



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

# Extracción selectiva como un nuevo método para medir viscosidad extensional

Tesis

*que para obtener el grado de*

**Ingeniero Mecánico**

*presenta*

**Esli Trejo Peimbert**

Tutor: Dr. Roberto Zenit Camacho

México D.F., Enero de 2013



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.



# Índice general

<b>1. Resumen</b>	<b>9</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>11</b>
2.1. Fluidos Newtonianos y No Newtonianos . . . . .	12
2.1.1. Fluidos Newtonianos . . . . .	12
2.1.2. Fluidos No Newtoniano . . . . .	12
2.2. Viscosidad Extensional . . . . .	15
2.3. Métodos Existentes . . . . .	16
2.4. Proyecto M1 . . . . .	18
2.5. Extracción Selectiva . . . . .	20
<b>3. Arreglo Experimental</b>	<b>23</b>
3.1. Fluidos de Trabajo . . . . .	25
3.2. Velocimetría por Imágenes de Partículas . . . . .	29
3.3. Análisis Digital de Imágenes . . . . .	30
3.4. Cálculo de Viscosidad Extensional . . . . .	31
3.5. Análisis de Incertidumbre . . . . .	32
<b>4. Resultados</b>	<b>35</b>
4.1. Fluidos Newtonianos . . . . .	35
4.2. HASE, Caso 1 No Newtoniano . . . . .	37
4.3. UCARFLOC 309, Caso 2 No Newtoniano . . . . .	39
<b>5. Discusión</b>	<b>41</b>

4

*ÍNDICE GENERAL*

**6. Conclusiones** **43**

**Bibliografía** **46**

**A. Programas de Matlab** **47**

**B. Presentaciones en Congresos** **55**

# Índice de figuras

2.1. Comportamiento reológico de los diferentes fluidos no newtonianos, (a) esfuerzo vs. rapidez de deformación; (b) el efecto del tiempo sobre el esfuerzo aplicado. [16] . . . . .	14
2.2. Tres diferentes tipos de flujo extensional se representan con flechas en esta imagen. (a) Uniaxial, (b) biaxial y (c) Planar [12]. . . . .	15
2.3. Diagrama esquemático del método de estiramiento homogéneo [12]. . . . .	17
2.4. Proyecto M1, gráfica de resultados de la medición de la viscosidad extensional en función de la tasa de extensión, [4]. . . . .	18
2.5. En esta figura se muestra un ejemplo de la deformación de la interface debido a la succión . . . . .	20
2.6. Deformación característica de la superficie conforme aumenta la tasa de succión. Aquí se observa el caso del aceite de silicón a distintas variaciones de flujo y una misma altura. . . . .	21
3.1. Esquema D. Zhou y J. Feng, 2010 [1] . . . . .	23
3.2. Arreglo experimental. . . . .	24
3.3. Resultados obtenidos del comportamiento del HASE a distintas tasas de corte en la caracterización reológica . . . . .	26
3.4. La imagen del lado izquierdo no presenta deformación en la punta como la del lado derecho a una mayor tasa de extensión . . . . .	27
3.5. Resultados obtenidos del comportamiento del UCARFLOC 309 a distintas tasas de corte en la caracterización reológica . . . . .	28
3.6. Viscosidad extensional y relación de Trouton para una concentración del 2% poliacrilamida medido con un reómetro spine-line el cual tiene una línea que a cierta altura la velocidad no varía con respecto al tiempo[12]. . . . .	28
3.7. Ejemplo de los campos de velocidades típicos obtenidos en el PIV . . . . .	30

3.8. Binarización de la imagen para obtener la curvatura en el punto de máxima depresión . . . . .	31
4.1. Glicerina a 60°C y a una sola altura. H=7.35 mm . . . . .	35
4.2. Glicerina a 25°C en dos alturas distintas donde H1= 4.96 mm y H2= 5.25 mm. . . . .	36
4.3. Aceite de Silicón. Aquí se observa no sólo los resultados obtenidos si no la dependencia que existe entre el error calculado y la distancia del tubo a la superficie libre. La distancia debe de ser por lo menos 2.5 veces el valor del radio . . . . .	37
4.4. Tendencia de la profundidad de la depresión conforme aumenta el caudal. .	37
4.5. HASE a una concentración de 1,7% con un pH de 9. . . . .	38
4.6. Datos experimentales de Tan <i>et al.</i> (símbolos) y predicción de modelo(líneas) [5] . . . . .	39
4.7. Comportamiento de la viscosidad extensional correspondiente al aumento de tasa de extensión . . . . .	39

# Índice de cuadros

2.1. Laboratorios encargados de llevar a cabo los experimentos y reportar los resultados. [4]	19
3.1. Características de los fluidos newtonianos a $20^{\circ}C$ .	25
3.2. Fluidos no newtonianos.	26



# Capítulo 1

## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio que se realizó para medir la viscosidad extensional de fluidos viscosos y viscoelásticos utilizando una metodología nueva. Hoy en día no hay un método que proporcione una solución definitiva para determinar esta propiedad. La técnica propuesta se basa en lo que se ha denominado como extracción selectiva: la deformación que causa la succión aplicada por debajo de una superficie libre. Se hace un balance entre la deformación ocasionada, el flujo extensional que está experimentando el fluido y sus propiedades. Partiendo de la hipótesis de que el método funciona y puede ser utilizado como reómetro extensional, se realizaron mediciones experimentales utilizando esta técnica. Se usaron algunos fluidos newtonianos como referencia y posteriormente se llevaron a cabo mediciones para líquidos viscoelásticos. Como fluidos newtonianos se utilizaron: glicerina, un aceite de silicón y glucosa, para los no newtonianos soluciones poliméricas acuosas. Se logró obtener relaciones de Trouton cercanas al valor teórico para fluidos newtonianos. Para los fluidos no newtonianos los resultados no son del todo concluyentes ya que se observaron algunas inestabilidades que dificultaron la medición.



# Capítulo 2

## Introducción

En este capítulo se describen los conceptos más relevantes para este trabajo, los cuales permiten destacar en que se enfoca. Se plantea por otro lado la motivación y la justificación de por qué se llevó a cabo el estudio. Es difícil cubrir un tema tan extenso y el enfoque que se da en este trabajo es con el fin de simplificar y acercarse al tema desde un punto de vista amigable a los existentes. El método está basado principalmente en un análisis geométrico de una singularidad que se presenta cuando se tiene un fluido que es succionado a través de un tubo, como en un lavadero. Analizando las características principales de esta singularidad y sabiendo que es lo que las ocasiona se puede tener una relación de una propiedad conocida como viscosidad extensional.

La deformación que ocurre en un medio como el que aquí se describe, se relaciona con el tipo de flujo que la provoca y tomando en cuenta las propiedades del fluido se puede llegar a una expresión importante que da como resultado la primera diferencia de esfuerzos normales. En términos de los efectos sobre la deformación, las diferencias de esfuerzos normales son las de interés a conocer en sus distintas direcciones. Puesto que los componentes dinámicos no son determinados por las fuerzas externas sino que resultan del tipo de deformación del material.

La primera diferencia de esfuerzos normales, en este caso particular, se define como:  $N_1 = \tau_{zz} - \tau_{rr}$ . Al relacionarla con la rapidez de extensión que experimenta el flujo, da un valor de viscosidad extensional que es el objetivo de este trabajo. La viscosidad extensional ha presentado desde el inicio de su estudio, problemas para determinarla experimentalmente. En el caso de fluidos newtonianos se tiene una referencia teórica en la cual se conoce la relación entre la viscosidad al corte y la viscosidad extensional de un fluido en el caso no newtoniano no es así.

## 2.1. Fluidos Newtonianos y No Newtonianos

En el siglo XVII todo parecía ser muy simple para Hooke y Newton, y durante dos siglos todos estuvieron satisfechos con la ley de Hooke para sólidos y la ley de viscosidad de Newton para fluidos. La ley de Newton se sabía que funcionaba bien para los fluidos conocidos y probablemente por eso se consideró como ley universal. No fue sino hasta el siglo XIX que se empezó a tener dudas de esto. Se empezaron a describir fenómenos que no coincidían con la ley de Hooke para sólidos pero tenían que ver con respuestas que presentaban los fluidos. Haciendo a un lado la perspectiva histórica, después vino la clasificación de los fluidos en dos grandes grupos: fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos [12].

### 2.1.1. Fluidos Newtonianos

Una de las características físicas principales de los fluidos es la viscosidad, la cual está definida en términos coloquiales como la resistencia que presenta un fluido a fluir. En un fluido newtoniano el esfuerzo cortante es proporcional a la rapidez de corte. La viscosidad  $\mu$ , es esa constante de proporcionalidad entre la rapidez de corte y el esfuerzo cortante y es una propiedad de cada sustancia. Experimentalmente se sabe que si se habla de un fluido newtoniano el valor de la viscosidad es independiente de la rapidez de corte y depende únicamente de la temperatura, la presión o si es una solución, de la concentración de ésta. Graficando el esfuerzo de corte contra la viscosidad de corte, la curva de flujo para un fluido newtoniano es una línea recta cuya pendiente es la viscosidad. También se puede decir que un fluido es newtoniano al satisfacer la ecuación constitutiva newtoniana [9]:

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + \lambda \text{tr}(\mathbf{D})\mathbf{I} + 2\mu\mathbf{D} \quad (2.1)$$

### 2.1.2. Fluidos No Newtoniano

Se dice que un fluido es no newtoniano cuando no satisface la ecuación constitutiva newtoniana: su curva de flujo es no lineal o bien si ésta es lineal pero no existe una intersección con el origen diferente de cero. Los fluidos no newtonianos pueden ser clasificados en 3 grandes categorías que a su vez contienen varios tipos. La figura 2.1 ilustra los diferentes comportamientos.

1. Viscosidad no constante o viscosidad variable. En la primera categoría las propiedades de flujo de estos fluidos, no dependen de la duración del esfuerzo aplicado.

Pueden ser descritos con una ecuación como la siguiente:

$$\tau_{xy} = \eta(\dot{\gamma}) \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (2.2)$$

donde  $\eta(\dot{\gamma})$  es la viscosidad como función de la rapidez de corte.

Un modelo sencillo para describir esta propiedad del fluido tiene una forma de ley de potencia:

$$\eta(\dot{\gamma}) = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.3)$$

El parámetro  $n-1$  es la pendiente de la recta en una gráfica log-log de  $\eta$  en función de  $\dot{\gamma}$ . Para un fluido newtoniano  $n=1$ . Si  $n < 1$  el fluido es adelgazante. Si por el contrario  $n > 1$  el fluido es dilatante. Al parámetro  $m$  se le conoce como índice de consistencia.

Estos fluidos pueden ser a su vez subdivididos en 3 distintos tipos:

- Adelgazantes o pseudoplásticos.- Este tipo de fluidos poseen una viscosidad aparente (cociente del esfuerzo de corte dividido entre la rapidez de corte) que decrece al aumentar la rapidez de corte. Existe una gran cantidad de fluidos no newtonianos que presentan el fenómeno de adelgazamiento para amplias condiciones de flujo.
- Fluidos viscoplásticos.- La principal característica de estos fluidos consiste en la existencia de un esfuerzo de cedencia  $\tau_o$  el cual debe ser vencido antes de que el fluido comience a deformarse. Una vez que este esfuerzo ha sido superado la curva de flujo puede o no ser lineal. Si la curva es lineal al fluido se le conoce como fluido de Bingham.
- Fluidos dilatantes.- Son conocidos también como fluidos espesantes. Se asemejan a los fluidos adelgazantes en el sentido de que no tienen un esfuerzo de cedencia. Sin embargo en este tipo de fluidos, la viscosidad aparente se incrementa al aumentar la rapidez de corte. En general este fenómeno solamente se observa en suspensiones muy concentradas y a gran rapidez de corte.

2. Fluidos dependientes del tiempo. Existen muchos fluidos en los cuales sus propiedades de flujo dependen tanto de la rapidez de corte como del tiempo de deformación. Por su tipo de comportamiento se subdividen en dos:

- Fluidos tixotrópicos.- si la viscosidad aparente decae en el tiempo cuando el fluido es sometido a una rapidez de corte constante se dice que el fluido es tixotrópico.

- Fluidos reopéticos.- en estos fluidos cuando son sometidos a una rapidez de corte constante su viscosidad aumenta en el tiempo.

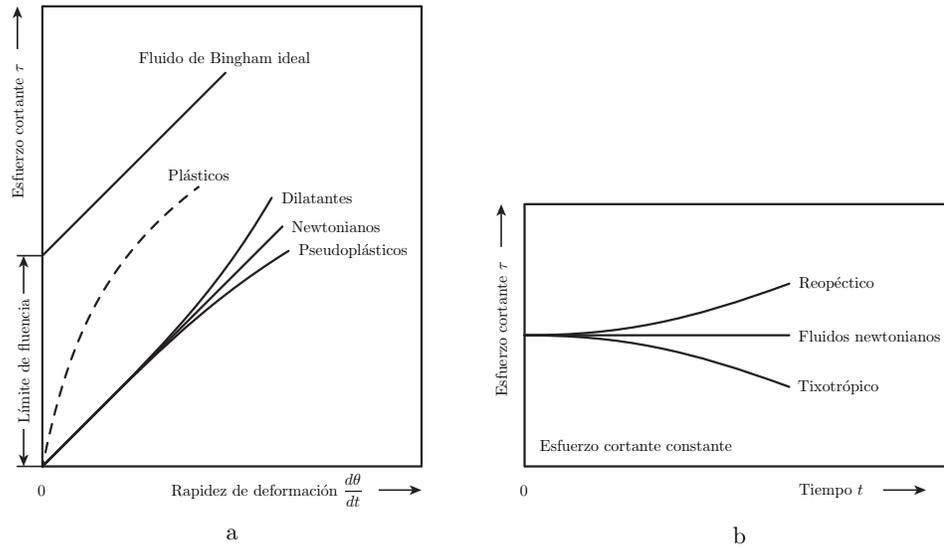


Figura 2.1: Comportamiento reológico de los diferentes fluidos no newtonianos, (a) esfuerzo vs. rapidez de deformación; (b) el efecto del tiempo sobre el esfuerzo aplicado. [16]

3. Fluidos viscoelásticos. Si un material presenta características tanto de un material sólido como de un líquido, además de mostrar una recuperación elástica parcial después de haber sido deformado, se dice que este material es viscoelástico. Una de las propiedades más importantes que presentan estos fluidos es la aparición de esfuerzos normales. La presencia o no de diferencias de esfuerzos normales primarios y secundarios permiten clasificar a estos fluidos en viscoelásticos o viscoinelásticos. Un fluido de Boger es un fluido viscoelástico que tiene, idealmente, viscosidad constante pero presenta efectos elásticos. Estos fluidos se preparan utilizando una baja concentración de polímero de peso molecular grande diluido en un fluido newtoniano muy viscoso. Estas dos características del fluido provocan que el tiempo de relajación del material sea grande. En estos fluidos la primera diferencia de esfuerzos normales ( $N_1$ ) es una función cuadrática de la rapidez de corte cuando ésta es pequeña. También se consideran como fluidos de Boger aquéllos en los que, para un rango de rapidezces de corte, muestran muy pequeñas variaciones en su viscosidad además de esfuerzos normales. Para modelar este tipo de fluidos comúnmente se ha utilizado el modelo de Oldroyd B. Este modelo es capaz de describir en términos generales los resultados experimentales con este tipo de fluidos para flujo cortante simple estacionario [9].

## 2.2. Viscosidad Extensional

La viscosidad extensional como tal fue identificada, bajo un nombre distinto, por Trouton alrededor de 1906 con la publicación de un artículo donde la llamo “coeficiente de tracción viscosa ”y su interés estaba basado en encontrar la viscosidad de un fluido Newtoniano compresible. Este artículo relacionaba la viscosidad al corte y su “coeficiente de tracción viscosa ”[4].

$$\eta_E = 3\mu \quad (2.4)$$

Se volvió un tema relevante cuando a mediados de los años 60 se le empezó a dar importancia tras darse cuenta de su significado en situaciones prácticas y como los fluidos elásticos no newtonianos exhibían una diferencia dramática en sus características de flujo extensional. Hoy en día el estudio de la viscosidad extensional sigue evolucionando y se han hecho muchos trabajos al respecto entre otros es importante mencionar los trabajos de Petrie (1979), Meissner (1983, 1985) y Cogswell (1981)[12].

Considérese el campo de velocidades:

$$v_x = \dot{\epsilon}x, v_y = -\dot{\epsilon}y/2, v_z = -\dot{\epsilon}z/2 \quad (2.5)$$

que representa el caso (a) de la Figura 2.2 donde  $\dot{\epsilon}$  es la rapidez de extensión constante, la distribución correspondiente de esfuerzos puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \sigma_{xx} - \sigma_{zz} = -\dot{\epsilon}\eta_E(\dot{\epsilon}), \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (2.6)$$

donde  $\eta$  es la viscosidad extensional (uniaxial). Normalmente es función de la tasa de extensión  $\dot{\epsilon}$  así como la viscosidad al corte puede depender de la tasa de corte  $\dot{\gamma}$ . Sin embargo la viscosidad extensional muestra comportamientos muy diferentes de viscosidad de corte. Por ejemplo, un polímero elástico que puede disminuir su viscosidad corte gradualmente, pero incrementa drásticamente su viscosidad extensional conforme aumenta la tasa de deformación.

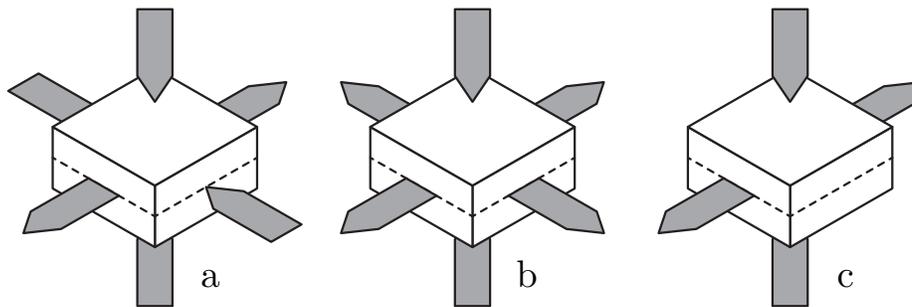


Figura 2.2: Tres diferentes tipos de flujo extensional se representan con flechas en esta imagen. (a) Uniaxial, (b) biaxial y (c) Planar [12].

En este trabajo sólo se menciona el tipo de deformación extensional de tipo uniaxial, que es el de interés conocer ya que es el que ocurre en la extracción selectiva de un fluido.

Tomando en cuenta algunas consideraciones teóricas, se sabe la relación entre viscosidad al corte y viscosidad extensional es [12]:

$$\eta_E(\dot{\epsilon})|_{\dot{\epsilon}=0} = 3\eta(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=0} \quad (2.7)$$

Sabemos que esta relación es válida para todos los valores de  $\dot{\epsilon}$  y  $\dot{\gamma}$  de los fluidos newtonianos. Este resultado fue obtenido por Trouton en 1906. En honor a esto la relación entre la viscosidad extensional y la viscosidad al corte se ha definido como la “relación de Trouton”:

$$T_r = \frac{\eta_E(\dot{\epsilon})}{\eta(\dot{\gamma})} \quad (2.8)$$

### 2.3. Métodos Existentes

Es importante analizar los métodos existentes para medir la viscosidad extensional ya que esto reafirma la necesidad de encontrar nuevas técnicas para medir esta propiedad. La dificultad de medir la viscosidad extensional radica en la dificultad de generar un flujo puramente extensional con una rapidez de extensión constante [3].

Existen principalmente tres diferentes técnicas para medir la viscosidad extensional. El primero es el reómetro extensional de estiramiento de filamentos (FiSER por sus siglas en inglés). FiSER crea un puente de fluido entre dos placas como se muestra en la Fig 2.2. Uno de los extremos se mueve a velocidad que crece exponencial lo que permite que la parte central del fluido experimente una deformación extensional uniaxial. La tasa de extensión puede ser calculada por el adelgazamiento que presenta el filamento en su parte central. La fuerza en el extremo del plato, permite calcular el esfuerzo. Si se conoce la tasa de extensión y el esfuerzo, se puede inferir la viscosidad extensional. Este método es atractivo por su control directo en la tasa de extensión pero una de las limitaciones es que el fluido debe ser lo suficientemente viscoso como para formar un filamento estable cuando es estirado. El rango de viscosidades que maneja está entre los 10 y  $10^3$  Pa s. Otro problema también puede ser que cerca de los platos no hay un flujo elongacional y se sufren perturbaciones cerca de estos. Además, a altas tasas de estiramiento aparece una inestabilidad y el fluido se “despega” de las placas. [3].

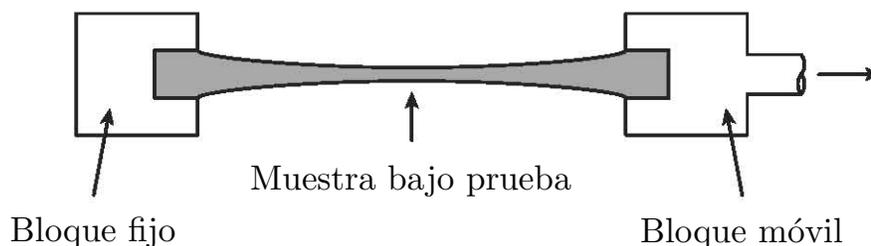


Figura 2.3: Diagrama esquemático del método de estiramiento homogéneo [12].

En el caso del reómetro extensional de adelgazamiento capilar (CTER, por sus siglas en inglés) se separan abruptamente las placas en las que existe fluido entre ellas. El diámetro del filamento se observa hasta que se rompe bajo la combinación de la tensión superficial y la fuerza de extensión. Al hacer un balance de fuerzas, se puede obtener una relación de viscosidad extensional [3]. Existe una versión muy parecida a esta que se hace llamar CaBER, ha sido ampliamente utilizada y tiene la posibilidad de trabajar con fluidos de relativamente baja viscosidad. Pero la tasa de extensión varía durante el proceso de adelgazamiento por lo tanto hay poco control sobre ésta. Aparte, existen factores que complican el cálculo así como la inercia, gravedad o curvatura axial y estos necesitan en cada caso un factor de corrección para poder obtener una relación de Trouton relativamente razonable para los fluidos newtonianos [3].

El tercer y último tipo de reómetro que se discutirá aquí es el de boquillas opuestas. Este dispositivo consiste en dos boquillas alineadas y opuestas sumergidas en el fluido a medir. Cuando el fluido empieza a ser extraído a través de éstas a la misma razón se crea un flujo extensional en el punto de estancamiento entre las dos boquillas. El campo entre los dos orificios que contiene el punto de estancamiento es paralelo (si el fluido es extraído) o perpendicular si el fluido es extrudido a la línea que une los orificios en la cual se encuentra un flujo altamente extensional[7]. El flujo permite calcular la rapidez de extensión y el esfuerzo del torque en una de las boquillas. Así una viscosidad extensional aparente puede ser calculada. Este dispositivo tiene una ventaja, puede ser utilizado con fluidos de baja viscosidad como soluciones poliméricas diluidas. El problema es que el campo de flujo es complejo y se debe usar una rapidez de extensión nominal en vez de una rapidez de extensión local. Los resultados también suelen ser afectados por la inercia, el tamaño de las boquillas y su separación. También queda la duda de si las diferentes líneas de flujo experimentan diferentes esfuerzos. El valor de viscosidad extensional medido entonces deberá ser un valor correspondiente al promedio de esfuerzos o la viscosidad extensional estacionaria en la tasa de esfuerzos nominal. Este dispositivo puede no arrojar valores correctos de esta propiedad para fluidos newtonianos. El valor debería ser de 3 y normalmente los valores arrojados van entre 2 hasta 10, o incluso 100 [10],[11].

## 2.4. Proyecto M1

Al principio de la década de los 90, se acordó realizar mediciones de la viscosidad extensional de un fluido estándar. Varios laboratorios alrededor del mundo utilizaron distintas técnicas de medición para obtener un valor de viscosidad extensional [4].

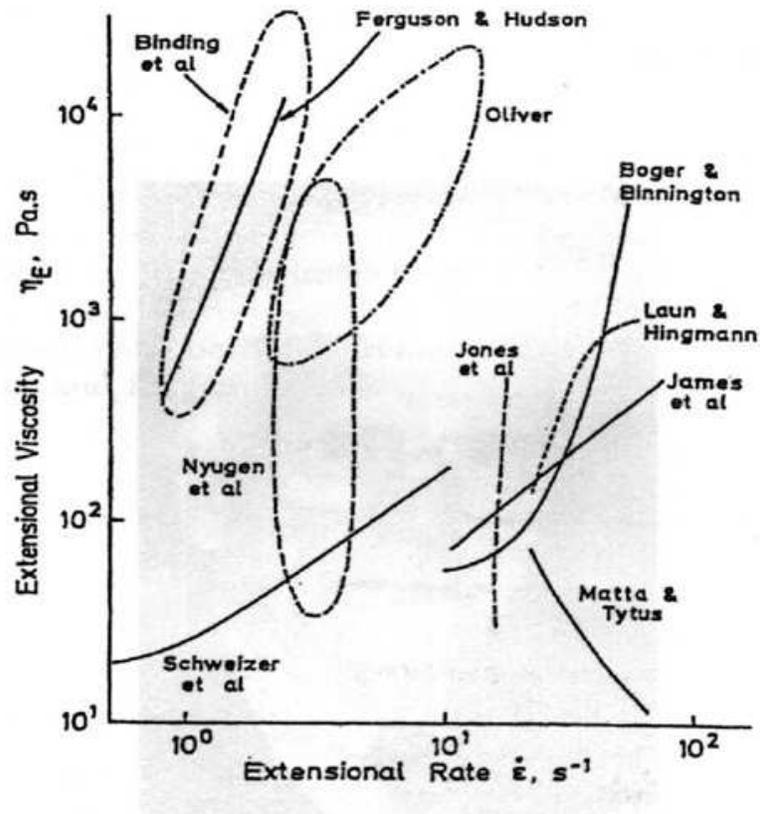


Figura 2.4: Proyecto M1, gráfica de resultados de la medición de la viscosidad extensional en función de la tasa de extensión, [4].

Binding et al.	spinline rheometer
Boger & Binnington	contraction flow
Ferguson & Hudson	spinline rheometer
James et al.	converging flow rheometer
Jones et al.	pendant drop (filament stretching)
Laun & Hingmann	opposed jets
Matta & Tytus	falling weight (filament stretching)
Nguyen et al.	filament stretching
Oliver	horizontal jet (spinning)
Schweizer et al.	opposed jets (stagnation flow)

Cuadro 2.1: Laboratorios encargados de llevar a cabo los experimentos y reportar los resultados. [4]

Se decidió formular una solución polimérica para un fluido de viscosidad constante y alta elasticidad. Dicho fluido fabricado por T. Sridhar de la Universidad de Monash en Australia se llamó “M1” . La serie de experimentos realizados para este fluido se reportaron y se resumen en la Fig 2.4. Este ejercicio demostró que todavía no se tenía un entendimiento claro de la manera efectiva para medir esta propiedad. El uso de distintas técnicas en los 10 casos presentados por los laboratorios que se muestran en el cuadro 2.1, involucraban diferentes flujos y por tanto la viscosidad extensional como función de la tasa de deformación no fue coincidente una con otra, ni en tendencia ni en magnitud.

La discusión que se llevó a cabo con respecto a esta imagen hizo que se llegara a la conclusión de que, incluso encontrando la ecuación constitutiva que modele perfectamente la reología del fluido “M1” o llevando a cabo los experimentos de manera impecable, esencialmente se obtendría la misma gráfica que se tiene en la Fig 2.4 si estamos graficando la viscosidad extensional contra la tasa de deformación. Cada resultado graficado representa la respuesta que tuvo el fluido a diferentes flujos extensionales y con una distinta historia en el flujo y por tanto cada una de las respuestas es correcta.

Es importante mencionar que aunque hoy en día la situación no es tan drámica como se muestra en la Fig 2.4 se debe decir que una de las motivaciones principales es que permanece hasta nuestros días la necesidad de un nuevo método para encontrar un valor confiable de la viscosidad extensional de un fluido viscoelástico. Sigue sin existir un método que ofrezca una solución a este problema. Esta es una de las motivaciones principales de este trabajo.

## 2.5. Extracción Selectiva

La extracción selectiva se había sido utilizado anteriormente para el tratamiento de aguas y su control de calidad. El término extracción selectiva se refiere a succionar cerca de la interface que forman dos fluidos no miscibles a través de un tubo. Este flujo formado por la succión es de interés ya que produce la deformación de la interface, como lo muestra la Fig. 2.5, cambiando la topología y llamando la atención de quienes desean clasificar estas transiciones que se encuentran en este tipo de sistemas fluídicos [1]. La transición topológica relacionada con la extracción selectiva se extiende del estudio que se realizó en la deformación de gotas y su rompimiento al ser una consecuencia directa del campo de flujo que rodea a esta [2].

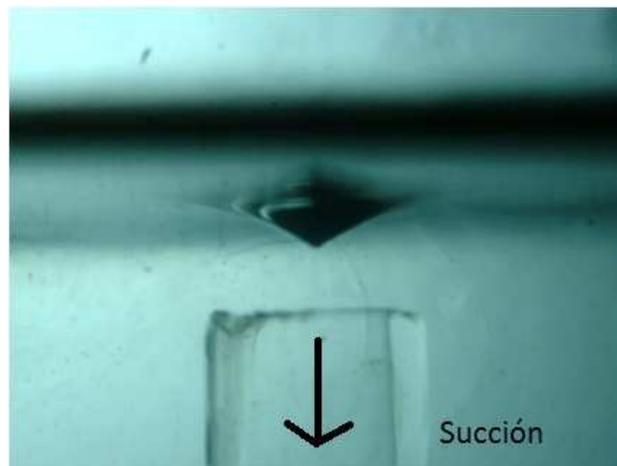


Figura 2.5: En esta figura se muestra un ejemplo de la deformación de la interface debido a la succión

La deformación que se observa a bajas tasas de flujo de succión es axisimétrica con un punto de estancamiento en la cúspide de la punta y conforme aumenta la velocidad de succión crece en altura y curvatura esta deformación. La variación de la altura y la curvatura también se puede dar reduciendo la distancia que hay entre el tubo de succión

y la superficie libre. Si se fija la distancia entre la superficie libre y el tubo de succión y visualizamos el fenómeno en un estado estacionario mientras se varía  $Q$ , siendo ésta el gasto volumétrico, se puede observar la manifestación de una singularidad [2] [8]. Es interesante observar como empieza a desarrollarse la singularidad y su dependencia tanto con la altura existente entre la superficie libre y el tubo, y la rapidez con que se succiona el fluido así como lo muestra la fig. 2.6

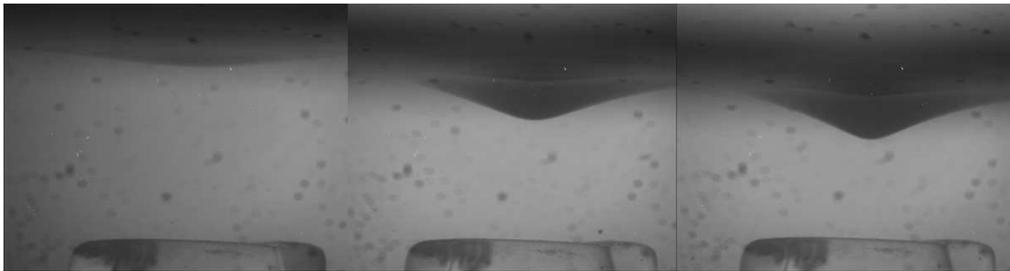


Figura 2.6: Deformación característica de la superficie conforme aumenta la tasa de succión. Aquí se observa el caso del aceite de silicón a distintas variaciones de flujo y una misma altura.



# Capítulo 3

## Arreglo Experimental

En esta sección se describe el arreglo experimental y la metodología utilizada para medir la viscosidad extensional. Para el arreglo utilizado se tomó como base el modelo de Zhou y Feng [1] que e muestra en la Fig. 3.1. Se hicieron algunas variaciones de su propuesta para facilitar las mediciones.

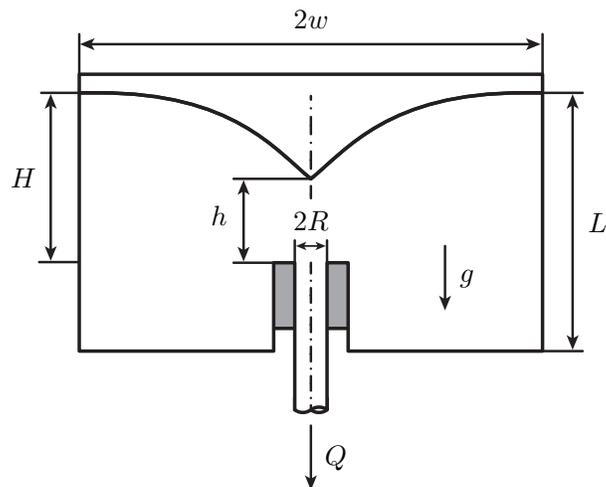


Figura 3.1: Esquema D. Zhou y J. Feng, 2010 [1]

El diseño consiste en una sección de prueba y un tanque de control conectados el uno con el otro. En este caso, se utilizó un tanque rectangular de 12x24x12 cm. La sección de prueba es de 12x12x12 cm al igual que la sección de control, la cual se dividió con baffles u obstáculos para minimizar las perturbaciones. A diferencia del modelo presentado por Zhou y Feng, aquí los tanques están conectados y la división está hecha por los baffles. Se tiene una bomba que se encarga de recircular el fluido de trabajo para mantener el nivel del fluido durante el experimento. Los fluidos de trabajo fueron reciclos con una bomba de engranes unida a un motor de 1/6 de HP, de corriente alterna. La succión de

la bomba permite observar la deformación bajo la superficie libre del fenómeno que se busca. Se utilizaron distintos tipos de bombas y la que mejores resultados dió fue la que se eligió. Las bombas centrífugas causaban problemas al aumentar la temperatura y las vibraciones eran más notorias en las mediciones. Todas las mediciones de los experimentos son en estado estacionario y se aseguraban estas condiciones con la recirculación del fluido.

En el tanque de prueba se colocó un tubo de 5 mm de diámetro exterior y 3 mm de diámetro interior a una altura de 5 cm. Posteriormente, se colocó una valvula de paso para controlar el flujo de succión. En el tanque de control se encuentra una entrada y una salida de fluido para mantener un nivel constante durante el proceso. El arreglo final quedó como muestra la Fig. 3.2.

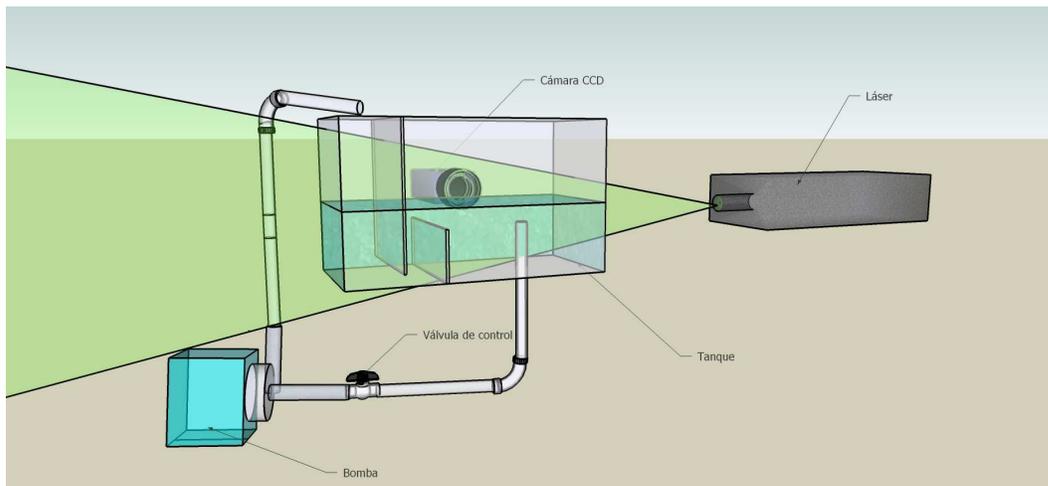


Figura 3.2: Arreglo experimental.

### 3.1. Fluidos de Trabajo

Para escoger los líquidos puestos a prueba se optó por los más comunes. En un principio se quiso utilizar agua pero la tasa de succión para poder formar la punta era muy alta y el  $Re$  aumentaba mucho lo cual hacía que el análisis al eliminar las fuerzas de inercia fuera incorrecto así como la viscosidad del agua tampoco permitió que este fuera un fluido de trabajo. Finalmente se eligieron los fluidos presentados en el cuadro 3.1 con sus propiedades respectivamente.

Fluido	Viscosidad	Densidad	Tensión superficial
Glicerina	1.392 Pa s	1260 kg/mL	0.064 N/m
Aceite de Silicón 350 cSt	0.339 Pa s	970 kg/mL	0.0211 N/m
Glucosa (Miel Karo)	3 Pa s	1380 kg/mL	5 N/m

Cuadro 3.1: Características de los fluidos newtonianos a 20°C.

La glicerina se utilizó como primer fluido newtoniano en donde ésta presentó buenos resultados y permitió que se controlara el flujo y el tamaño de la deformación. Los experimentos tenían que llevarse a cabo en sesiones muy cortas ya que la glicerina se hidrata con la humedad del medio ambiente. El aceite de silicón, por el otro lado, permitió tener muchas más mediciones que la glicerina o la glucosa ya que fue un fluido mucho más estable y fácil de controlar. Con el aceite de silicón se pudo observar la dependencia que el método tiene con las distancias antes mencionadas y con las distintas tasas de flujo que se pudo probar.

En el caso de los fluidos no newtonianos se optó primero por un polímero asociativo, estable que presenta un interesante comportamiento después de ciertas tasas de deformación y se basan en la información que está reportada en [5] y [6] para comparar que el fluido tuviera propiedades parecidas y los resultados fueran congruentes con la predicción de la viscosidad extensional que se reporta en [5]. Los fluidos no newtonianos utilizados se muestran en la tabla 3.2. con sus respectivas fórmulas de fabricación.

Fluido	Ingredientes
HASE	(Primal TT-935). Suministrado por Rohm and Haas. Trietanolamina. Se utiliza como base para ajustar el pH a 9.0 del HASE.
Óxido de polietileno	(UCARFLOC Polymer 309). Suministrado por The Dow Chemical.

Cuadro 3.2: Fluidos no newtonianos.

El HASE es un polímero asociativo que consiste en una base de poliacrilato con macro monómeros hidrofóbicos distribuidos a lo largo de ésta. A un pH bajo, el polímero existe como latex disperso insoluble en un medio acuoso. Conforme aumenta el pH se neutraliza y el polímero genera repulsión electrostática en las cargas negativas del componente principal [14].

En la figura 3.3 se muestran las pruebas realizadas a este líquido :

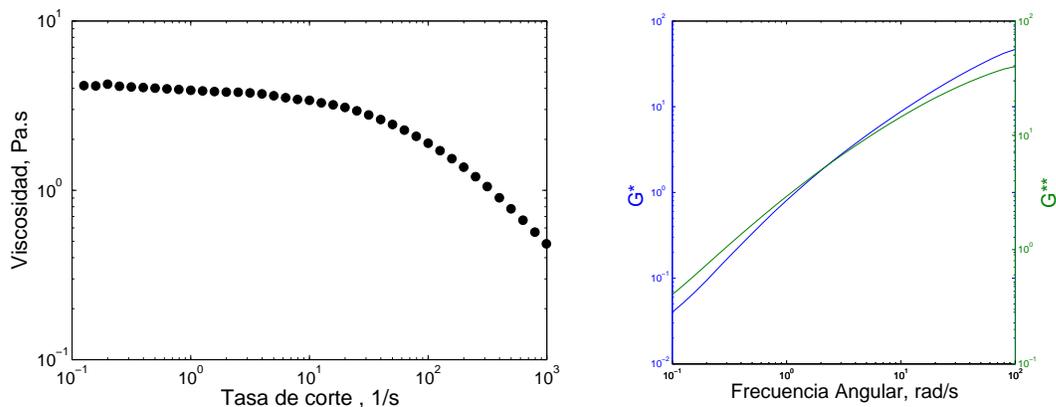


Figura 3.3: Resultados obtenidos del comportamiento del HASE a distintas tasas de corte en la caracterización reológica

La Fig 3.3 nos permite entender el comportamiento del fluido y la dependencia que tiene la viscosidad en función de las distintas tasas de deformación y evaluar la viscoelasticidad a partir de los valores de  $G^*$  y  $G^{**}$  que dan valores del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdidas respectivamente como función de la frecuencia de deformación. El

HASE se preparó a una concentración de 1.7% en peso y se agregó trietanolamina para lograr su apariencia transparente y un pH de 9.0 ya que la viscosidad es función del pH. Se dejó reposar 48 h y se le hicieron pruebas reológicas. La densidad del HASE fue de  $0.992g/cm^3$  y la tensión superficial fue de  $0.055N/m$

Una de las complicaciones importantes encontradas en este fluido fue la deformación de la punta al aumentar la rapidez de extensión como lo muestra la Fig 4.4. Esto no permitía el cálculo correcto de la curvatura en la punta.

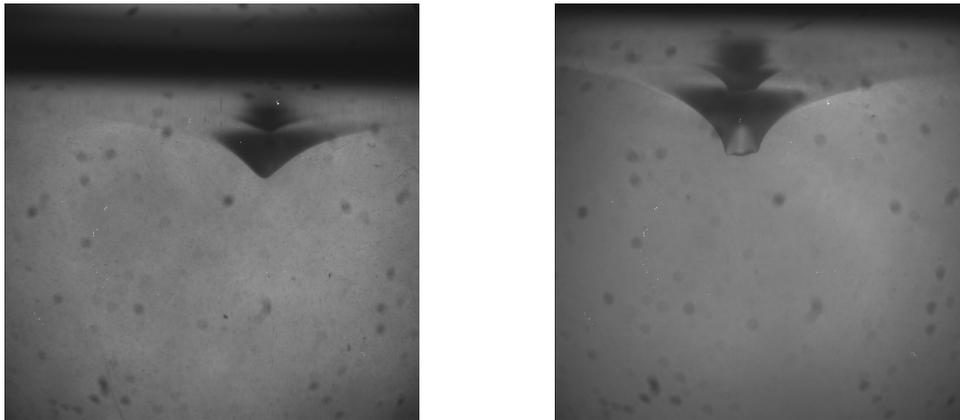


Figura 3.4: La imagen del lado izquierdo no presenta deformación en la punta como la del lado derecho a una mayor tasa de extensión

El óxido de polietileno (UCARFLOC 309), es un polímero elástico el cual se escogió a una concentración de 0.5% lo suficiente para que se notara claramente la elasticidad. La desventaja de utilizar un fluido como este fue que el rango de flujo  $Q$ , se vió limitado ya que a altas tasas de flujo la singularidad se deformaba notablemente y en lugar de ser un cono se volvía una estructura plana y sin la forma que se busca, como ocurre con las burbujas.

La caracterización reológica se muestra en la fig. 3.4.

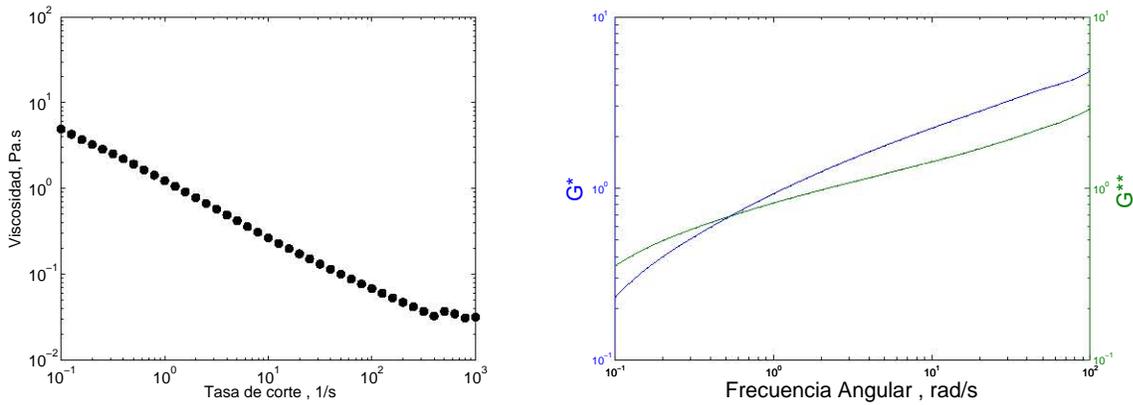


Figura 3.5: Resultados obtenidos del comportamiento del UCARFLOC 309 a distintas tasas de corte en la caracterización reológica

Teniendo como referencia la poliacrilamida a una concentración de 2 %, la cual se muestra en la figura 3.5, se pueden comparar los resultados obtenidos para una mezcla parecida como lo fue con el UCARFLOC 309. El comportamiento de la mezcla fue similar, el aumento de la viscosidad extensional en función de la tasa de deformación creció notablemente como lo hizo la poliacrilamida.

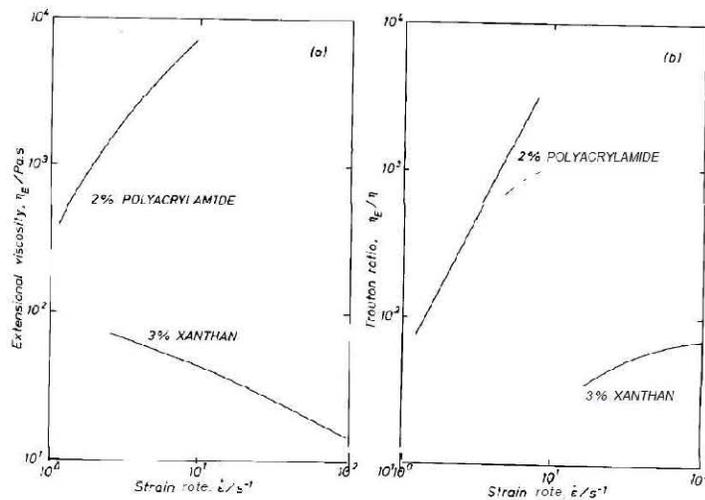


Figura 3.6: Viscosidad extensional y relación de Trouton para una concentración del 2 % poliacrilamida medido con un reómetro spine-line el cual tiene una línea que a cierta altura la velocidad no varía con respecto al tiempo[12].

## 3.2. Velocimetría por Imágenes de Partículas

En este experimento se utilizó el método de velocimetría por imágenes de partículas ya que este permite obtener los campos de velocidad del fluido alrededor de la zona de interés. Con esto se consigue el cambio de la velocidad en dirección vertical que es el dato que interesa obtener. La Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) es una técnica experimental discreta y euleriana creada para medir campos de velocidad en amplios planos de medición [13]. El equipo utilizado para realizar mediciones de PIV fue:

- Un láser, el cual después de pasar por un arreglo óptico, es transformado a una hoja láser. Con este láser se iluminan las partículas trazadoras contenidas en el plano de medición.
  
- Las partículas trazadoras, que permiten observar el flujo, son esferas de vidrio huecas, recubiertas por una capa delgada de plata con un diámetro de 10 a 150  $\mu m$  y una densidad de  $\rho = 1010 kg/m^3$ .
  
- Una cámara CCD colocada perpendicular a la hoja láser para capturar las imágenes. Dichas imágenes son procesadas por FlowManager, el cual también sincroniza el pulso del láser con la adquisición de fotos de la cámara.
  
- FlowManager, que es el software utilizado, después de obtener las imágenes tomadas con un  $\Delta t$  de diferencia temporal, obtiene un factor de escala de la medición de una distancia conocida en mm y su equivalente en píxeles en una imagen. Por cada área de interrogación o región de la malla en la cual la imagen está dividida, se aplica una correlación cruzada para obtener los vectores de desplazamiento. Se calcula un vector de desplazamiento promedio por cada área de interrogación y finalmente cada vector de desplazamiento se divide entre el  $\Delta t$  para obtener un vector de velocidad. Se realiza también en este mismo software, una validación y un filtrado para eliminar los vectores erróneos.

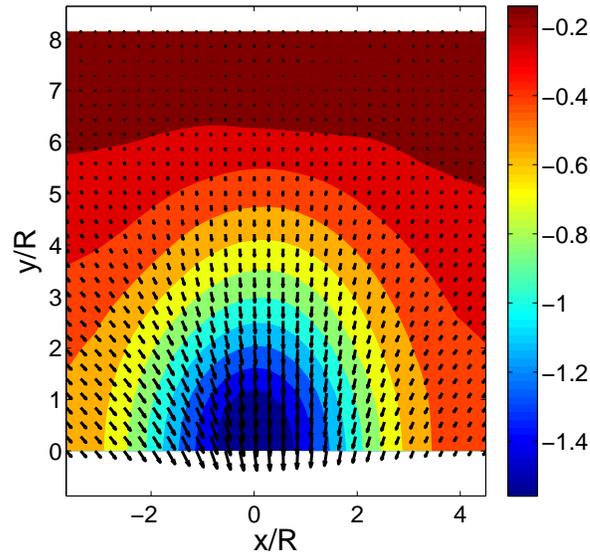


Figura 3.7: Ejemplo de los campos de velocidades típicos obtenidos en el PIV

Con estos datos obtenidos se pudo calcular la tasa de extensión localizada sobre la línea de máxima depresión de la singularidad que se forma en los experimentos. Los campos de velocidad obtenidos en la mayoría de los casos son como el que muestra la fig. 3.7 y estos nos permitieron también calcular el caudal,  $Q$ , para cada instante de tiempo.

### 3.3. Análisis Digital de Imágenes

Este análisis consiste en extraer las imágenes obtenidas por medio de la cámara CCD para medir la deformación de la interface. Por medio de un programa ejecutado con Matlab, se puede medir la curvatura que existe en la punta de la singularidad y lo importante de esto es notar la relación con la cantidad de flujo succionado por la bomba.

El programa transforma la imagen en blanco y negro y en la frontera entre ambos colores marca los puntos de la curva, al mismo tiempo coloca un marcador que debe coincidir con el punto de mayor profundidad así como lo muestra la figura 3.4. Después de haber encontrado el punto más alejado de la curva, como se tienen los puntos de la función mas no se tiene la función de la curva, por lo tanto por medio de diferencias discretas se pueden obtener los valores de las derivadas de dichos puntos y utilizar la siguiente fórmula para obtener el radio de curvatura:

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.1)$$

El programa también mide la profundidad de la depresión, desde la superficie libre hasta el punto ubicado con el marcador azul. Esta distancia es la diferencia entre la superficie libre y la punta de la deformación.

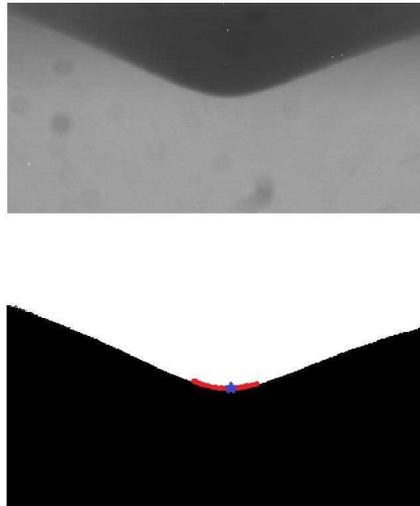


Figura 3.8: Binarización de la imagen para obtener la curvatura en el punto de máxima depresión

### 3.4. Cálculo de Viscosidad Extensional

El cálculo de la viscosidad extensional se obtiene de la relación entre la deformación de la superficie que se genera junto con las propiedades del fluido y la rapidez de extensión local generada por la succión. Siguiendo el estudio de Zhou y Feng, suponemos que debajo de la deformación de la interfaz el flujo es principalmente extensional. Podemos hacer un balance de fuerzas en la superficie libre en la punta generada[3]. Por un lado esta el esfuerzo normal generado por la presión atmosférica  $p_a$ . En el lado del fluido esta la presión  $p_1$  y un esfuerzo normal viscoso o viscoelástico  $\tau_{zz}$  en dirección vertical. En la interface esta la tensión superficial  $\sigma$ . Si denotamos la curvatura local con una  $\kappa$  la ecuacion de Laplace modificada es:

$$p_a = p_1 - \tau_{zz} + 2\sigma\kappa \quad (3.2)$$

Para determinar  $p_1$  utilizamos la ecuacion de momentum en la dirección horizontal:

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial\tau_{zr}}{\partial z} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.3)$$

Debido a que el flujo es axisimétrico,  $\tau_{\theta r} = 0$  y  $d/d\theta = 0$ . Despreciando los términos inerciales, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial r}(p - \tau_{rr}) = \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial\tau_{zr}}{\partial z} \quad (3.4)$$

Suponiendo que el flujo es uniaxial homogéneo en todo punto,  $\tau_{rr}$  sería igual a  $\tau_{\theta\theta}$  y  $\tau_{zr}$  desaparecería. Bajo este supuesto se integra desde la punta ( $r=0$ ) radialmente hasta la pared ( $r=w$ ):

$$p_1 - \tau_{rr}|_{r=0} = p_2 - \tau_{rr}|_{r=w} \quad (3.5)$$

donde  $p_2$  es la presión en el punto de la pared donde esta nivelado con la punta. Como la pared está muy lejos del tubo de succión, la tasa de deformacion local es muy pequeña por lo tanto podemos decir que  $\tau_{rr}|_{r=w} = 0$  y calcular a  $p_2$  con hidrostática:

$$p_2 = p_a + \rho g(H - h) \quad (3.6)$$

y de las ecuaciones 3.1, 3.4 y 3.5 obtenemos la primera diferencia de esfuerzos normales:

$$N_1 = \tau_{zz} - \tau_{rr} = 2\sigma\kappa + \rho g(H - h) \quad (3.7)$$

Sabiendo ademas la tasa de extensión local, medida con PIV, podemos calcular la viscosidad extensional:

$$\eta = \frac{N_1}{\dot{\epsilon}} = \frac{2\sigma\kappa + \rho g(H - h)}{\dot{\epsilon}} \quad (3.8)$$

### 3.5. Análisis de Incertidumbre

Para el análisis de incertidumbre de las diversas mediciones experimentales que se presentaron se utilizó el método que presenta Holman del análisis de datos exerimentales [15]. El método, de Kline y McClintock, presenta mayor precisión para estimar la incertidumbre en resultados experimentales. El método se basa en la cuidadosa especificación de las incertidumbres de las diversas mediciones experimentales [15].

Por si sola la medición es incierta, ya que como experimentadores tenemos una incertidumbre natural. En este método se toma un conjunto de mediciones en donde la incertidumbre de cada medición se puede expresar con la misma probabilidad. Además, las

mediciones son utilizadas para medir algún otro resultado del experimento por lo tanto, el interés también es estimar la incertidumbre en el resultado basándose en las incertidumbres de las mediciones primarias. El resultado  $R$  es una función de las variables independientes  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ; o sea:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.9)$$

Designando  $w_R$  como la incertidumbre en el resultado y  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  como las incertidumbres de las variables independientes respectivamente, entonces la incertidumbre en el resultado será dada por:

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

Para calcular la incertidumbre de nuestros casos, donde nuestra ecuación es la siguiente:

$$\eta = \frac{2\sigma\kappa + \rho g(H - h)}{\dot{\epsilon}} \quad (3.11)$$

la viscosidad nominal sería en este ejemplo:

$$\eta = \frac{2(0.0211)(0.3064) + (970)(9.81)(0.00125)}{8.1044} \quad (3.12)$$

se desarrollan los diferentes términos y obtenemos:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \kappa} = \frac{2\sigma\kappa}{\dot{\epsilon}} = \frac{2(0.0211)}{8.1044} = 5.207 \times 10^{-3} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial (H - h)} = \frac{\rho g}{\dot{\epsilon}} = \frac{(970)(9.81)}{8.1044} = 1170.54 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \dot{\epsilon}} = \frac{2\sigma\kappa + \rho g(H - h)}{\dot{\epsilon}^2} = -0.1807 \quad (3.15)$$

$$w_R = \left[ ((5.207 \times 10^{-3})(0.0002))^2 + ((1170)(0.0002))^2 + ((-0.1807)(1))^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.2957 \quad (3.16)$$

Este valor representa el 20.2 %.

La incertidumbre más grande en este caso es la de la ecuación 3.14, por lo tanto predomina sobre las demás. Esto significa que debe existir una mejora, de ser necesario, en la técnica experimental relacionada con esta incertidumbre relativa grande. Enfocarse en las incertidumbres tratando de reducirlas no nos da otorga muchos beneficios ya que debido a que se debe elevar al cuadrado el valor de cada incertidumbre cualquier mejora debe concentrarse en lo relacionado el valor que predomina.



# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Fluidos Newtonianos

Los experimentos se realizaron para distintos fluidos newtonianos. En principio se utilizó glicerina y aunque causaba muchos problemas el hecho de que la glicerina se hidrata, la bomba que se utilizaba aumentaba la temperatura de ésta hasta los  $60^{\circ}\text{C}$  por lo tanto se evaporaba la humedad.

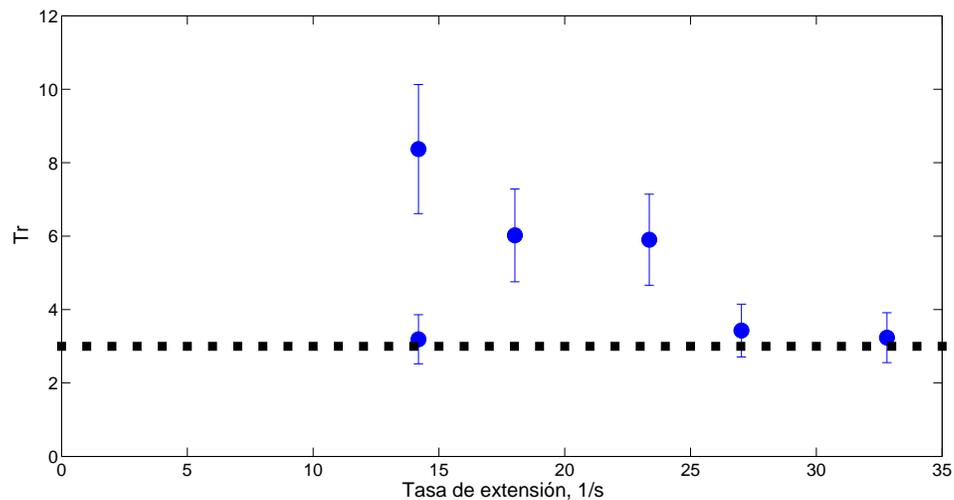


Figura 4.1: Glicerina a  $60^{\circ}\text{C}$  y a una sola altura.  $H=7.35\text{ mm}$

Después se llevaron a cabo experimentos a una temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  como muestra la Fig.4.2. Para los experimentos realizados con glicerina, se observó que para un fluido newtoniano no era fácil formar la singularidad sin encontrar problemas. Los valores encontrados para la relación de Trouton como se muestran en la Fig. 4.2 fueron cercanos a 3 principalmente a tasas de deformación más altas.

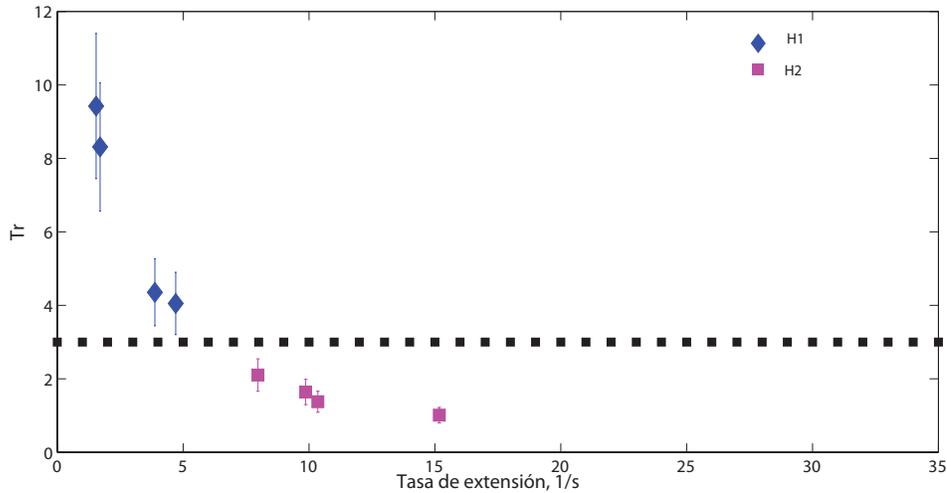


Figura 4.2: Glicerina a  $25^{\circ}\text{C}$  en dos alturas distintas donde  $H1= 4.96$  mm y  $H2= 5.25$  mm.

El error que se muestra en las Fig. 4.1 y Fig. 4.2 es la incertidumbre calculada. Posteriormente se optó por un fluido inerte, mucho más estable que no tuviera problemas con la humedad del ambiente y que al mismo tiempo requiere muchos menos cuidados, como el de mantener el tanque aislado del medio ambiente ya que se podría contaminar rápidamente, como con la glicerina. El aceite de silicón que se utilizó fue de 350 cSt y mostró un mejor comportamiento. Consistente con lo que vimos en el caso de la glicerina, en el aceite de silicón a bajas tasas de extensión el error aumenta al igual que si disminuimos la distancia a la superficie como muestra la Fig. 4.3.

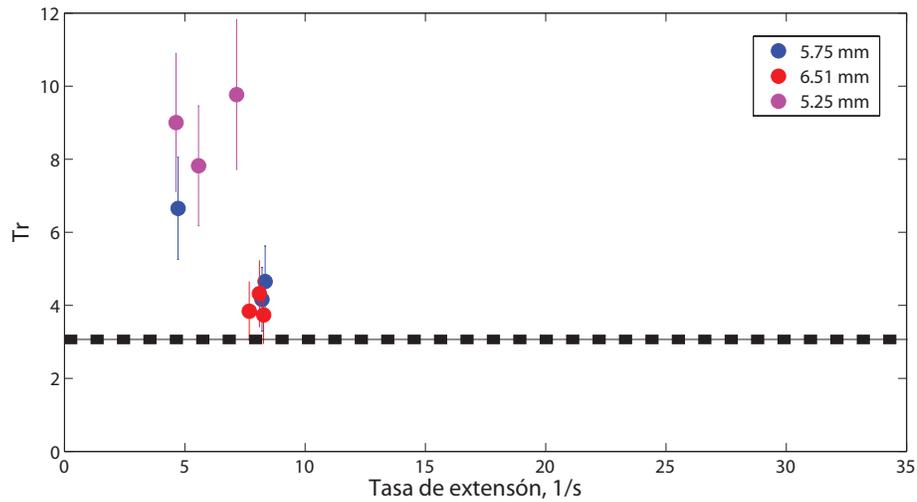


Figura 4.3: Aceite de Silicón. Aquí se observa no sólo los resultados obtenidos si no la dependencia que existe entre el error calculado y la distancia del tubo a la superficie libre. La distancia debe de ser por lo menos 2.5 veces el valor del radio

## 4.2. HASE, Caso 1 No Newtoniano

En primera instancia para el fluido de HASE, se determinó se el incremento de la punta en relación al aumento del caudal para cada caso ya que existían distintas distancias de  $H$ , entre el tubo y la superficie libre, pero en todos los caso conforme aumentaba la tasa de flujo aumentaba la profundidad de la punta como lo muestra la fig. 4.4.

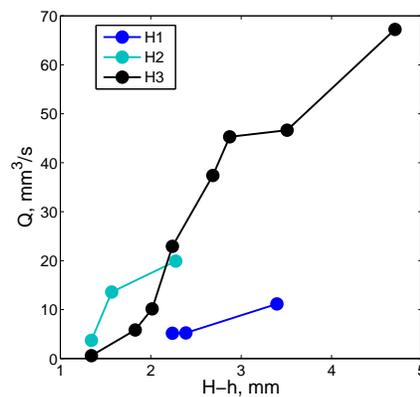


Figura 4.4: Tendencia de la profundidad de la depresión conforme aumenta el caudal.

En los resultados obtenidos, que se muestran en la Fig. 4.5 del caso del fluido HASE, podemos ver como empiezan las relaciones de Trouton en un valor muy alto y tiende

a un valor cercano a 5. El problema que se presentó con este fluido fue que las tasas de extensión manejadas por el dispositivo no eran suficientemente altas para notar con cambio en la viscosidad altas tasas de extensión.

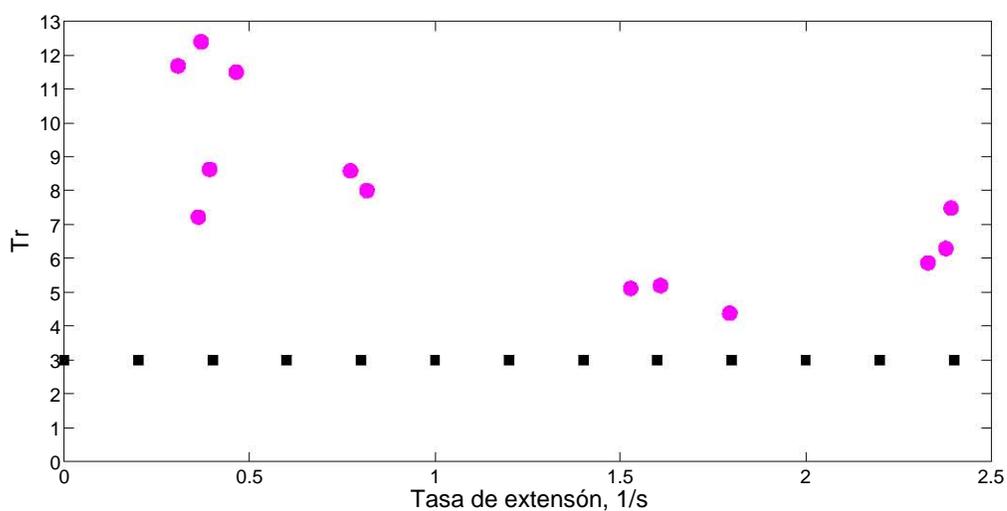


Figura 4.5: HASE a una concentración de 1,7% con un pH de 9.

El comportamiento esperado de un fluido de este tipo reportado por [5] debería ser el siguiente. Lo que ocurre en el caso que presentamos en esta tesis es que la rapidez de extensión se mantiene muy por debajo de lo que se necesita para observar el cambio de viscosidad antes mencionado. La Fig. 4.6 muestra la el comportamiento medido experimentalmente de un fluido HASE a distintas concentraciones y su predicción según el modelo BMP para cada una.

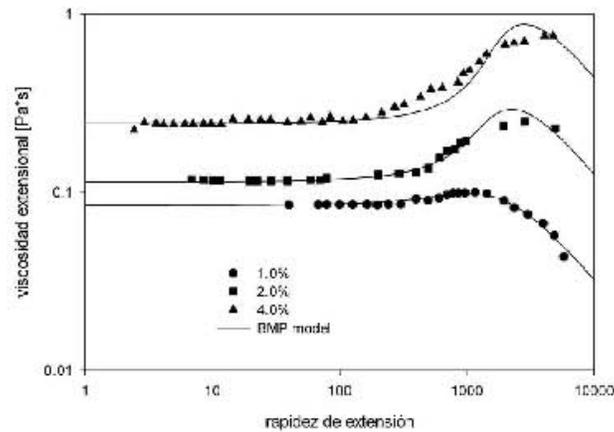


Figura 4.6: Datos experimentales de Tan *et al.* (símbolos) y predicción de modelo(líneas) [5]

### 4.3. UCARFLOC 309, Caso 2 No Newtoniano

En este caso no newtoniano se pudo observar claramente como con el aumento de la rapidez de extensión el valor de viscosidad extensional crecía ampliamente, comparado con los otros fluidos. Los valores de rapidez de extensión están muy limitados dadas las inestabilidades presentadas por la deformación pero aún así pudimos observar los efectos viscoelásticos del fluido. La Fig. 4.7 presenta los resultados obtenidos para el caso del fluido de óxido de polietileno.

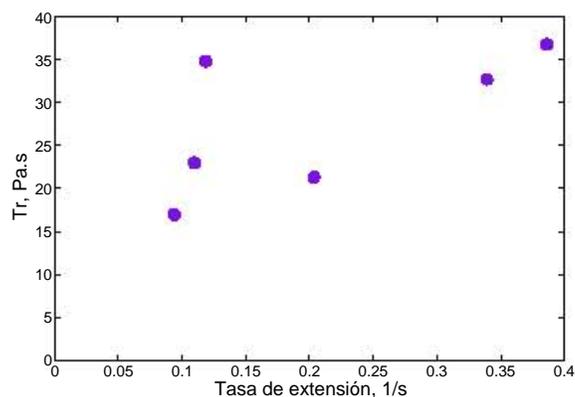


Figura 4.7: Comportamiento de la viscosidad extensional correspondiente al aumento de tasa de extensión



# Capítulo 5

## Discusión

Parte del error generado en estas mediciones se puede notar de las ecuaciones presentadas en el Capítulo 3 donde se hace el desarrollo de donde se obtiene la fórmula para obtener un valor de viscosidad extensional. Esta ecuación tiene errores de tres tipos y que se describen en el trabajo original [3]. El primer error es no tomar en cuenta los terminos inerciales de la ecuación 3.2, el segundo es establecer que  $\tau_{rr} = \tau_{\theta\theta}$  y que  $\tau_{zr} = 0$  dado que la elongación uniaxial se considero homogenea. La tercera es que suponer que hay una tasa de deformación muy pequeña en la pared. La primera y la tercera no estan tan lejos de la realidad, son casi insignificantes (al rededor del 0.1 %) pero la segunda suposición no es tan clara. En este trabajo no se introduce un término extra que representa esa corrección del error por suponer que la elongación uniaxial es homogenea pero sería algo que se tendría que hacer a futuro como ampliación de este trabajo.

Otro de los aspectos a notar importantes en este experimento es que existe una altura crítica entre el tubo de succión y la superficie libre. Esta altura debe ser suficiente como para permitir que se cree la singularidad así como para poder variar el flujo sin rebasar el punto crítico en donde el aire entra al tubo.

Es un método viable para medir la viscosidad extensional, tal vez algunas modificaciones en el tamaño de los elementos reduciría la incertidumbre y proporcionaría un valor mucho más certero. En realidad el método es muy bueno ya que es muy simple a la vista y muy amigable experimentalmente hablando. No es difícil de construir y sólo se deben mantener en cuenta algunas pequeñas especificaciones de ahí en fuera el razonamiento para obtener la medición es lógico y permite acercarse al problema de la viscosidad extensional desde un punto de vista mucho más sencillo. Esta nueva propuesta podemos decir que es válida para fluidos con viscosidades bajas, que no es un problema resuelto, y cumple con las expectativas propuestas. El objetivo de este trabajo fue probar este nuevo método y nos dimos cuenta que obteníamos valores muy cercanos a los deseados y sí puede ser una alternativa para medir la viscosidad extensional de un fluido.



# Capítulo 6

## Conclusiones

Este trabajo demuestra que existe otra técnica para medir la viscosidad extensional. Aparte de las técnicas existentes hoy en día se puede decir que el método de extracción selectiva es una alternativa más a los distintos tipos que se utilizan para medir esta propiedad. Todavía no hay un método definitivo, es por eso que deben seguir surgiendo propuestas como esta. El valor teórico que existe para los fluidos newtonianos es de 3 veces la viscosidad de corte pero no se obtiene con facilidad en ninguno de los métodos existentes. Se siguen buscando nuevas técnicas y de ahí surge el interés de este trabajo. Los resultados obtenidos demuestran que el método funciona y permite obtener valores de la viscosidad extensional tanto de fluidos newtonianos, muy cercanos a los reales, como para los fluidos no newtonianos también arroja valores que parecen tener mucha lógica y se aproximan a la realidad.



# Bibliografía

- [1] D. Zhou, J.J. Feng, Selective withdrawal of polymer solutions: experiments. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 165 (2010) 829-838
- [2] I. Cohen, Scaling and transition structure dependence on the fluid viscosity ratio in selective withdrawal transition, *Phys. Rev. E* 70 (2004) 0266302
- [3] D. Zhou, J.J. Feng, Selective withdrawal of polymer solutions: computations. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 160 (2010) 839-851
- [4] C.J.S. Petrie, Extensional viscosity: a critical discussion, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 137 (2006) 15-23
- [5] A.J. Mendoza-Fuentes, R. Montiel, R. Zenit, O. Manero, On the flow of associative polymers past a sphere: Evaluation of negative wake criteria. *Phys. of Fluids* 21 (2009) 033104
- [6] E. Soto, C. Goujon, R. Zenit, O. Manero. A study of velocity discontinuity for single air bubbles rising in an associative polymer. *Phys. of Fluids* 18 (2006) 121510
- [7] J. Ferguson, K. Walters, C. Wolff. Shear and extensional flow of polyacrylamide solutions. *Rheol. Acta* 29:571-579 (1990)
- [8] S. Courrech du Pont, J. Eggers. Sink Flow Deforms the Interface Between a Viscous Liquid and Air into a Tip Singularity. *Phys. Rev. L.* 96 (2006) 034501
- [9] D. Chehata Gómez. Estudio de la discontinuidad en la velocidad de ascenso de una burbuja en un fluido no newtoniano. 2004

- [10] C.J. Cai, P.R. de Souza Mendes, C.W. Macosko, L.E. Scriven, R.B. Secor. A comparison of extensional rheometers in: P. Moldenaers, R. Keunings (Eds), Theoretical and Applied , Rheology: Proceedings of the XIth International Congress on Rheology. Elsevier, Amsterdam vol. 2, 1992, p. 1012
  
- [11] C.G. Hermansky, D.V. Boger, Opposing-jet viscosimetry of fluids with viscosity approaching that of water. *J. Non-Newtonian Fluids Mech.* 56(1995) 1-14.
  
- [12] H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters. *An Introduction to Rheology.* Elsevier Science 1989.
  
- [13] *Flow Map PIV Installation and User's guide.* Dantec Denmark, 5th edition, 2000.
  
- [14] Tan H., Tam K.C., V. Tirtaatmadja, R.D. Jenkins, D.R. Bassett. Extensional properties of model hydrophobically modified alkali-soluble associative (HASE) polymer solutions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 92 (2000) 167-185.
  
- [15] J.P. Holoman. *Métodos experimentales para ingenieros.* McGraw-Hill 1977.
  
- [16] F. M. White. *Fluid Mechanics.* McGraw-Hill. Cuarta edición.

# Apéndice A

## Programas de Matlab

Para el valor de la rapidez de extensión:

```
clear all
```

```
%Mapas Vectoriales
path= ['G:\PIV\ESLI\im_POLYOX\im1\'];
archivo=strcat(path, 'File0001.txt');
data=load(archivo);

xpos=data(:,5);
ypos=data(:,6);

u=data(:,9);
v=data(:,10);
s=data(:,11);

U=reshape(u,28,28)';
V=reshape(v,28,28)';
MagV=sqrt(U.*U+V.*V);

X=reshape(xpos,28,28)';
Y=reshape(ypos,28,28)';
XX=X(1,:);
YY=Y(:,1);

%calculate gradients
delx=mean(diff(XX));
dely=mean(diff(YY));
[dudy,dudx] = gradient(U,dely/1000,delx/1000);
[dvdy,dvdx] = gradient(V,dely/1000,delx/1000);

%locate maximum velocity
a=max(max(abs(V)));
[r,c,e]=find(abs(V)==a);
```

*%velocity in the center*

Vel\_vertical=V(c,:);

Pos\_vertical=Y;

Ext\_rate=dvdy(c,:);

*%Distancias adimensionales con el Radio*

XX1=XX-3.8;

YY1=YY-1.32;

YY2=YY1/2.5;

XX2=XX1/2.5;

U1=U/0.0026;

V1=V/0.0026;

**figure** (1)

**clf**

[C,h] = **contourf**(XX2,YY2,V1,10,'linestyle','none');

**colormap** Jet

**hold on**

**quiver**(XX2,YY2,U1,V1,2,'color','k','linewidth',1)

**colorbar**

**axis** tight

**axis** equal

**xlabel**('x/R')

**ylabel**('y/R')

**figure** (2)

**clf**

**plot**(Pos\_vertical, Vel\_vertical\*1000,'r—')

**hold on**

**xlabel**('vertical position, mm')

**ylabel**('vertical velocity, mm/s')

**plot**(Pos\_vertical, Ext\_rate, 'b-')

epsilon\_punto= **max**(Ext\_rate)

Para obtener los valores de curvatura de la singularidad:

```
(* ::Package:: *)

clear all

path= ['C:\Users\Vaio\Desktop\PROYECTO\Imagenes\Newtoniano Mayo 2012\h2\'];
experim= ['File_0025_b.jpg'];

D=5;
scale=387/D; % pix/mm

rect=[300 250 550 200];

% read image
rawimage=imread([path experim], 'JPEG');
croppedimage=imcrop(rawimage, rect);

% IM1 = rgb2gray(croppedimage);
IM1 = croppedimage;
threshold = graythresh(IM1);
BW = im2bw(IM1, threshold*0.8);

BW2=abs(BW-1);
BW3 = imfill(BW2, 'holes');
BW1 = edge(BW, 'prewitt');

figure(1)
clf
subplot(2,1,1), imshow(croppedimage, 'InitialMagnification', 200)

% pause(0.5)

subplot(2,1,2), imshow(BW3, 'InitialMagnification', 200)

% break

dim = size(BW3);
col = round(dim(2)/2)+45;
row = find(BW(:, col), 1)-1;

connectivity = 8;
num_points = 80;
boundary = bwtraceboundary(BW3, [row, col], 'E', connectivity, num_points);

subplot(2,1,2), hold on;
plot(row, col, 'rx', 'markersize', 3)
plot(boundary(:, 2), boundary(:, 1), 'g-', 'LineWidth', 3);
```

```

% scale
xboundary=(boundary(:,2))/scale;
yboundary=(boundary(:,1))/scale;

[b,a]=butter(4,0.18);

xboundary_f=filter(b,a,xboundary);
yboundary_f=filter(b,a,yboundary);

xboundary_f=xboundary_f(20:end);
yboundary_f=yboundary_f(20:end);
plot(xboundary_f*scale,yboundary_f*scale,'r—','LineWidth',3);
plot(xboundary_f(14)*scale,yboundary_f(14)*scale,'p:');

figure(2)
clf
plot(xboundary_f,yboundary_f,'ro-')

hold on
ylabel('f(x)')
xlabel('x')

%% Calculo de la curvatura

fx=yboundary_f;
x=xboundary_f;

fxp=diff(fx);
x2=x(2:end);
plot(x2(4:end),fxp(4:end),'b-.');
[c,d]=butter(4,0.14);

fxp_f=filter(c,d,fxp);

fxpp=diff(fxp_f);
x3=x2(2:end);

plot(x3(4:end),fxpp(4:end),'k:');

plot(x2(14),fx(14),'p:');
plot(x2(14),fxp(14),'p:');
plot(x3(14),fxpp(14),'p:');

m=14;

C = abs (fxpp(m))/(((1+(fxp(m))^2))^(1.5))

%%
% Datos
sigma = 0.0321;

```

```
height_m=1.2316*0.001; %  
C_m=C*1000;  
epsilonpunto=0.3067; % 1  
% viscosidad extensional  
HETA = ((2*sigma*C_m)+(1023.2*9.78*height_m))/epsilonpunto  
Tr=HETA/0.3595
```

Para obtener la medición de la distancia entre la superficie libre y el punto de máxima depresión.

```

%close all
clear all

path = [ 'G:\PIV\ESLI\im_POLYOX\im1\ ' ];
experim= [ 'im10000_b.jpg' ];

D=5;
scale=379/D; %pix/mm

rect=[1 1 1000 800];

%read image
rawimage=imread([path experim], 'JPEG');
croppedimage=imcrop(rawimage, rect);
%croppedimage=imcrop(rawimage);

%M1 = rgb2gray(croppedimage);
IM1 = croppedimage;
threshold = graythresh(IM1);
BW = im2bw(IM1, threshold*.9);

BW2=abs(BW-1);
BW3 = imfill(BW2, 'holes');
BW1 = edge(BW, 'prewitt');
dim = size(BW3);

figure(63)
clf
subplot(2,1,1), imshow(croppedimage, 'InitialMagnification',200)

%pause(0.5)

subplot(2,1,2), imshow(BW3, 'InitialMagnification',200)

%Manual Measurement

subplot(2,1,1), text(15,15, 'First, Select surface level', ...
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'y');

surface=ginput(1);
k=line([0 dim(2)], [surface(2) surface(2)]);
set(k, 'linestyle', '—');

text(15,30, 'Select tip level', ...
    'FontWeight', 'bold', 'Color', 'r');

tip=ginput(1);
k=line([0 dim(2)], [tip(2) tip(2)]);

```

```
set(k, 'color', 'r')
```

```
height = abs(surface(2)-tip(2))/scale
```



# Apéndice B

## Presentaciones en Congresos

Abstract Submitted  
for the DFD11 Meeting of  
The American Physical Society

**Selective withdrawal as a method to measure extensional viscosity**

E. TREJO, R. ZENIT, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, J.J. FENG, University of British Columbia — The extensional viscosity of a liquid is a property that has shown to be very difficult to measure experimentally. We propose the use of the so-called selective withdrawal device to measure it. A viscous fluid layer is withdrawn from below with a tube. The suction deforms the free surface and generates an extensional flow at the entrance of the pipe. We conducted measurements of the extensional rate using PIV and related its value with the deformation of the free surface to determine the extensional viscosity. Some preliminary results will be presented and discussed for both Newtonian and viscoelastic liquids.

Roberto Zenit  
Universidad Nacional Autonoma de Mexico

Date submitted: 08 Aug 2011

Electronic form version 1.4

Abstract Submitted  
for the DFD12 Meeting of  
The American Physical Society

**Measurement of the extensional viscosity for Newtonian and viscoelastic liquids using the selective withdrawal technique** E. TREJO-PEIMBERT, R. ZENIT, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, J.J. FENG, University of British Columbia — Extensional viscosity is hard to measure. None of the existing devices offers a definite solution to determine this property for both viscous and viscoelastic liquids. This is the main motivation of this investigation: to find an alternative and reliable method to measure this property. We propose the use of a device inspired in the well-known selective withdrawal system. A viscous fluid is withdrawn near the interface from below with a tube. The suction generates the deformation of the free surface and the flow beneath is largely extensional. We conducted measurements of the extension rate using PIV and measured the surface deformation to infer the extensional stress. By knowing these two quantities the value of the extensional viscosity is calculated. We present the measurements obtained for both viscous Newtonian and several non Newtonian fluids. For Newtonian fluids, we do obtain measurements of the Trouton ratio close to 3. We observe a variety of interesting behaviors for non Newtonian liquids, which will be presented and discussed.

Roberto Zenit  
Universidad Nacional Autonoma de Mexico

Date submitted: 10 Aug 2012

Electronic form version 1.4