, nos daremos cuenta que las gotas Newtonianas inmersas en un medio viscoelástico, presentan una estela negativa desplazada sobre la cola de la gota, mientras que las gotas viscoelásticas presentan la estela negativa unos centímetros por debajo de la cola (estos resultados se sintetizan en la figura 29).



a)

b)

*Figura 29. Perfil de flujo alrededor de una gota Newtoniana (a) y una gota viscoelástica (b) que se desplazan a través de un fluido viscoelástico (Flex 1).*

Con los resultados obtenidos en este trabajo, es posible explicar la influencia que tiene la estela negativa en la deformación de las gotas viscoelásticas, para ello se compararon los perfiles de flujo de las gotas de 1 [ml] de fluido S1A que se desplazan a través del Flex 1 y el Flex 2.

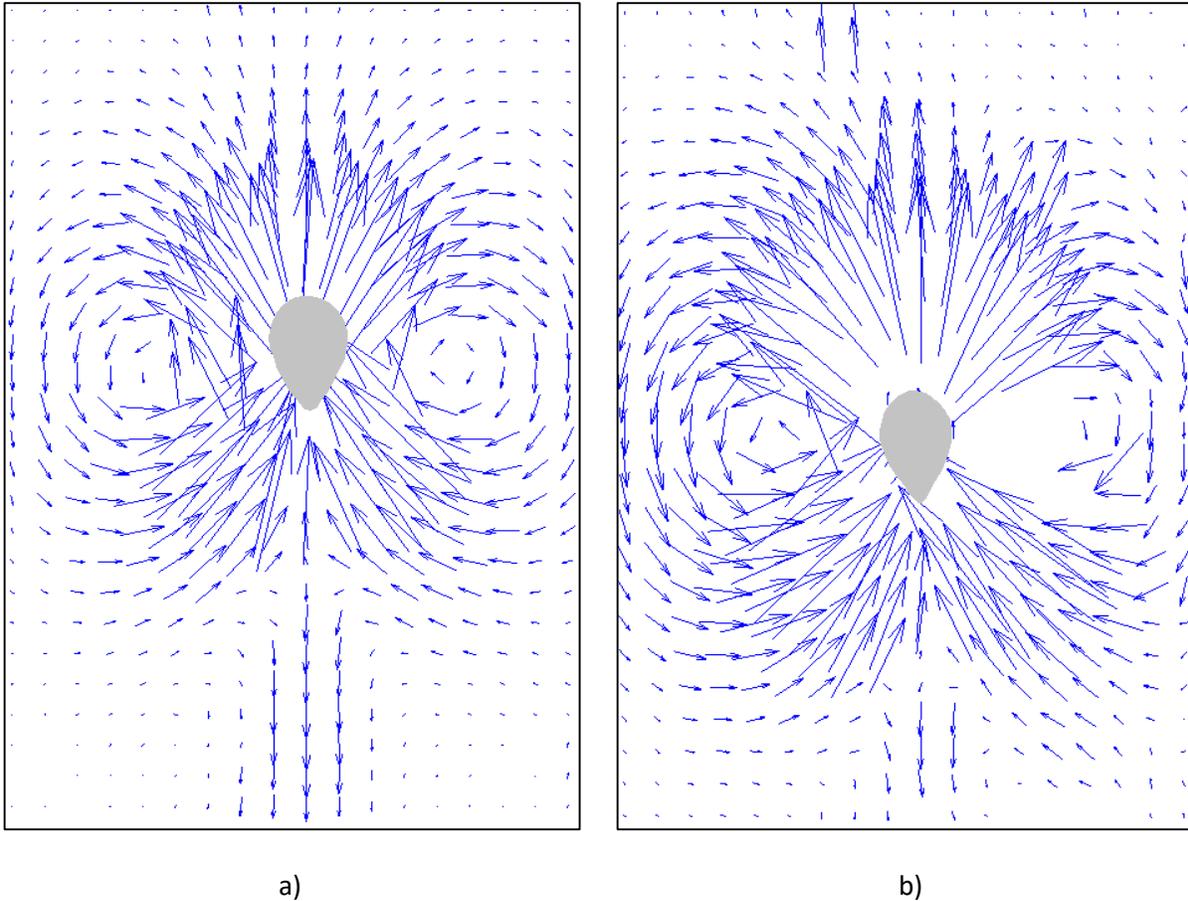


Figura 30. Gotas de un 1[m] de fluido viscoelástico que se desplazan a través de un fluido viscoelástico a) Flex 1 b) Flex2.

De la figura 30 podemos observar que los perfiles de flujo para las dos gotas son prácticamente iguales sin embargo, aquellas que se desplazan a través del Flex 2 se deformaron (figura 28.b), mientras que las gotas que se desplazan a través del Flex 1 viajaron sin deformarse (figura 28.a). En ambos casos es posible observar la presencia de la estela negativa, lo cual indica que el perfil de flujo no es determinante en el fenómeno de deformación. Esta teoría se refuerza al analizar el perfil de flujo de la gota durante su deformación (tabla 4), donde podemos ver que la desaparición de la estela negativa no evita que la gota siga deformándose.

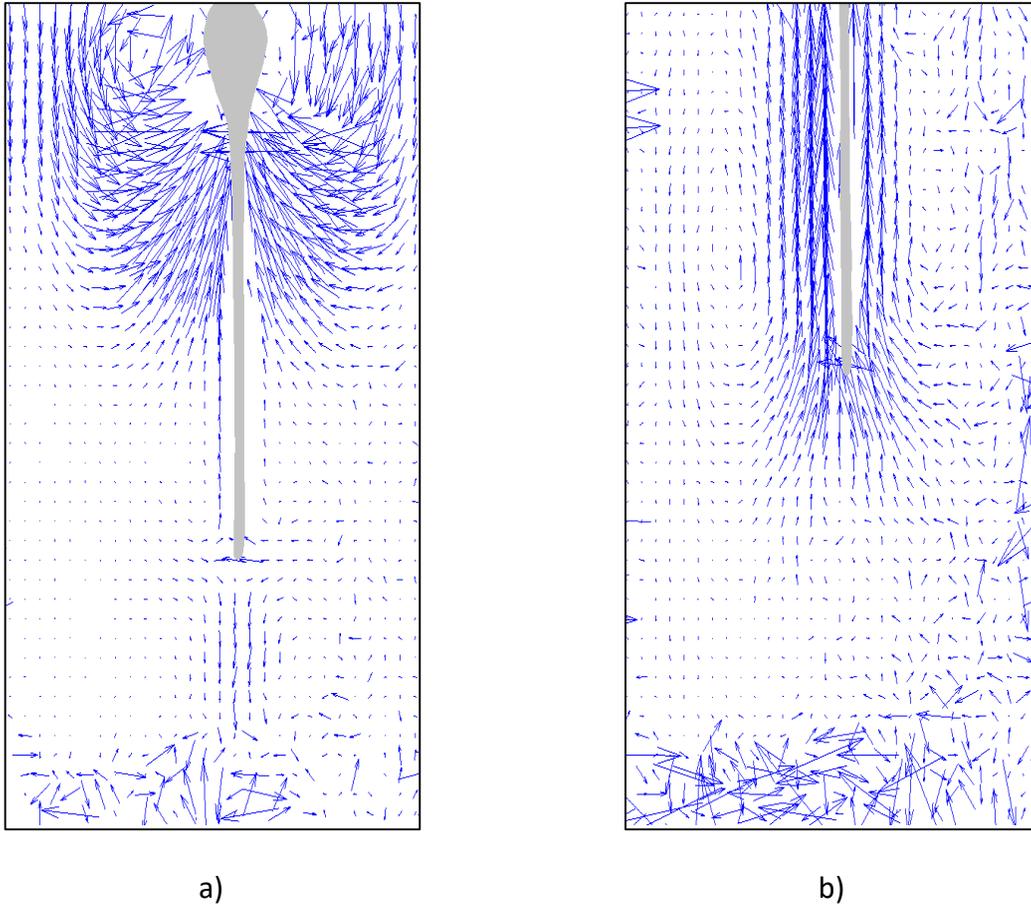


Figura 31. Gota de fluido viscoelástico de 5 [ml] que se desplaza a través de Flex 2, donde se observa la desaparición de la estela negativa en su perfil de flujo después de un tiempo.

En la figura 31 se muestra el perfil de flujo de una gota deformada en diferentes momentos de su evolución. Se observa que la estela negativa desaparece pasado un tiempo sin embargo, la gota continúa su proceso de deformación, el cual culminará con el rompimiento de la cola en gotas de menor tamaño.

## 5. CONCLUSIONES.

Las gotas de fluido Newtoniano que ascienden libremente a través de un medio continuo Newtoniano adoptan forma esférica. Las gotas Newtoniana que ascienden a través de medio continuo viscoelástico, adoptan forma de lágrima con una cola larga, la cual libera material mediante una estela de gotas de menor tamaño.

El perfil de flujo de las gotas Newtonianas que ascienden a través de un medio continuo viscoelástico presentan estela negativa desplazada sobre el cuerpo de la gota, a diferencia de las gotas viscoelásticas que ascienden a través de un medio continuo viscoelástico, las cuales presentan estela negativa unos centímetros por debajo de la cola de gota.

Con los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales, es posible concluir que la estela negativa no es decisiva en la deformación de las gotas, este hecho se hace evidente al analizar los casos siguientes:

- Gotas viscoelásticas de un 1[ml] a través de un medio viscoelástico (figura 30.a).

Las gotas de 1 [ml] lanzadas a través del Flex 1 mostraron en su perfil estela negativa sin embargo, no sufrieron deformación durante su trayecto.

- Gotas viscoelásticas a través de un medio continuo Newtoniano (figura 25).

Los fluidos Newtonianos no presentan el fenómeno de estela negativa debido a sus propiedades físicas, sin embargo las gotas viscoelásticas lanzadas a través de ellos se deformaron y presentaron una cola larga y resistente a la ruptura.

Este resultado concuerda con lo presentado por Sostarecz, quien observó que las gotas viscoelásticas que descienden a través de un fluido Newtoniano, presentan la formación de una cola al interior de la gota.

Finalmente se identificaron 2 tipos de deformaciones: cabeza única y cabeza doble; el tipo de deformación que sufre la gota parece depender de las propiedades elásticas y viscosas del fluido externo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] D. Dabiri, "Cross-Correlation digital particle image velocimetry-a review," *Dep. Aeronaut. Astronaut. Box 352400 Univ. Washingt.*, pp. 1–54, 2006.
- [2] D. Sigli and M. Coutanceau, "Effect of Finite Boundaries on the Slow Laminar Isothermal Flow of a Viscoelastic Fluid Around a Spherical Obstacle," *J. Non Newton. Fluid Mech.*, vol. 2, pp. 1–21, 1977.
- [3] O. Hassager, "Negative wake behind bubbles in non-newtonian liquids," *Nature*, vol. 279, pp. 402–403, 1979.
- [4] C. Bisgaard, "Velocity fields around spheres and bubbles investigated by laser-doppler anemometry," *J. Non Newton. Fluid Mech.*, vol. 12, pp. 283–302, 1983.
- [5] M. B. Bush, "The stagnation flow behind a sphere," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 49, pp. 103–122, 1993.
- [6] M. T. Arigo and G. H. Mckinley, "An experimental investigation of negative wakes behind spheres settling in a shear-thinning viscoelastic fluid," *Rheol Acta*, vol. 37, pp. 307–327, 1998.
- [7] D. Funfschilling and H. Z. Li, "Flow of non-Newtonian fluids around bubbles : PIV measurements and birefringence visualisation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, pp. 1137–1141, 2001.
- [8] N. J. Lawson, J. A. Tatum, M. V Finnis, and G. M. Harrison, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry : Application to a non-Newtonian flow field generated by a sedimenting sphere," *Dep. Chem. Eng.*
- [9] R. G. Sousa, S. Nogueira, A. M. F. R. Pinto, M. L. Riethmuller, and J. B. L. M. Campos, "Flow in the negative wake of a Taylor bubble rising in viscoelastic carboxymethylcellulose solutions: Particle image velocimetry measurements," *J. Fluid Mech.*, vol. 511, pp. 217–236, 2004.
- [10] M. Kemiha, X. Frank, S. Poncin, and H. Z. Li, "Origin of the negative wake behind a bubble rising in non-Newtonian fluids," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, pp. 4041–4047, 2006.
- [11] Y. Imaizumi, T. Kunugi, T. Yokomine, and Z. Kawara, "Viscoelastic fluid behaviors around a rising bubble via a new method of mesh deformation tracking," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 120, pp. 167–173, 2014.
- [12] X. Frank and H. Z. Li, "Negative wake behind a sphere rising in viscoelastic fluids: A lattice Boltzmann investigation," *Phys. Rev. E.*, vol. 74, pp. 1–9, 2006.
- [13] R. K. Wanchoo, S. K. Sharma, and R. Gupta, "Shape of a Newtonian liquid drop moving through an immiscible quiescent non-Newtonian liquid," *Chem. Eng. Process.*, vol. 42, pp. 387–393, 2003.

- [14] S. L. Ortiz, J. S. Lee, and B. Mena, "An experimental note on the deformation and breakup of viscoelastic droplets rising in non-Newtonian fluids," *Rheol. Acta*, vol. 55, pp. 879–887, 2017.
- [15] G. Pradillo, "Flujo viscoelástico alrededor de dos esferas cayendo bajo la misma trayectoria," Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013.
- [16] D. D. Joseph, Y. J. Liu, M. Poletto, and J. Feng, "Aggregation and dispersion of spheres falling in viscoelastic liquids," *J. Non Newton. Fluid Mech. Fluid Mech.*, vol. 54, pp. 45–86, 1994.
- [17] R. Zenit and J. J. Feng, "Hydrodynamic Interactions Among Bubbles, Drops, and Particles in Non-Newtonian Liquids," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 50, pp. 505–534, 2018.
- [18] E. Verneuil, R. J. Phillips, and L. Talini, "Axisymmetric two-sphere sedimentation in a shear thinning viscoelastic fluid: Particle interactions and induced fluid velocity fields," *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 51, pp. 1343–1359, 2007.
- [19] A. S. Khair and T. M. Squires, "Active microrheology: A proposed technique to measure normal stress coefficients of complex fluids," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, pp. 8–11, 2010.
- [20] D. A. Eisenberg, I. M. Klink, and R. J. Phillips, "Axisymmetric sedimentation of spherical particles in a viscoelastic fluid: Sphere–wall and sphere–sphere interactions," *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 57, pp. 857–880, 2013.
- [21] M. C. Sostarecz and A. Belmonte, "Motion and shape of a viscoelastic drop falling through a viscous fluid," *J. Fluid Mech.*, vol. 497, pp. 235–252, 2003.
- [22] B. Z. Vamerzani, M. Norouzi, and B. Firoozabadi, "Analytical solution for creeping motion of a viscoelastic drop falling through a Newtonian fluid," *Korea Aust. Rheol. J.*, vol. 26, pp. 91–104, 2014.
- [23] T. Cherdhirankorn, W. Lerdwijitjarud, A. Sirivat, and R. G. Larson, "Dynamics of vorticity stretching and breakup of isolated viscoelastic droplets in an immiscible viscoelastic matrix," *Rheol Acta*, vol. 43, pp. 246–256, 2004.
- [24] K. Verhulst, P. Moldenaers, and M. Minale, "Drop shape dynamics of a Newtonian drop in a non-Newtonian matrix during transient and steady shear flow," *J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 51, pp. 261–273, 2007.
- [25] S. Mukherjee and K. Sarkar, "Effects of viscosity ratio on deformation of a viscoelastic drop in a Newtonian matrix under steady shear," *J. Non Newton. Fluid Mech.*, vol. 160, pp. 104–112, 2009.
- [26] J. C. Mena, "Deformación y Ruptura de Gotas Viscoelásticas en Flujos de Sección Transversal Variable," Facultad de Ciencias, UNAM, 1988.
- [27] F. S. Soto, "Deformación y ruptura de gotas Newtonianas y no-Newtonianas en un flujo a dos fases a bajo número de Reynolds," Facultad de Ingeniería, UNAM, 1988.

- [28] J. Cruz-Mena, F. Serrania, and B. Mena, "Some theoretical and experimental relations between simple shearing and simple extension," *Rev. Mex. Fis.*, vol. 48, pp. 51–56, 2002.
- [29] W. J. Milliken and L. G. Leal, "Deformation and breakup of viscoelastic drops in planar extensional flows," *J. Non Newton. Fluid Mech.*, vol. 40, pp. 355–379, 1991.
- [30] J. R. Herrera-velarde, R. Zenit, D. Chehata, and B. Mena, "The flow of non-Newtonian fluids around bubbles and its connection to the jump discontinuity," *J. Non Newton. Fluid Mech.*, vol. 111, pp. 199–209, 2003.
- [31] M. E. Clift, R. Grace, J.R., Weber, *Bubbles, Drops and Particles*, vol. 94. New York: ACADEMIC PRESS, 1978.
- [32] J. F. Harper, *The Motion of Bubbles and Drops Through Liquids*, vol. 12. Wellington, New Zealand: Victoria University of Wellington, 1972.
- [33] M. Wegener, N. Paul, and M. Kraume, "Fluid dynamics and mass transfer at single droplets in liquid/liquid systems," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 71, pp. 475–495, 2014.
- [34] Z.-G. Feng and E. E. Michaelides, "Drag Coefficients of Viscous Spheres at Intermediate and High Reynolds Numbers," *J. Fluids Eng.*, vol. 123, p. 841, 2001.

## 7. ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Algoritmo de procesamiento de imágenes de técnica PIV a) partición de imágenes en áreas de interrogación b) análisis estadístico de las partículas en cada una de las áreas de interrogación c) con base en la relación de imágenes se obtiene el promedio del cambio de las partículas d) el promedio se relaciona con espacio y se obtiene un vector de velocidad y dirección[1]. .....	7
Figura 2. Disposición usual del equipo utilizado durante mediciones con técnica PIV. Se muestra un generador de rayos laser el cual ilumina un fluido de estudio y cámaras ubicadas de forma perpendicular al haz de luz. (Imagen obtenida de la página del laboratorio de química de la Universidad de Cambridge). .....	8
Figura 3. Perfil de velocidades de la estela negativa a) alrededor de una burbuja con estela negativa [3] b) alrededor de una esfera sólida con estela negativa. En la imagen se ilustran 3 zonas: Zona Aguas Arriba en la parte anterior de la esfera, Punto de Estancamiento indicado con la leyenda $Z_{stag}$ y Zona Aguas Abajo [6]. .....	9
Figura 4. Estela negativa en 2D a) Esquema donde se muestran las tres zonas que conforman la estela negativa [7] b) Imagen típica de la estela negativa obtenida mediante técnica PIV [10]. ..	9
Figura 5. Resultados encontrados mediante técnica de microburbujas a) relación entre relación de radios de una burbuja y el flujo de una estela negativa b) evolución de un fluido viscoelástico tras el paso de una burbuja en el cual se observa la recuperación de su forma original después de 4 minutos. ....	10

Figura 6. Resultados obtenidos por Frank y Li mediante métodos computacionales, a) Ángulo de apertura de la estela negativa en función de Reynolds, b) Ilustración gráfica del ángulo de apertura [12].	11
Figura 7. Caracterización de la forma gota [13].	12
Figura 8. Gotas Newtonianas de diferentes volúmenes, en las que se puede apreciar la aparición de una cola que libera material en forma de gotas satélite al superar el volumen crítico de 2.9 [ml] [14].	12
Figura 9. Evolución de esferas liberadas lado a lado a través de un medio viscoelástico [16] ..	13
Figura 10. Formación de filamento interno en gotas viscoelásticas que descienden a través de un fluido Newtoniano a) 1.4 [ml] b) 1.5 [ml] c) 7 [ml] gota con forma de toroide [21].	14
Figura 11. Evolución de una gota viscoelástica de 3 [ml] desde que es inyectada hasta su forma final elongada.	16
Figura 12. Perfil de flujo a los costados de una gota deformada, donde se aprecia un cambio en la dirección del flujo.	17
Figura 13. Configuración esquemática de los elementos utilizados durante las pruebas experimentales.	19
Figura 14. Calibración de la cámara mediante el sistema “multicamera calibration” incluido en la paquetería DynamicStudio.	20
Figura 15. Viscosidad vs Rapidez de corte para los fluidos S1A, Flex1 (poliacrilamida 3% wt), Flex 2 (poliacrilamida 5% wt).	23
Figura 16. Viscosidad vs Rapidez de corte del aceite SAE 80W-90 y la Miel karo (Fluidos Newtonianos).	23

Figura 17. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del Flex 1.....	24
Figura 18. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del Flex 2.....	24
Figura 19. Módulo de almacenamiento ( $G'$ ) vs Módulo de pérdida ( $G''$ ) del fluido S1A.....	25
Figura 20. Perfil de flujo alrededor de una gota Newtoniana de 5 [ml] a través de un medio Newtoniano, la gota se representa en color gris. Se observa el típico perfil de flujo para gotas Newtonianas esféricas o cuerpos rígidos esféricos que se desplazan a través de un medio Newtoniano. ....	26
Figura 21. Perfil de flujo alrededor de gotas Newtonianas que ascienden a través de Flex 1 a) gota de 1 [ml] de aceite de motor b) gota de 5 [ml] de aceite de motor.....	27
Figura 22. Perfil de flujo alrededor de gotas Newtonianas a través del Flex 2 a) gota de 3 [ml] de aceite de motor b) gota de 1 [ml] de aceite de motor. En ninguno de los casos es posible observar estela negativa.....	28
Figura 23. Técnica de visualización PIV utilizada para medir la velocidad del cuerpo sólido y el perfil de flujo a su alrededor a) fotografía típica obtenida mediante técnica PIV b) perfil de flujo alrededor de la gota sólida, la cual se muestra en color gris. ....	29
Figura 24. Perfil de flujo alrededor del cuerpo sólido en tres fluidos externos diferentes a) fluido externo Newtoniano b) fluido externo 1 No-Newtoniano donde resalta la presencia de la estela negativa (enmarcada en rojo) c) Fluido externo 2 No-Newtoniano.....	30
Figura 25. Gota viscoelástica en un fluido Newtoniano a) perfil de flujo alrededor de la gota b) gota viscoelástica de 5 [ml].....	31
Figura 26. Gota No-Newtoniana de 1 [ml] con forma de lágrima a) perfil de flujo donde se observan las zonas características de la estela negativa b) gota No-Newtoniana con forma de	

lágrima la cual no sufre deformación en todo su trayecto a pesar de la presencia de la estela negativa.....	32
Figura 27. Gota de fluido S1A de 3 [ml] en la que se observa el perfil de flujo alrededor de la cabeza y de la cola, para el caso de la cabeza se muestra el perfil esfera seguido de un flujo ascendente a los costados del cuerpo de la cola mientras que en la cola se observa un flujo ascendente a los costados de la cola seguido por una estela negativa. ....	33
Figura 28. Gotas de fluido S1A 3 [ml] donde se muestra la deformación de cabeza doble y cabeza única, debido a que no fue posible captar toda la gota en una sola toma, se muestra la forma completa de las gotas mediante la unión de varias fotos a) deformación de cabeza doble, la cual se caracteriza por la formación de un pequeño lóbulo en la parte final de la gota, este tipo de deformación se presentó para todas las gotas lanzadas en el Flex 1 b) deformación de cabeza única, este tipo de deformación se caracteriza por mostrar una cola larga de diámetro uniforme, este tipo de deformación se observó en todas las gotas lanzadas a través del Flex2.	37
Figura 29. Perfil de flujo alrededor de una gota Newtoniana (a) y una gota viscoelástica (b) que se desplazan a través de un fluido viscoelástico (Flex 1).....	38
Figura 30. Gotas de un 1[ml] de fluido viscoelástico que se desplazan a través de un fluido viscoelástico a) Flex 1 b) Flex2. ....	39
Figura 31. Gota de fluido viscoelástico de 5 [ml] que se desplaza a través de Flex 2, donde se observa la desaparición de la estela negativa en su perfil de flujo después de un tiempo. ....	40

## 8. ÍNDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 1 Composición de los fluidos utilizados en las pruebas experimentales.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Densidad y tiempo de relajación de fluidos utilizados en las pruebas experimentales..</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 3. Diámetro de la cola de las gotas de aceite que se desplazan a través de los fluidos viscoelásticos Flex 1 y Flex 2. ....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4. Evolución del perfil de flujo alrededor de una gota No-Newtoniana de 5 [ml] en deformación. ....</i>	<i>35</i>