



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA



INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE FLUJO DE FLUIDOS  
COMPLEJOS EN FLUJO CONTRACCIÓN/EXPANSIÓN EN  
GEOMETRIA AXISIMÉTRICA A PARTIR DE LA  
OBSERVACIÓN EXPERIMENTAL DE VÓRTICES DE ORIGEN  
VISCOELÁSTICO

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO QUÍMICO

Presenta: Samuel Jayim Melamed González Pacheco

Director de Tesis: Dr. Mariano Pérez Camacho

Asesores:

Dra. Blanca Estela García Rojas

Dr. Francisco Javier Almazán Ruíz



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

Agradecimientos.....	3
Listado de figuras y tablas.....	4
Listado de simbología.....	6
Objetivo.....	8
Motivación del trabajo a desarrollar.....	8
Hipótesis.....	10
<b>Capítulo 1 Antecedentes</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Fundamentos Teóricos</b> .....	<b>11</b>
1.1.1 Introducción.....	11
1.1.2 Contracción Simple y Contracción-Expansión.....	11
1.1.3 Dinámica de Formación de los Vórtices.....	13
1.1.4 Flujo Cortante.....	17
1.1.5 Flujo Extensional.....	18
1.1.6 Caídas de Presión Presentes en una contracción-expansión axisimétrica.....	26
<b>Capítulo 2 Actividad experimental del flujo en contracción-expansión axisimétrica con fluidos newtonianos y no newtonianos</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1 Descripción del equipo experimental</b> .....	<b>31</b>
2.1.1 Zona de suministro del fluido.....	32
2.1.2 Zona de prueba.....	32
2.1.3 Zona de control electrónico.....	33
2.1.4 Zona de Recolección del fluido.....	34
2.1.5 Visualización de los Vórtices.....	35
2.2.1 Reología comparativa entre fluidos Boger y Hase.....	37
<b>Capítulo 3 Interpretación de la actividad experimental</b> .....	<b>40</b>
3.1.1 Fluidos en contracción-expansión 2:1:2.....	40
3.1.2 Fluidos en contracción-expansión 4:1:4.....	50
3.1.3 Fluidos en contracción-expansión 6:1:6.....	58
3.1.4 Fluidos en contracción-expansión 8:1:8.....	66
3.1.5 Fluidos en contracción-expansión 10:1:10.....	74
<b>Capítulo 4 Conclusiones</b> .....	<b>82</b>
Bibliografía.....	84

## Agradecimientos

*Gracias a Dios por permitirme terminar este trabajo de Tesis dándome la fuerza y la determinación para no rendirme*

*Gracias a mis padres por mostrarme que el camino no siempre es fácil y que el esfuerzo y la dedicación son las herramientas para alcanzar el éxito.*

*Gracias a mi familia que siempre me animó y estuvo para apoyarme en todo momento.*

*Gracias a mi asesor Dr. Mariano Pérez Camacho quien creyó en mis habilidades y me inspiró a buscar la mejor versión de mí.*

*Gracias a Kira que me acompañó en todas mis noches en vela y soportó mis tecleos incesantes redactando esta tesis.*

*Gracias a las personas especiales en mi vida que nunca dejaron de creer en mis capacidades y que me alentaron a dar todo de mí para concluir esto*

***Gracias a mi alma máter la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza***

*La que me dio un lugar donde me desarrollé y crecí como Ingeniero y como ser humano, el “lugar a donde perteneceré con orgullo siempre”*

## *Listado de figuras y tablas*

Figura 1.1.2-1 Esquemas de Flujo en contracción simple y contracción-expansión .....	12
Figura 1.1.2-2 Formación de vórtices en un flujo en contracción simple y en contracción/expansión .....	13
Figura 1.1.3-1 Dibujos esquemáticos de patrones de flujo de entrada observados experimentalmente.....	15
Figura 1.1.3-2 Imágenes de los patrones de flujo de entrada observados experimentalmente.....	16
Figura 1.1.4-1 Flujo cortante simple entre dos placas paralelas_(Transport Phenomena Bird, Stewart, Lightfoot, John Wiley and Sons, 1960).....	18
Figura 1.1.5-1 Diferentes tipos de flujos extensionales_(An introduction to Rheology, H. A. Barnes and K. Walters, Elsevier, 1989) .....	18
Figura 1.1.5-2 Ubicación de los diferentes tipos de flujo en una contracción-expansión axisimétrica.....	20
Figura 1.1.5-3 Diferentes zonas en donde se desarrolla el flujo mixto al paso de un fluido_a través de una contracción.....	21
Figura 1.1.5-4 Perfil de esfuerzos en diferentes zonas en el desarrollo de un flujo mixto a través de una contracción axisimétrica .....	22
Figura 1.1.5-5 Interacción de la primera diferencia de esfuerzos normales a lo largo del radio de la contracción.....	25
Figura 1.1.6-1 Diferentes tipos de caídas de presión en un sistema contracción-expansión axisimétrica.....	26
Figura 2.1-1 Equipo experimental .....	31
Figura 2.1.2-1 Placas de contracción expansión .....	33
Tabla 2.1.2-1 Relación de placas de contracción expansión .....	33
Figura 2.1.3-1 Zona de control eléctrico .....	34
Figura 2.1.5-2 Dimensiones de la cámara oscura para la visualización de vórtices .....	35
Figura 2.1.5-1 Dimensiones de la cámara oscura para la visualización de vórtices .....	35
Figura 2.1.5-3 Cámara oscura montada para lograr la visualización de los vortices .....	36

Figura 2.2.1-1 Reología Comparativa entre la solución de Hase 2.5% y un fluido de Boger .....	37
Figura 2.2.1-2 Reología Comparativa entre la solución de Hase 2.5% y un fluido de Boger .....	38
Figura 3.1.1-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 2:1:2 .....	44
Figura 3.1.1-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 2:1:2 .....	45
Figura 3.1.2-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 4:1:4 .....	53
Figura 3.1.2-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 4:1:4 .....	54
Figura 3.1.3-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 6:1:6 .....	61
Figura 3.1.2-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 6:1:6 .....	62
Figura 3.1.4-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 8:1:8 .....	69
Figura 3.1.4-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 8:1:8 .....	70
Figura 3.1.5-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 10:1:10 .....	77
Figura 3.1.5-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 10:1:10 .....	78

## *Listado de simbología*

$D_1$  = Diámetro del tubo previo a la contracción

$D_2$  = Diámetro del tubo posterior a la contracción

$L_1$  = Longitud del sensor de presión 1 a la contracción

$L_2$  = Longitud de la contracción al sensor de presión 2

$L_C$  = Longitud de la contracción

$L_V$  = Altura del vórtice

$N_1$  = Primera diferencia de esfuerzos normales en corte

$P_0$  = Presión inicial

$P_1$  = Presión en el sensor 1

$P_2$  = Presión en el sensor 2

$Q$  = Flujo Volumétrico

$R, r$  = Radio

$R_1$  = Radio del tubo de mayor diámetro

$R_2$  = Radio del tubo de menor diámetro

$R_C$  = Radio de la contracción

$R_V$  = Distancia del centro de la contracción al centro del vórtice

$V_0$  = Velocidad inicial

$V_x, V_y, V_z$  = Velocidad en los ejes x, y, z

$Z_V$  = Distancia del centro del vórtice a la placa de la contracción

## *Letras griegas*

$\gamma$  = Rapidez de Corte

$\dot{\gamma}_W$  = Rapidez de Corte en la pared del tubo

$\dot{\gamma}_{aW}$  = Rapidez de Corte Aparente en la pared del tubo

$\Delta P$  = Caída de presión

$\Delta P_E$  = Caída de presión en exceso

$\Delta P_T$  = Caída de presión total

$\eta$  = Función Viscosidad

$\eta_C$  = Función Viscosidad evaluada en la contracción

$\mu$  = Viscosidad

$\pi$  = Pi = 3.141516

$\tau_w$  = Esfuerzo en la pared del tubo

$\tau_{zz}, \tau_{rr}, \tau_{rz}$  = Componentes normales del Tensor de esfuerzos

## *Objetivo*

Este trabajo tiene como objetivo el análisis y la descripción de la dinámica de flujo de dos fluidos viscoelásticos distintos reológicamente contra un fluido del tipo newtoniano usado como referencia; el primero de los fluidos viscoelásticos posee viscosidad cortante constante y tiene propiedades elásticas (fluido de Boger), el segundo es un fluido con características adelgazantes y elásticas (fluido de Hase 2.5% W); el estudio de estos fluidos se realiza al hacerlos pasar a través de diferentes relaciones de contracción-expansión axisimétrica (2:1:2, 4:1:4, 6:1:6, 8:1:8 y 10:1:10) midiendo las distancias características de los vórtices formados en las cercanías de la contracción, con el fin de poder determinar el tipo de flujo dominante en el sistema pudiendo ser cortante o extensional y que se encuentra en constante competencia debido a los efectos del cambio de flujo dentro del sistema.

## *Motivación del trabajo a desarrollar*

Los estudios de flujos en contracción de fluidos complejos son bastos tanto experimentales como de simulación, en particular estos últimos han aportado una gran variedad de fenómenos hidrodinámicos presentes apenas perceptibles o no perceptibles durante la experimentación, que han venido a enriquecer el entendimiento de la Hidrodinámica de flujo. Sin embargo, los estudios experimentales de fluidos complejos en gran medida han dictado tendencia a las investigaciones teóricas tendientes a explicar reológicamente el comportamiento hidrodinámico del fluidos a su paso por la contracción, estudios de caída de presión total vs rapidez de corte han puesto de manifiesto la importancia de la naturaleza viscoelástica de un fluido en el desarrollo del flujo cortante o extensional que desarrolla un fluido a su paso por la contracción, los estudios de caída de presión en exceso adimensional han venido a dilucidar el momento en que un tipo de flujo cortante o extensional domina sobre el otro permitiendo calcular reológicamente propiedades de transporte tales como la viscosidad, rapidez de corte o rapidez de extensión.

Una de las respuestas más intrigantes que se han observado desde el punto de vista experimental y reproducidos muy fidedignamente por su contraparte teórica es la formación de vórtices, y más aún, vórtices de variada naturaleza y forma que se manifiestan en lugares y magnitudes diferentes.

En este trabajo se considera que la formación de vórtices se desarrolla una hidrodinámica muy particular en la contracción y que está relacionada con la hidrodinámica de flujo explicada a partir de estudios de caída de presión total y en exceso, que debe entenderse antes de concluir un comportamiento reológico de un fluido complejo a su paso por la contracción, la explicación de la formación de vórtices abre una ventana de observación complementaria de gran utilidad en el entendimiento del flujos en contracción.

En esta investigación se parte de la primera explicación y más aceptada acerca de la formación de vórtices dada por White-kondo (20), en el sentido de que estos son la consecuencia de la liberación de esfuerzos de origen viscoelástico, y más aún, se considera que la formación de estos vórtices surgen como una consecuencia de una imposibilidad de disipar energía de origen viscoso producto de la interacción fluido-pared de la contracción, sobre todo aquellos fluidos que siendo elásticos presentan una viscosidad de corte constante como lo son los fluidos de Boger.

## *Hipótesis*

1. Si la liberación de energía para los fluidos viscosos y viscoelásticos depende en gran medida de interacciones del fluido con la pared y la viscoelasticidad, entonces una condición para la liberación energética que supere las posibilidades de liberación de energía a partir de la caída de presión dará como origen a la formación de vórtices.
2. Si la formación del corner vortex es un mecanismo de liberación de energía en el cual se desplazan las líneas de corriente cortantes hacia afuera de la contracción en dirección a las paredes de la tubería superior, entonces ante la necesidad de liberar una mayor cantidad de energía por parte del sistema que supere este mecanismo de liberación energética, será necesaria la aparición de un nuevo mecanismo existente exclusivamente en la contracción, en el que compitan los esfuerzos extensionales y cortantes que darán inicio a la aparición de un vórtice secundario naciente en el labio de la contracción.
3. Si para un fluido viscoelástico de viscosidad constante existe en todo momento la competencia entre el flujo cortante y el flujo extensional en la contracción y que da origen a la formación de corner vortex y lip vortex, entonces para un fluido adelgazante a relaciones de contracción alta, la competencia gobernante será entre el adelgazamiento del fluido y la elasticidad dando origen exclusivamente a vórtices del tipo corner vortex.

# **Capítulo 1 Antecedentes**

## **1.1 Fundamentos Teóricos**

### **1.1.1 Introducción**

Existe una gran cantidad de flujos que se presentan en la cotidianidad de la vida diaria, además de una gran cantidad de fluidos que se transportan mediante esta gran variedad de flujos presentando una diferencia significativa en cuanto a las propiedades mostradas en cada una de sus etapas correspondientes para cada uno de estas diferentes situaciones de flujo; por la razón anterior frecuentemente en las operaciones de procesado de polímeros se encuentra presente el flujo extensional y que se requiera conocer la forma en que la viscosidad del fluido afecta al flujo y su recorrido del fluido a través de una contracción.

La sección que a continuación se muestra busca sentar las bases principales para el entendimiento del trabajo posterior, mencionando los puntos más destacables e importantes de los flujos cortante y extensional además de las características que estos poseen.

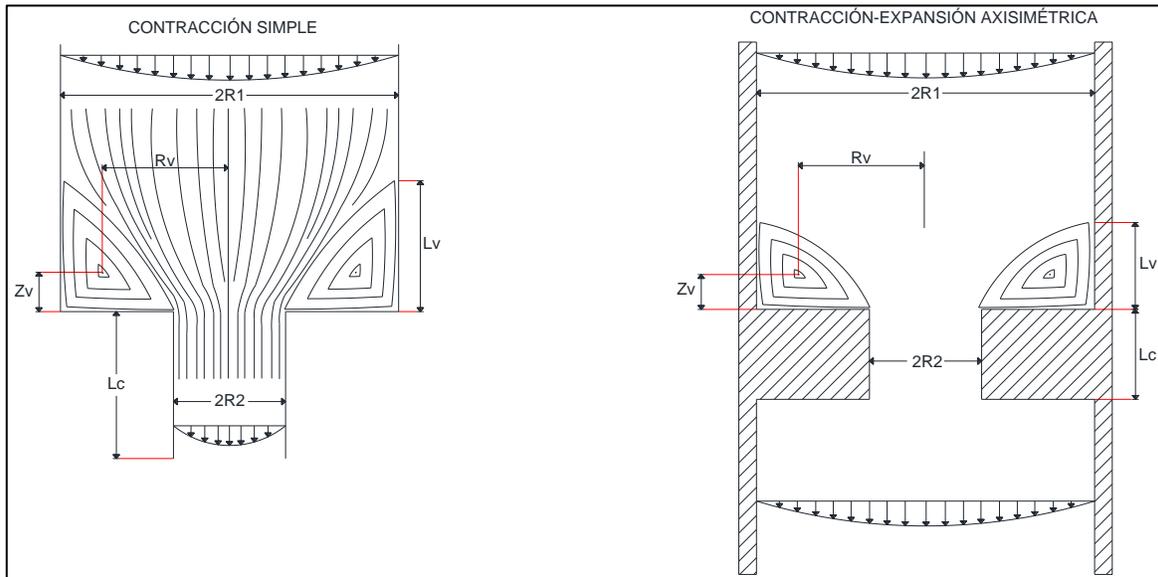
### **1.1.2 Contracción Simple y Contracción-Expansión**

Los fluidos en contracción simple y contracción-expansión son los que más han sido estudiados por diferentes autores desde el apartado teórico hasta el práctico, luego de que Cable y Boger presentarán sus estudios. En la figura 1.1.2-1 presentada a continuación se pueden observar ambos tipos de sistemas en los cuales se aprecian las características propias de cada uno.

Una de las características de mayor importancia para la contracción simple y la contracción-expansión es que cuando se hace pasar fluidos viscoelásticos a través de estos sistemas se puede notar la formación de vórtices que se presentan justo al llegar a la contracción, en las paredes y la base de la contracción.

En ambos sistemas se puede notar como el fluido entra desde la parte superior pasando por un Radio  $R_1$  con un flujo cortante simple avanzando hacia una sección con un espaciado menor, el fluido se contrae de forma radial al tener que pasar por la contracción con un radio  $R_2$ . Antes de que el fluido llegue a la contracción se

forman vórtices, de estos las medidas importantes que se toman en cuenta para poder estudiarlos son las siguientes:

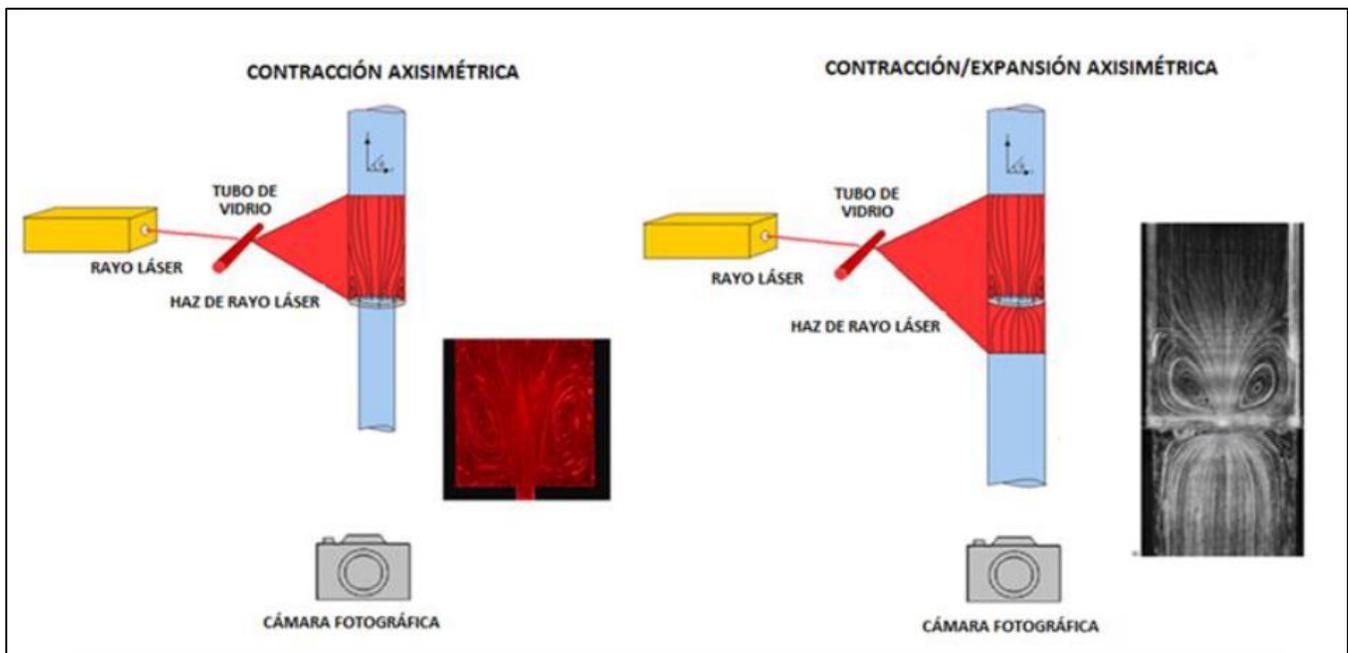


**Figura 1.1.2-1 Esquemas de Flujo en contracción simple y contracción-expansión**

- 1)  $Z_v$ : Es la distancia del centro del vórtice hacia la base de la contracción.
- 2)  $R_v$ : La distancia que tiene del centro del Flujo que pasa por el Radio previo a la contracción hacia el centro del vórtice.
- 3)  $L_v$ : Cuya distancia mide el largo del vórtice desde la base de la contracción hasta su máxima elevación que posee el mismo.
- 4)  $L_c$ : Representa el largo de la contracción, desde el inicio hasta el fin de la misma.

Es importante mencionar que para ambos casos, el fluido luego de pasar por la contracción llega a un punto donde recupera sus propiedades de flujo cortante donde se forman de nuevo los perfiles de velocidades dependiendo de la velocidad máxima que se posea en el sistema en ese momento, llegando así a un punto donde se recupera el régimen de estado estacionario, teniendo en cuenta que para el sistema de contracción simple el contenido energético de esta sección del sistema será diferente al contenido inicial; mientras que para un sistema de contracción-expansión el contenido energético tenderá a ser recuperado gradualmente al expandirse de nuevo el fluido, llegando a la condición previa que se tenía en el sistema previo a la contracción.

La fotografía de los eventos llamados vórtices es particularmente importante ya que nos permite determinar y estudiar las líneas de trayectoria que van a tomar las corrientes que conforman a este fenómeno; para poder capturar este tipo de eventos se toman las fotografías en un lugar oscuro y se hace pasar un haz de luz a través de un cilindro de vidrio, el cual descompone el haz de luz, volviendo una versión en forma de lámina de luz que permite iluminar la zona que nos interesa en cuestión, el tipo de cámara que se suele utilizar para realizar estas fotografías es una de tipo réflex que toma una gran cantidad de imágenes y las sobrepone entre ellas, generando una imagen en base a las diferentes que se han capturado; un ejemplo de estas fotos se puede ver en la figura 1.1.2-2 presentada a continuación.



*Figura 1.1.2-2 Formación de vórtices en un flujo en contracción simple y en contracción/expansión*

La visualización de estas fotografías permite darle un sentido más físico de la formación de los vórtices, dependiendo su formación de estos, así como de sus características de la naturaleza reológica del fluido, el No. De Deborah con el que se operé y de la relación de contracción simple o de contracción-expansión que se esté estudiando.

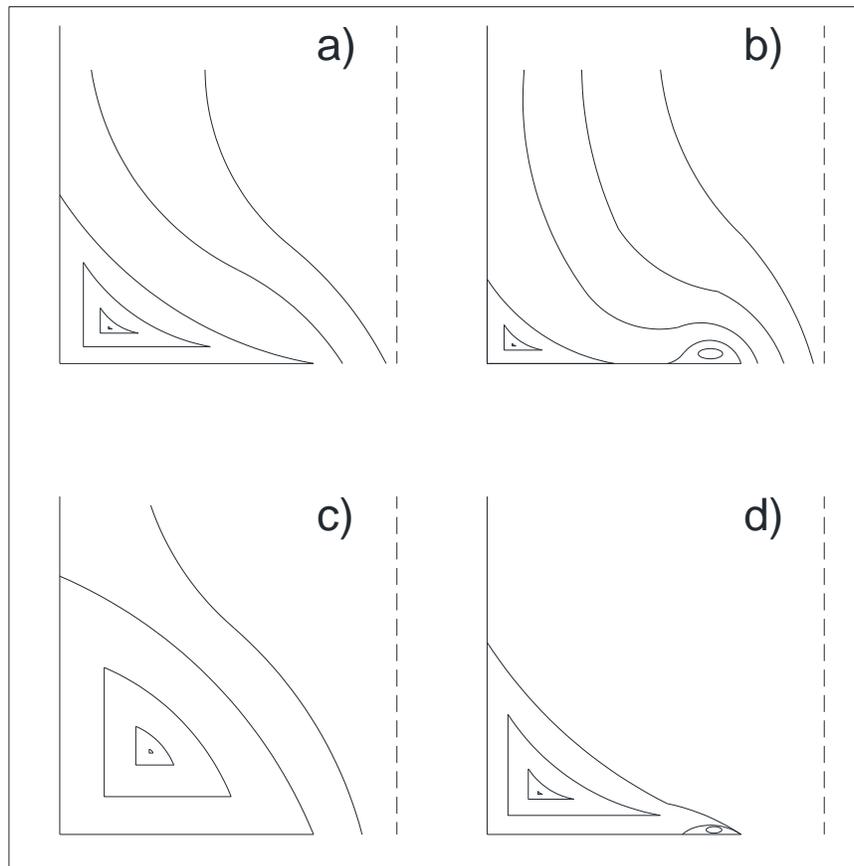
### 1.1.3 Dinámica de Formación de los Vórtices

Las altas caídas de presión a la entrada de un sistema contracción-expansión son el principal motivo de la formación de vórtices en estos se pueden ver reflejadas

algunas de las propiedades del fluido el cuál es manejado en el sistema, debido a que cada uno de estos a diferentes condiciones estacionarias le dará un tamaño específico además de una forma específica a los vórtices formados en la contracción, por lo que las longitudes que resultan características en la formación de los vórtices serán diferentes. Un vórtice es una forma de liberación de energía, la formación de un vórtice se debe a que la energía que se encuentra en la parte superior del tubo a un flujo que se encuentra a régimen permanente es más que la que el fluido va a requerir para lograr pasar por la contracción, por lo que mediante la generación de vórtices de diferentes características, se puede liberar este excedente de energía, dependiendo de las condiciones de flujo y el fluido que se manipula; mencionando a su vez que la forma en que un fluido newtoniano libera la energía es mediante la fricción con las paredes, mientras que un fluido no newtoniano, para este caso de estudio, un fluido viscoelástico que será mediante la generación de vórtices y la fricción con las paredes; así mismo aunque son diferentes en características y modelos los fluidos newtonianos y los no newtonianos se sabe que a velocidades de flujo lo suficientemente bajas, todos los fluidos sin importar sus individualidades exhiben el patrón de línea correspondientes a los flujos newtonianos; sin embargo, a medida que las velocidades de flujo se incrementan y se modifican a valores más altos, se pueden observar una variedad de patrones diferentes.

En la Figura 1.1.3-1 podemos apreciar varias representaciones de esquemas en variedad de condiciones, el patrón mostrado en (a) es un *Corner Vortex* siendo el más común y de los primeros en formarse en un fluido viscoelástico; el fluido mostrado en (b) es la aparición de un pequeño vórtice en el labio de la contracción que aparece en ciertas ocasiones cuando existe una transición de flujo, compartiendo espacio con un *Corner Vortex* coexistiendo ambos vórtices durante algunos valores de gastos; en el esquema de (c) se muestra uno de los vórtices que es más común en las experimentaciones con fluidos viscoelásticos donde el vórtice crece de tamaño a medida que el gasto aumenta, en ese mismo crecimiento el fluido viscoelástico va fluyendo a través del embudo que incrementa su tamaño a medida que el flujo aumenta; en (d) se puede observar la forma en la cual un *Lip vortex* se

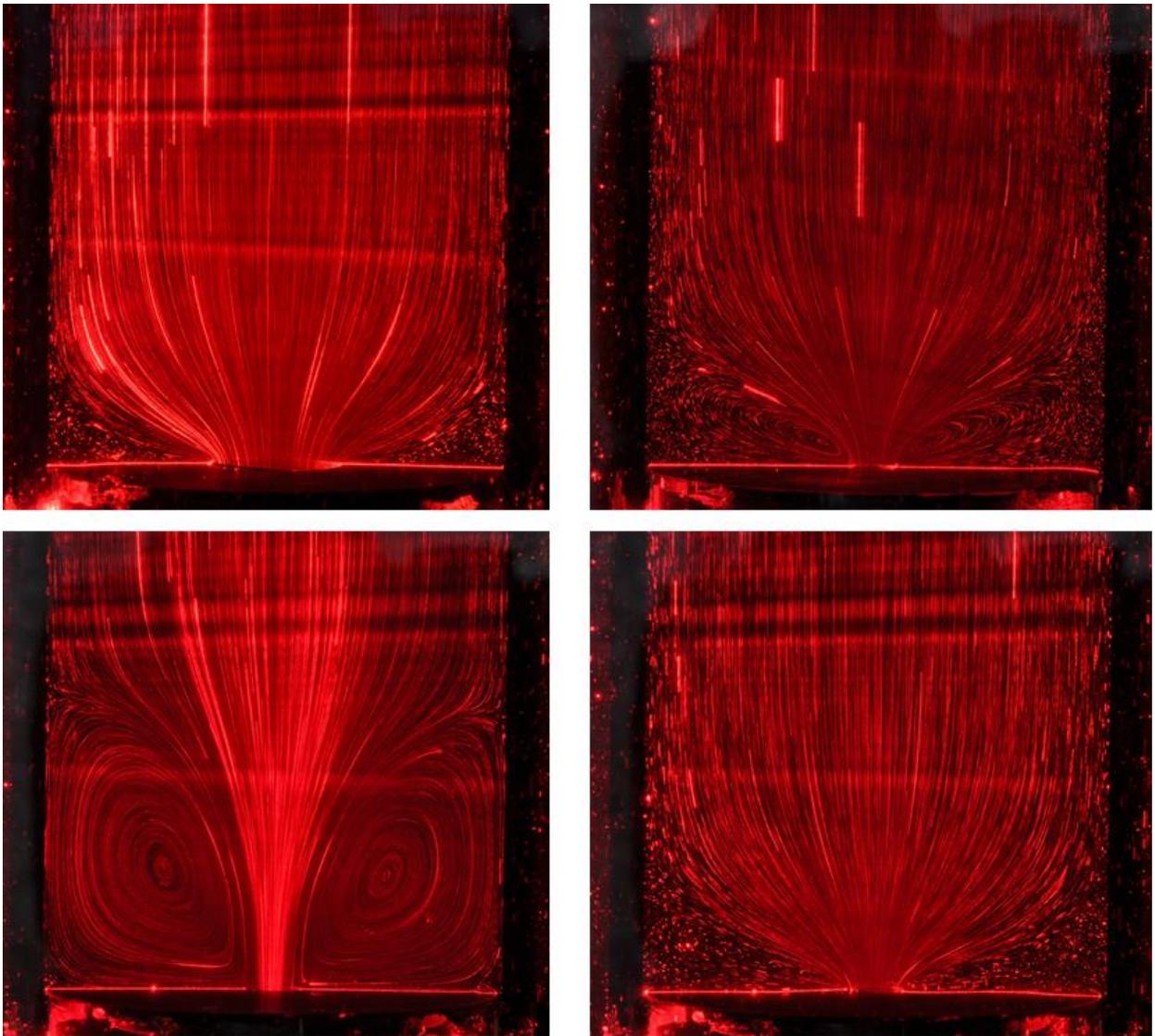
presenta como un vórtice secundario en donde ya existe un *Corner Vortex* ya desarrollado, el vórtice secundario irá en crecimiento a medida que aumente el gasto permitiéndole absorber al vórtice primario convirtiéndose poco a poco en el único vórtice.



**Figura 1.1.3-1 Dibujos esquemáticos de patrones de flujo de entrada observados experimentalmente.**

La longitud de crecimiento axial del vórtice " $L_v$ " es la más importante para conocer el comportamiento del fluido mientras se desarrolla el flujo a través del ducto, es obtenida a través del límite superior del vórtice hasta la base de la contracción, por lo que entre más crezca esta de tamaño podríamos hacerlo indicativo de que la cantidad de energía que ha resultado disipada al entorno es mayor.

Se puede tomar en cuenta que el tamaño y forma de los vórtices que han de presentarse en un sistema depende del número de Deborah con el cual se maneja el sistema. Así tenemos que a números de Deborah bajos podemos percibir los vórtices más comunes, los conocidos como vórtices de labio o *Lip Vortex* los cuales tienen como una de sus características el crecimiento a lo largo de los bordes de la contracción. Los vórtices de Esquina o *Corner Vortex* se pueden considerar a sí mismos como una evolución de los *Lip Vortex* debido a que se presentan con números de Deborah mayores y se caracterizan en que éstos van en crecimiento a lo largo de los tubos con un diámetro mayor antes de la contracción. Además de los



*Figura 1.1.3-2 Imágenes de los patrones de flujo de entrada observados experimentalmente.*

dos tipos de vórtices anteriores se puede hacer mención también de un tercer tipo de estos, el cual se llama vórtice secundario, este se caracteriza por un crecimiento sobre la zona exterior del labio de la contracción, sin embargo no es del tamaño del que sería un vórtice primario, además que es acompañado de la reducción de la distancia  $L_v$  existente en el vórtice primario, el vórtice secundario irá creciendo hasta llegar al punto de incorporar a si mismo al vórtice primario logrando una única manifestación del vórtice, esto se presenta a valores de número de Deborah altos.

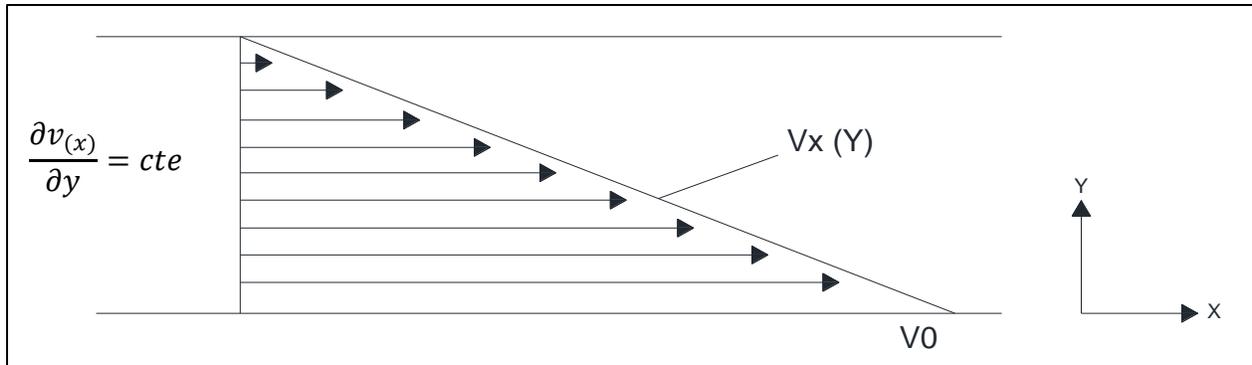
Considerando las siguientes dos distancias que también pueden hablar de las características de los vórtices que se presentan en el sistema, la distancia  $R_v$  está encargada principalmente de medir el desplazamiento del centro del vórtice hacia las paredes de la sección de mayor diámetro, hablándonos directamente del grado de la transición existente de un tipo de vórtice que pasa de *Lip Vortex* a *Corner Vortex* o viceversa, y que se encuentra relacionado al tipo de flujo que gobierna a la contracción; así mismo la distancia  $Z_v$  presenta una explicación similar a la que existe en la longitud  $L_v$  con la diferencia que ahora no va del límite del vórtice a la base de la contracción sino del centro del vórtice hacia la base de la contracción.

#### **1.1.4 Flujo Cortante**

Este flujo es causado por fuerzas exteriores al fluido en cuestión, estas fuerzas se encargan de que cada una de las capas adyacentes del fluido se muevan a distintas velocidades, provocando una diferencia en su perfil, reafirmando que es principalmente provocado por las interacciones del fluido con las paredes.

Podemos explicar este tipo de flujo de una forma más sencilla si lo describimos con un par de placas paralelas entre si con una distancia  $L$  con un fluido entre ellas, considerando la distancia entre ambas placas tan pequeña que es capaz de generar un perfil de velocidades de forma lineal rectilíneo de manera que en el diagrama de dos dimensiones se vea que cuando se mueva la placa inferior a una velocidad  $V_0$  siendo está la velocidad máxima en el sistema y que considerando bajo esta

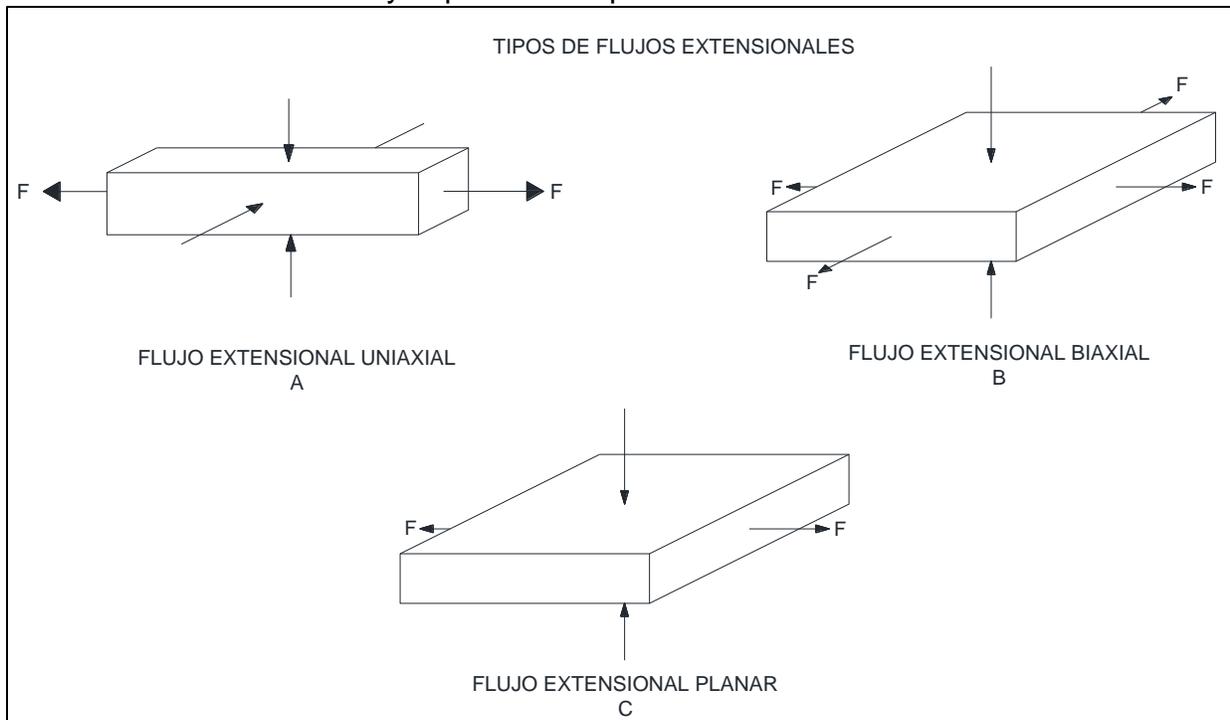
suposición que, de esta forma, la gradiente de las velocidades es proporcional y constante.



*Figura 1.1.4-1 Flujo cortante simple entre dos placas paralelas  
(Transport Phenomena Bird, Stewart, Lightfoot, John Wiley and Sons, 1960)*

### 1.1.5 Flujo Extensional

El flujo extensional es un tipo de flujo al cual se le conoce como un flujo que es libre de corte, es decir que no existe en él un flujo cortante y que en tipos de eventos como los de contracción y expansión no presentar vorticidad.

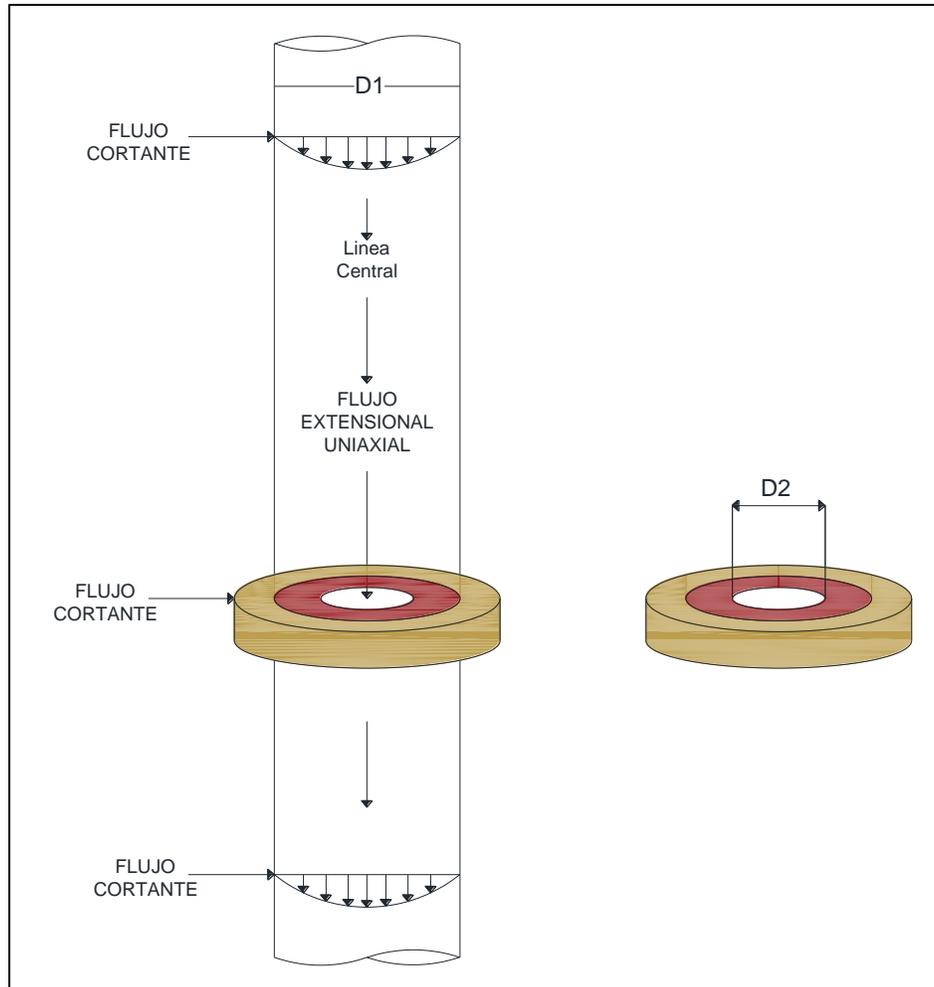


*Figura 1.1.5-1 Diferentes tipos de flujos extensionales  
(An introduction to Rheology, H. A. Barnes and K. Walters, Elsevier, 1989)*

Existen al menos tres tipos de flujo extensionales conocidos, el primero de ellos es el extensional uniaxial, el cual consiste de dos fuerzas que lo estiran de forma contraria en una misma dirección de forma que va reduciendo el grosor que posee a lo largo del mismo fluido; en el flujo extensional biaxial las fuerzas se distribuyen en cuatro, cada una con su correspondiente de sentido opuesto y dos más en sentido perpendicular a esta, partiendo de un origen que puede ser el centro del fluido, estirando el fluido en diferente dirección perpendicular a su par de fuerzas correspondiente; por último está el flujo extensional planar donde la fuerza hacia donde se mueve el fluido es en todas las direcciones alrededor de una superficie.

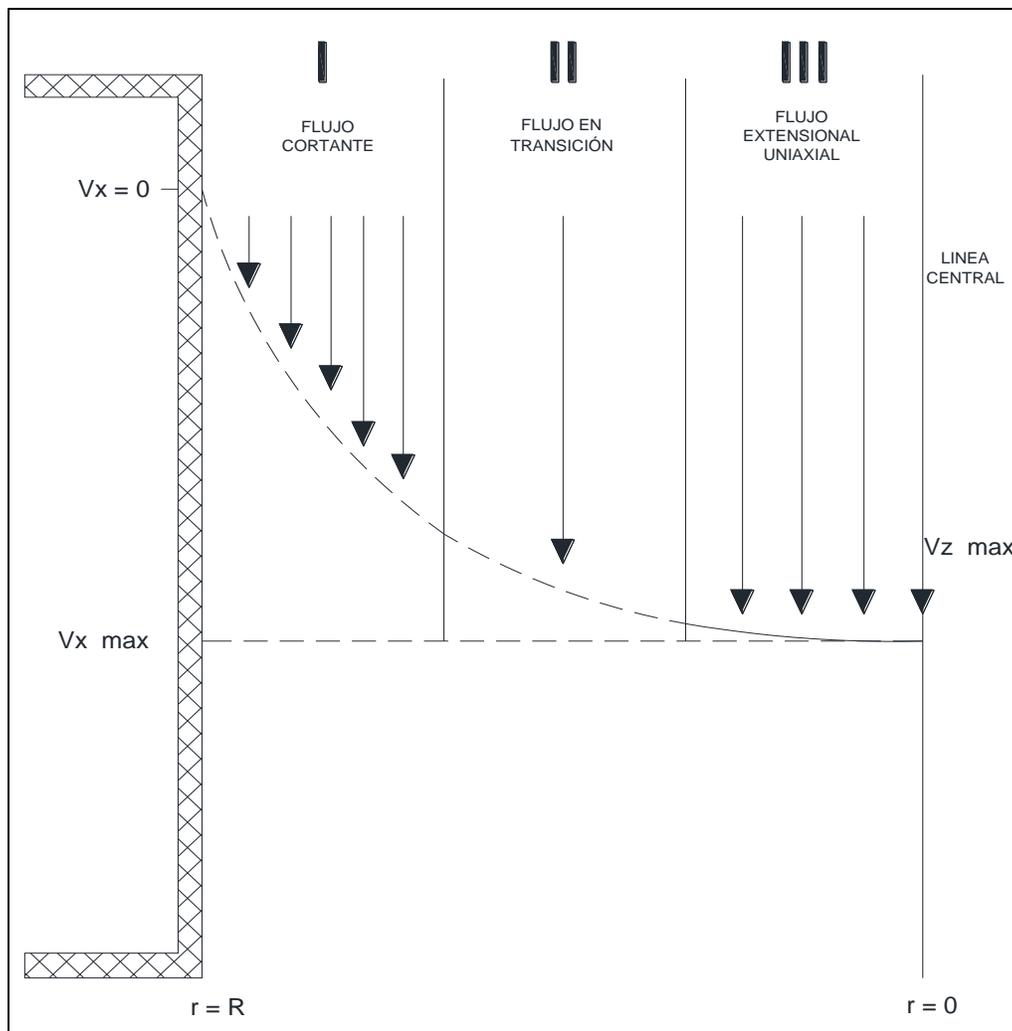
Un flujo extensional uniaxial que es puro se puede encontrar en la línea central de un proceso que posee un evento de contracción-expansión, en este no se presenta acción alguna de vorticidad ni de alguna forma de acción de corte sobre él; en el caso que se presenta cuando el flujo en contracción-expansión es constante se genera una fuerza de tensión que actúa entre el inicio y el final de la contracción, resultando en la caída de presión medida en la zona de contracción multiplicada por el área del orificio.

Cabe destacar que el tipo de flujo extensional uniaxial suele presentarse en los procesos de contracción-expansión de un sistema que maneja un fluido viscoelástico, creando una condición conocida como flujo mixto en el cual la línea central es un flujo extensional axisimétrico mientras que en las paredes su comportamiento es de naturaleza cortante, ambos tipos de flujo coexisten permitiendo esta condición, permaneciendo en constante competencia por la predominancia del tipo de flujo en un evento de contracción; en la Figura 1.1.5-2 podemos notar como es que este flujo se presenta a lo largo del ducto y como pasa a través de la contracción.



*Figura 1.1.5-2 Ubicación de los diferentes tipos de flujo en una contracción-expansión axisimétrica*

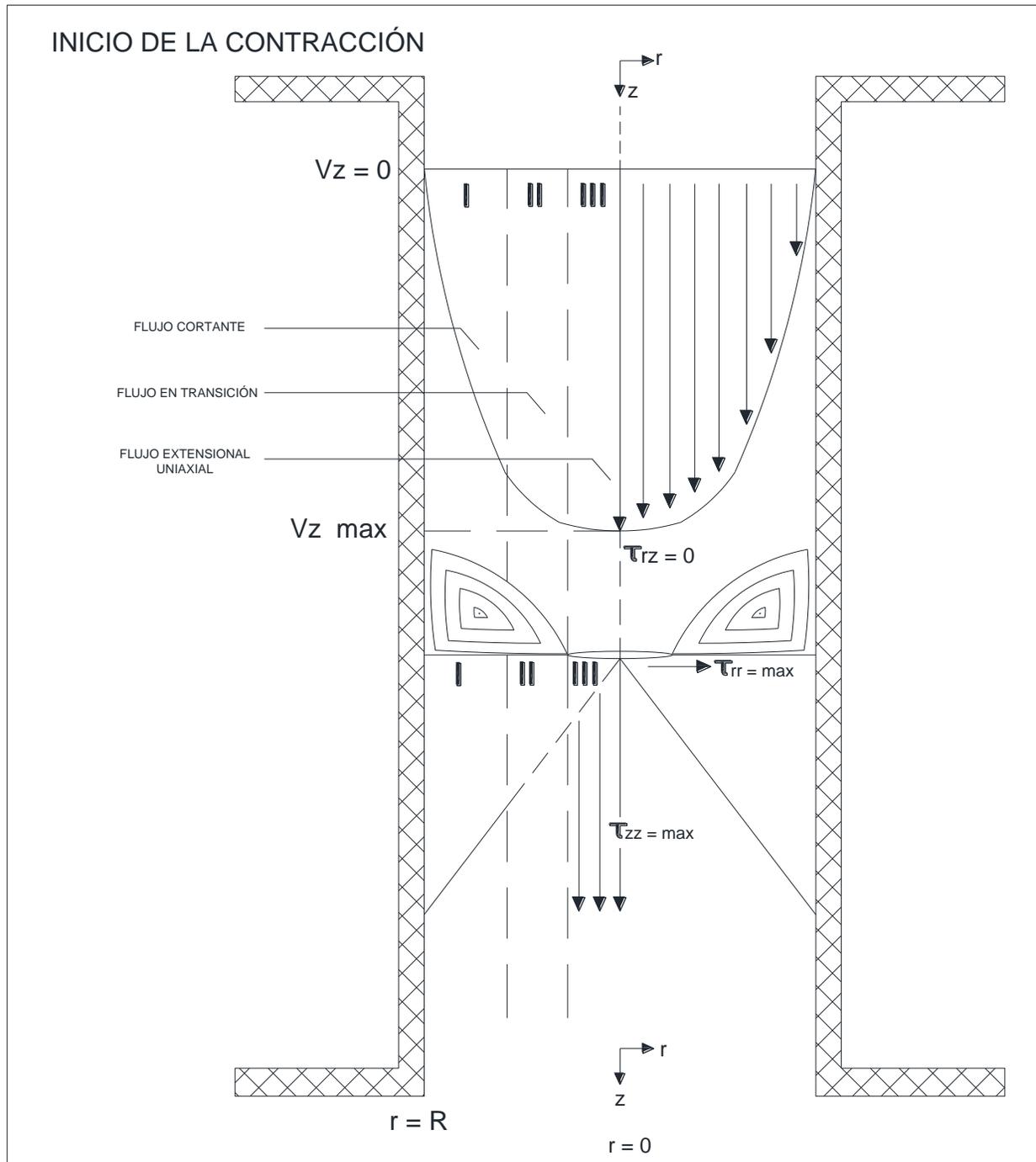
El flujo de la parte central surge debido al intento por parte del fluido proveniente del tubo con mayor diámetro a pasar a través de la contracción, en su intento, este forma una especie de cono, orientando las corrientes de flujo previo a la contracción hacia el centro de la misma, entrando en la línea central libremente formando un flujo extensional puro representado en la zona III de la contracción representada en la figura 1.1.5-3, a medida que este flujo extensional puro se aleja del centro, las líneas de corriente pasan en primera instancia a ser un flujo en transición, en donde las líneas cercanas al centro tienen propiedades similares a las del flujo extensional, sin ser idénticas a este, mientras que las que van alejándose y se encuentran más cercanas a las corrientes próximas a las paredes presentan características más similares a las del flujo cortante, sin embargo hay que considerar que las propiedades reológicas que presentan son inciertas en esta zona de transición que



**Figura 1.1.5-3** Diferentes zonas en donde se desarrolla el flujo mixto al paso de un fluido a través de una contracción.

está representada con la zona II de la contracción, representada en la figura 1.1.5-3 y conforme su paso va hacia las paredes de la contracción el fluido comienza a acentuarse más en la naturaleza de flujo cortante que éste presentará, frenando su velocidad hasta la pared misma de la contracción por la cual estará pasando, representada con zona I de la figura 1.1.5-3. La longitud que tendrá cada zona es incierta y dependerá de la presión así como del fluido que transporta el sistema, donde se podrá observar la predominancia de alguna zona sobre otra pudiendo observar con claridad aquellas zonas que presentan los flujos en estado puro, estando estos en la pared y la línea central. El conjunto de estas tres zonas es lo que se denomina como flujo mixto que estará en función de la rapidez de corte que el sistema posea, si el flujo es bajo en la contracción predominará un flujo mixto de

corte, mientras que si el flujo aplicado en la contracción es alto la predominancia será por parte del flujo extensional uniaxial. El flujo mixto igualmente se puede ver afectado debido a que se tenga un fluido viscoelástico ya que en la contracción se pudieran presentar diferentes cambios para el paso de este, en sus variaciones de



*Figura 1.1.5-4 Perfil de esfuerzos en diferentes zonas en el desarrollo de un flujo mixto a través de una contracción axisimétrica*

velocidad y de esfuerzos que aún no se han podido explicar en la teoría del flujo mixto, debido a que a ciertos valores de rapidez de corte en el fluido se presentan comportamientos elásticos y estos a ciertas condiciones de flujo, especialmente de No. De Deborah bajos, se presentarán como el máximo evento de importancia debido a que imponen las características que poseerá el flujo.

Es relevante mencionar que en la contracción no se ve afectada la cantidad de materia que fluye a través de la contracción, debido a que no existe una acumulación atendiendo al principio de continuidad por lo que otros parámetros serán los que se vean modificados, tales como la presión y la velocidad que posee el sistema.

En la figura 1.1.5-4 se puede observar cómo se comporta el fluido en la contracción completa, de forma que, se puede apreciar de mejor manera la configuración en la cual los distintos flujos que conforman el flujo mixto se distribuyen de pared a pared de la contracción. Así mismo se pueden observar los diferentes tipos de esfuerzos que se llevarán a cabo en cada una de las zonas presentes en la contracción donde los esfuerzos cortantes presentarán mayores valores al estar más cercanos a la zona I de la contracción estando cercanos a las paredes, así van disminuyendo los valores del esfuerzo cortante hasta llegar a la zona central del flujo donde se presenta la menor resistencia a fluir por parte del fluido, en esta línea central del flujo el valor del esfuerzo presenta un valor de 0, así mismo al tratarse de un flujo mixto en la zona central se presenta otro tipo de esfuerzo que es el extensional donde se puede ver que la contracción es la principal fuente de este freno a la línea central del fluido.

En una contracción-expansión axisimétrica como la que se ha representado anteriormente en la figura 1.1.5-2 se puede observar el comportamiento del fluido antes y después de la contracción, mostrando la ubicación de los diferentes tipos de flujos que se manejan en ese tipo de sistema pudiendo observar un flujo cortante antes y después de la contracción, así como, un flujo cortante en la contracción misma, además del flujo extensional uniaxial que se ha de encontrar desarrollado a lo largo de la contracción. Un fluido cualquiera, en su comportamiento a lo largo de

una tubería o ducto circular será de naturaleza cortante y para obtener el valor de esta, será necesario apoyarnos en la ecuación de Weissenberg-Rabinowitsch dada por la siguiente relación:

$$-\left(\frac{dV_x}{dr}\right)_{\tau_w} = \dot{\gamma}_W = \left(\frac{1}{4}\right)\dot{\gamma}_{aW} \left[3 + \frac{d \ln Q}{d \ln \tau_w}\right] \quad 1.1.5 - 1$$

El término que se encuentra en la ecuación entre corchetes es lo que se conoce como la pendiente de la recta resultante al graficar  $\ln Q$  vs  $\ln \tau_w$  que tiene como resultado valores muy cercanos a 1 por lo que al ajustar la ecuación 1.1.5-1 obtenemos:

$$-\left(\frac{dV_x}{dr}\right)_{\tau_w} = \dot{\gamma}_W = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad 1.1.5 - 2$$

Donde:

$Q$  = Flujo Volumétrico

$\dot{\gamma}_W$  = Rapidez de Corte en la pared del tubo

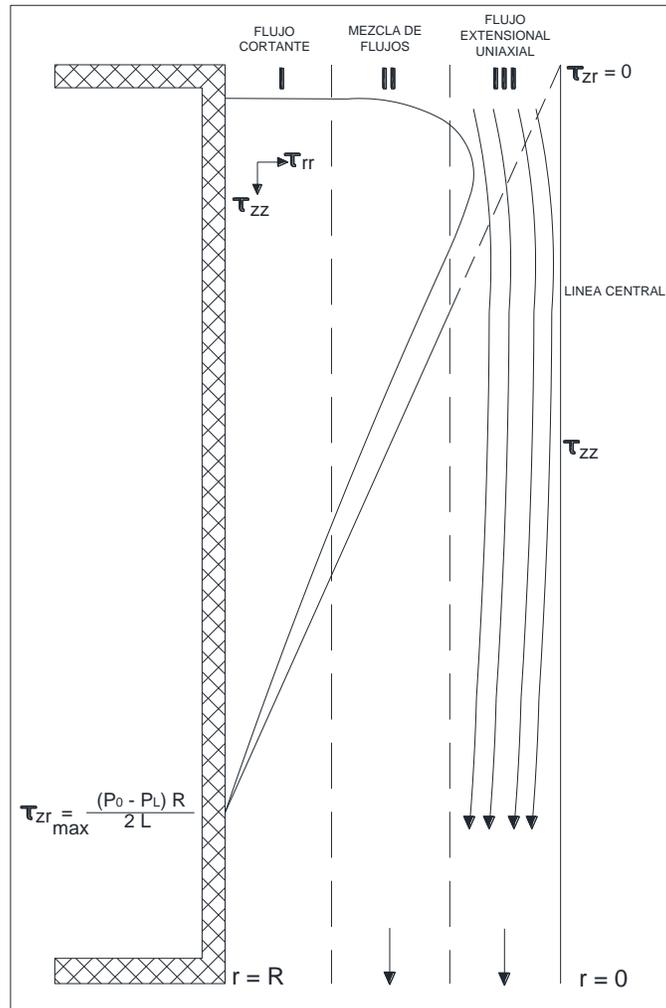
$\dot{\gamma}_{aW}$  = Rapidez de Corte Aparente en la pared del tubo

$\tau_w$  = Esfuerzo en la pared del tubo

Si se considera que en sistema de flujo existan las condiciones necesarias para la manifestación de la elasticidad del fluido, se desempeñará un papel importante por parte de la primera diferencia de esfuerzos normales, exhibiendo en si las características del flujo que no han sido consideradas en la dinámica de flujo.

En la figura 1.1.5-5 podemos encontrar la representación de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte en presencia de las tres etapas que se han de considerar en el desarrollo del flujo mixto. En esta, podemos apreciar cómo es que la trayectoria de los esfuerzos normales  $T_{zz}$  se desarrollan lo más cercanos a la línea central, interactuando con uno de los componentes de la primera diferencia de esfuerzos normales  $N_1$ , que es el esfuerzo que se desarrolla a la vez que los esfuerzos extensionales, siendo este el esfuerzo  $T_{rr}$  que como muestra la figura

1.1.5-5 crece desde las paredes de la contracción hacia el centro de esta. Si  $T_{rr}$  tiene un valor mayor que  $T_{zz}$  podemos decir que las características que posee el flujo en



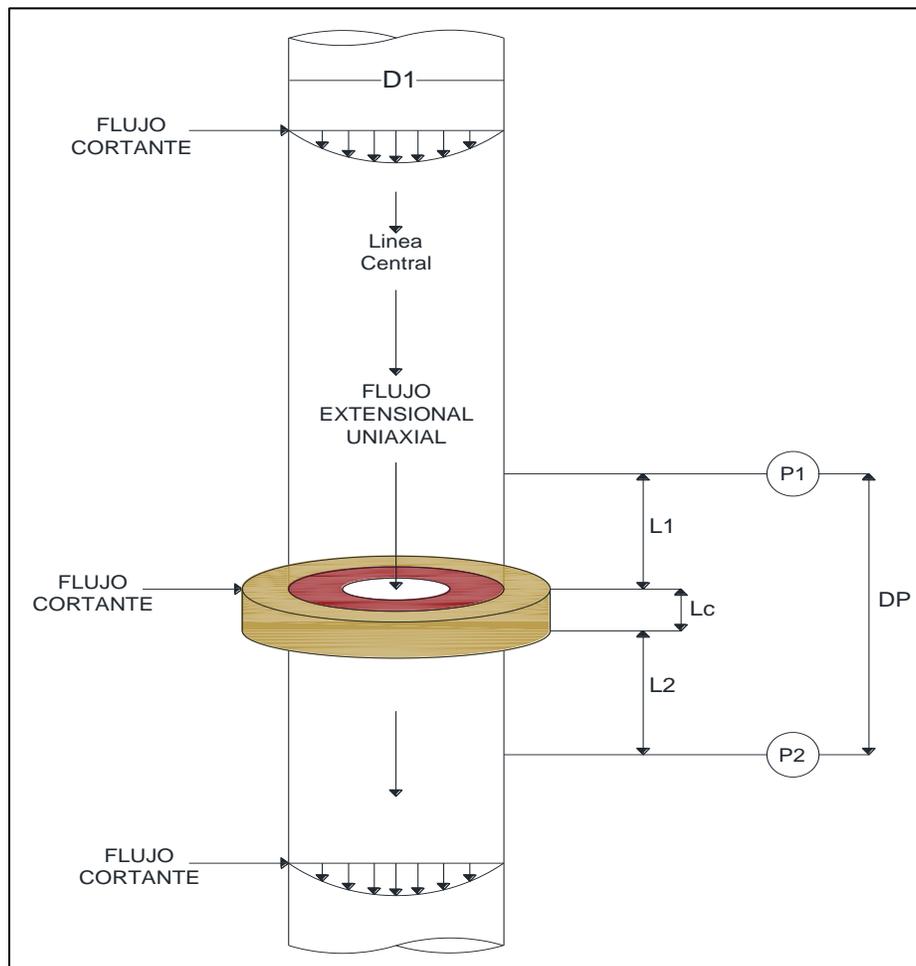
**Figura 1.1.5-5 Interacción de la primera diferencia de esfuerzos normales a lo largo del radio de la contracción.**

la contracción son predominantes en cuanto al flujo cortante, donde la primera diferencia de esfuerzos normales en corte de naturaleza elástica domina al flujo extensional; al incrementar la rapidez de corte los esfuerzos extensionales van a crecer en magnitudes que van a superar la predominancia del flujo cortante ya existente en la contracción, diciendo entonces que el flujo extensional es el flujo que va a dominar sobre el flujo cortante imponiendo las características del flujo que se presenta en la contracción.

### 1.1.6 Caídas de Presión Presentes en una contracción-expansión axisimétrica

Las caídas de presión que existen en un sistema de contracción-expansión resultan de gran importancia y de una relevancia particular que permite establecer con claridad el campo de presiones existentes antes, durante y en la misma contracción; aunado a esto, el campo de velocidades esclarece la dinámica de flujo del fenómeno de contracción-expansión axisimétrica.

En la figura 1.1.6-1 se pueden apreciar los distintos tipos de caídas de presión en una contracción-expansión axisimétrica, así mismo, podemos tomar en cuenta que estas caídas de presión que se encuentran en el sistema se pueden determinar



*Figura 1.1.6-1 Diferentes tipos de caídas de presión en un sistema contracción-expansión axisimétrica*

mediante el uso de la ecuación de Hagen y Poiseuille, estas caídas de Presión son las siguientes:

a)  $\Delta P_1$ : Conlleva la caída de presión del tubo superior desde un punto de la tubería hasta el inicio o base de la contracción.

$$\Delta P_1 = \frac{8Q\eta L_1}{\pi R_1^4} \quad 1.1.6 - 1$$

b)  $\Delta P_2$ : En esta caída de presión se considera la distancia de la parte final de la contracción hasta la presión ya estacionaria en el ducto donde se posiciona el sensor de presión.

$$\Delta P_2 = \frac{8Q\eta L_2}{\pi R_1^4} \quad 1.1.6 - 2$$

c)  $\Delta P_C$ : En la caída de presión correspondiente a la contracción se considera de la distancia correspondiente únicamente de la presión del inicio al final de la contracción.

$$\Delta P_C = \frac{8Q\eta L_C}{\pi R_C^4} \quad 1.1.6 - 3$$

Conocer estas caídas de presión resulta fácil cuando se conocen las dimensiones de la geometría en la cual se está trabajando, así como la viscosidad cortante existente en el fluido permitiendo resolver estas ecuaciones con facilidad.

A estas 3 caídas de presión que son de naturaleza cortante se le adiciona una más que se le conoce como caída de presión en exceso la cual no está representada en la figura 1.1.6-1 ya que esta no es de naturaleza cortante y que depende estrictamente hablando de la relación de apariencia que se imponga en la geometría de la contracción misma al momento de que el fluido pasa por esta; la caída de presión en exceso se presenta como la resistencia o dificultad que va a presentar el fluido al pasar a través del orificio de la contracción, donde para obtener su resultado se debe de hacer experimentalmente a diferencia de un fluido newtoniano para el cual se puede realizar una predicción de su valor usando la ecuación que propone Sampson para fluidos newtonianos en 1981 donde menciona que la caída de presión total en la contracción axisimétrica es la siguiente:

$$\Delta P_T = \left( \frac{8Q\eta L_C}{\pi R_C^4} \right) + \frac{Q\eta}{R_C^3} \left( \frac{8 L_{ideal}}{\pi R_C} \right) \quad 1.1.6 - 4$$

En la ecuación 1.1.6-4 Sampson considera que el primer término corresponde a la interacción que tiene la viscosidad con la pared interna de la contracción; en el segundo de los términos de esta ecuación Sampson considera una apariencia ficticia  $\left(\frac{L_{ideal}}{R_C}\right)$  de forma que al multiplicarla por  $\left(\frac{8}{\pi}\right)$  se pudiera reproducir exactamente la caída de presión dada por la ecuación 1.1.6-4 que debe ser determinada de forma experimental, así mismo Sampson encuentra que para fluidos newtonianos  $\left(\frac{8 L_{ideal}}{\pi R_C}\right)$  siempre se tendría un valor constante de 3, siempre que el flujo en la contracción cumpla con las restricciones de operación que se impone por Hagen y Poiseuille por lo que la ecuación 1.1.6-4 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\Delta P_T = \frac{Q\eta}{R_C^3} \left( \frac{8L_C}{\pi R_C} + 3 \right) \quad 1.1.6 - 5$$

Con conocimiento de lo anterior se puede sentar la base para poder expresar la caída de presión en una geometría de contracción-expansión axisimétrica que opere de la forma newtoniana, de modo que se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$\Delta P_T = \frac{8Q\eta(L_1+L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\eta_C L_C}{\pi R_C^4} + \frac{3Q\eta_C}{R_C^3} \quad 1.1.6 - 6$$

La ecuación 1.1.6-6 permite determinar la caída de presión total del sistema, en el cual el primer término se refiere a la caída de presión en los tubos superior e inferior, el segundo término es la caída de presión en la contracción y el tercero es la caída de presión en exceso, sin embargo en fluidos de diferente naturaleza a la newtoniana como los viscoelásticos esto no se puede realizar debido al desconocimiento del término propuesto por Sampson (18), resultando en que la aplicación directa de la ecuación no se puede realizar, por lo que al conocer cada una de las partes de la ecuación podemos hacer un ajuste y de esta forma podemos determinar una nueva ecuación que permita determinar la caída de presión en exceso, con la ayuda de las mediciones de caídas de presión de naturaleza cortante determinando así lo siguiente:

$$\Delta P_{Exceso} = \Delta P_T - \left[ \frac{8Q\eta(L_1 + L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\eta_C L_C}{\pi R_C^4} \right] \quad 1.1.6 - 7$$

Así mismo Cogswell (8) menciona que, en la determinación de la caída de presión en exceso, se puede apreciar en mayor parte la carga que este tiene al crecimiento de la viscosidad extensional en la zona de contracción, presentado en la línea central.

Con el conocimiento de la forma de calcular la caída de presión en exceso para un fluido newtoniano la cual fue establecida por Sampson y la formulación para un fluido de naturaleza no newtoniana podemos realizar un ajuste que nos permita realizar una comparación, presentándola como una caída de presión en exceso adimensional, tomando en cuenta las siguientes ecuaciones:

La ecuación de Sampson para fluidos newtonianos:

$$\Delta P_E = \frac{3Q\mu}{R_C^3} \quad 1.1.6 - 8$$

Para un fluido no newtoniano viscoelástico del tipo y características de un fluido Boger:

$$\Delta P_{Exceso-Boger} = \Delta P_T - \left[ \frac{8Q\mu(L_1 + L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\mu L_C}{\pi R_C^4} \right] \quad 1.1.6 - 9$$

Para un fluido no newtoniano viscoelástico del tipo y características de un fluido Hase:

$$\Delta P_{Exceso-Hase} = \Delta P_T - \left[ \frac{8Q\eta(L_1 + L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\eta_C L_C}{\pi R_C^4} \right] \quad 1.1.6 - 10$$

Así obteniendo mediante el cociente de las ecuaciones 1.1.6-9 o 1.1.6-10 con la ecuación 1.1.6-8 la ecuación normalizada de la caída de Presión en exceso.

$$\Delta P_{Exceso-Boger} \text{ Normalizada} = \frac{\Delta P_T - \left[ \frac{8Q\mu(L_1 + L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\mu L_C}{\pi R_C^4} \right]}{\left( \frac{3Q\mu}{R_C^3} \right)} \quad 1.1.6 - 11$$

$$\Delta P_{\text{Exceso-Hase Normalizada}} = \frac{\Delta P_T - \left[ \frac{8Q\eta(L_1+L_2)}{\pi R_1^4} + \frac{8Q\eta_c L_c}{\pi R_c^4} \right]}{\left( \frac{3Q\mu}{R_c^3} \right)} \quad 1.1.6 - 12$$

Estas ecuaciones que vienen a representar la caída de presión en exceso normalizada para cada fluido en específico (ya sea Boger o Hase según corresponda), nos muestran la continua competencia entre los diferentes tipos de flujo que se presentan en un fluido viscoelástico, los cuales son el flujo cortante y el flujo extensional uniaxial, siendo indicativo posteriormente el tipo de flujo dominante de cada prueba realizada y su relación con la características de las distancias que posee un vórtice de un fluido en una contracción-expansión.

## Capítulo 2 Actividad experimental del flujo en contracción-expansión axisimétrica con fluidos newtonianos y no newtonianos

### 2.1 Descripción del equipo experimental

El equipo experimental diseñado y construido (presentado en la figura 2.1-1) para la obtención de los datos presentados en esta tesis está dividido en diferentes zonas las cuales son:

- I. Zona de suministro del fluido
- II. Zona de prueba
- III. Zona de control electrónico
- IV. Zona de recolección del fluido

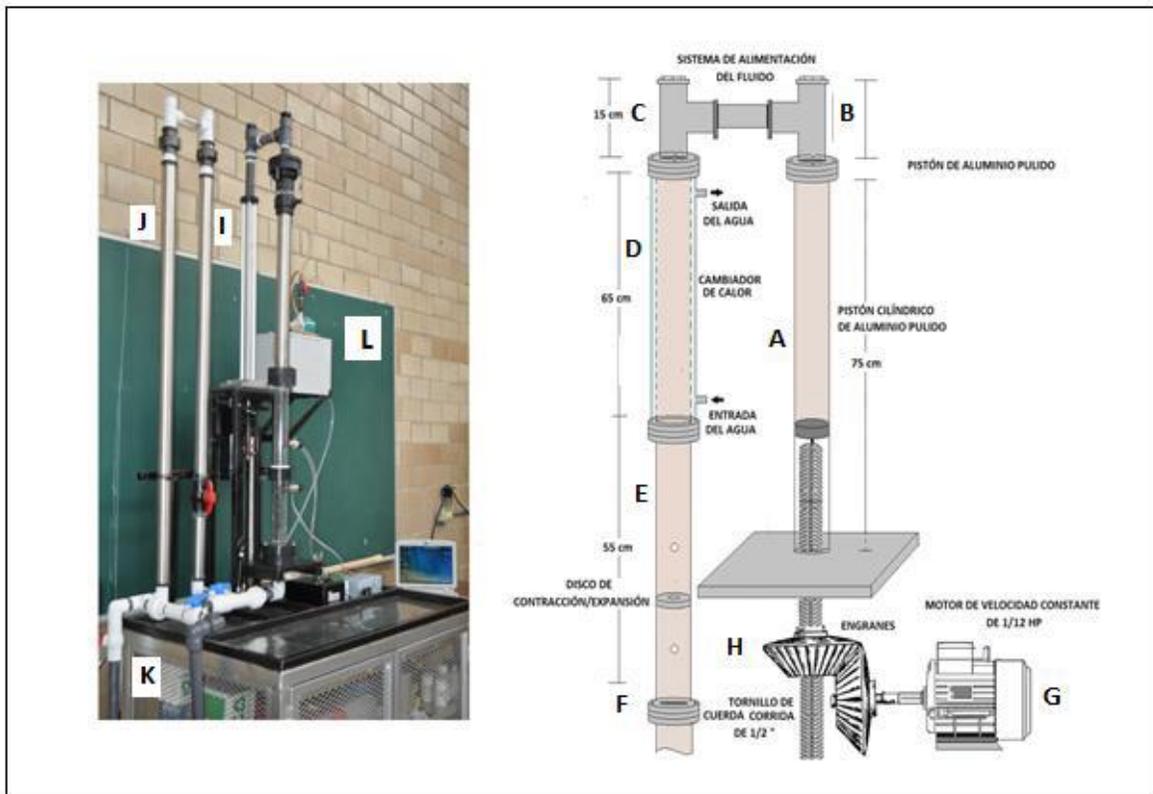


Figura 2.1-1 Equipo experimental

### **2.1.1 Zona de suministro del fluido**

En esta zona el equipo experimental cuenta con un motor trifásico (G) de 1/12 Hp con velocidad variable al cual se le adaptó un reductor de velocidad con el fin de suministrar el fluido a gastos muy bajos llegando hasta los 0.01 ml/s. El motor mueve un par de engranes (H) con una relación de 2:1 fácilmente intercambiable con 4:1 u 8:1 y que permite el movimiento del émbolo de un pistón a los valores requeridos por la investigación. El pistón (A) está construido de aluminio pulido de 3 cm de diámetro el cual tiene colocado en su superficie el émbolo, así como dos estabilizadores que proporcionan un desplazamiento uniforme y continuo a lo largo de su trayectoria.

El equipo permite el cambio del pistón, contando con además del ya mencionado pistón de 3 cm de diámetro interno, otro de 10 cm. El primero permite un suministro del fluido a gastos bajos de entre 0 y 1.5 ml/s garantizando en todo momento un régimen en flujo reptante en la contracción mientras que el pistón de 10 cm permite un suministro del fluido a gastos de entre 4 y 10 ml/s. En estos intervalos de flujo una contracción 2:1:2 permite alcanzar valores de flujo reptante y laminar con valores del número de Reynolds superiores a 1, lo que permite estudiar regímenes de flujo con contribuciones inerciales.

### **2.1.2 Zona de prueba**

La zona de prueba posee dos secciones, la primera de ellas consiste de un intercambiador de calor de tubos concéntricos (D) y un baño térmico (L), este último proporciona el agua a una temperatura controlada, con la que opera el intercambiador a fin de rectificar la temperatura del fluido en estudio. El tubo interno tiene una longitud de 65 cm con un diámetro interno de 5.2 cm y 6.27 cm para el tubo externo. El fluido experimental proveniente del pistón pasa a través del tubo interno del intercambiador de calor a fin de rectificar su temperatura a las condiciones que requiera la investigación.

La segunda sección consiste de un tubo recto de acrílico (E) de 5.2 cm de diámetro interno y una longitud de 55.5 cm coincidente con el tubo interno del cambiador de

calor, en este tubo se encuentra colocado un disco de Nylamid intercambiable que genera la zona de contracción/expansión. Las placas tienen las características mostradas en la tabla mostrada a continuación:

<i>Relación Contracción-Expansión</i>	<i>Diámetro del disco Do (cm)</i>	<i>Diámetro de la contracción dc (cm)</i>	<i>Espesor de la contracción Lc (cm)</i>	<i>Relación de la apariencia Lc/Rc</i>
<b>2:1:2</b>	4.5	2.250	0.5	0.44
<b>4:1:4</b>	4.5	1.125	0.5	0.88
<b>6:1:6</b>	4.5	0.750	0.5	1.33
<b>8:1:8</b>	4.5	0.562	0.5	1.77
<b>10:1:10</b>	4.5	0.450	0.5	2.22

*Tabla 2.1.2-1 Relación de placas de contracción expansión*

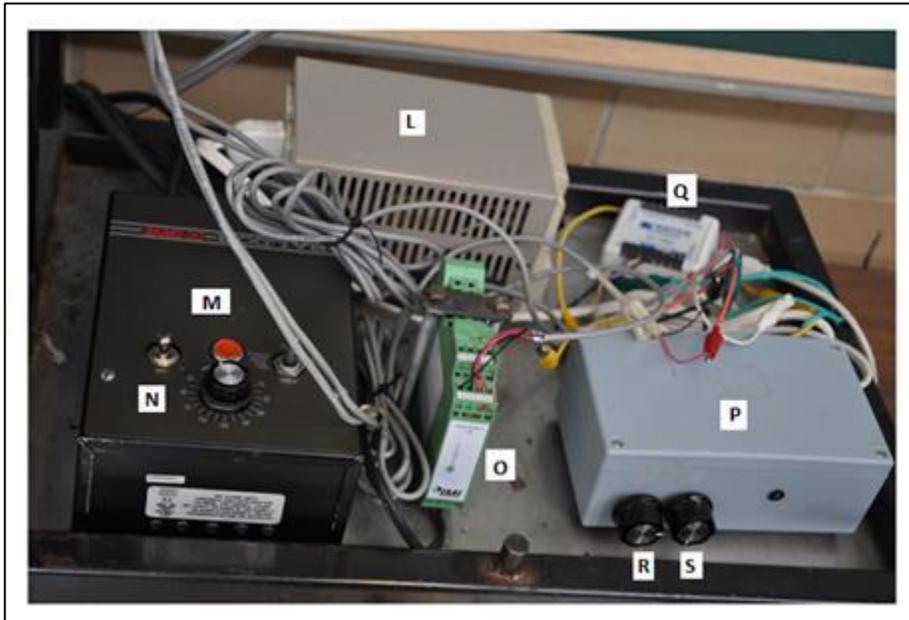


*Figura 2.1.2-1 Placas de contracción expansión*

### **2.1.3 Zona de control electrónico**

El equipo cuenta en la zona de prueba con dos transductores de presión Marca Piezotronic con un rango de 0 a 10 lb/in<sup>2</sup> colocados a 7 cm por encima y por debajo de la placa de contracción a fin de tener un registro lo suficientemente claro de la caída de presión y evitar que la formación de vórtices pueda interferir con la señal. La señal proveniente de los transductores se recibe en un equipo de adquisición de datos (Q) Marca Dataq modelo DI-158, que envía la señal en forma de voltaje a una computadora en donde es grabada en tiempo real durante toda la experimentación. El flujo del fluido de prueba se regula a partir de un controlador de voltaje M) Marca Baldor BC 140 de 115 volts acoplado al motor que mueve los engranes y estos a su vez desplacen el embolo del pistón, de tal manera que mediante el registro del tiempo, el área transversal del pistón y la longitud de desplazamiento del émbolo puede estimarse con precisión el flujo volumétrico del fluido. Antes de iniciar la experimentación los transductores de presión deben ser ajustados a voltaje cero

que corresponde a la presión atmosférica. Para esto se adaptó una fuente de poder (P) que suministra voltajes de hasta 0.0001 volts según lo necesite el experimentador, con la intención de que al inicio se parta en cada sensor a un voltaje de cero.



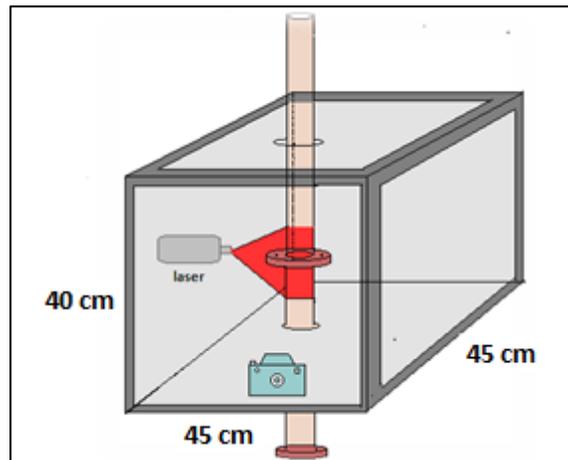
*Figura 2.1.3-1 Zona de control eléctrico*

#### **2.1.4 Zona de Recolección del fluido**

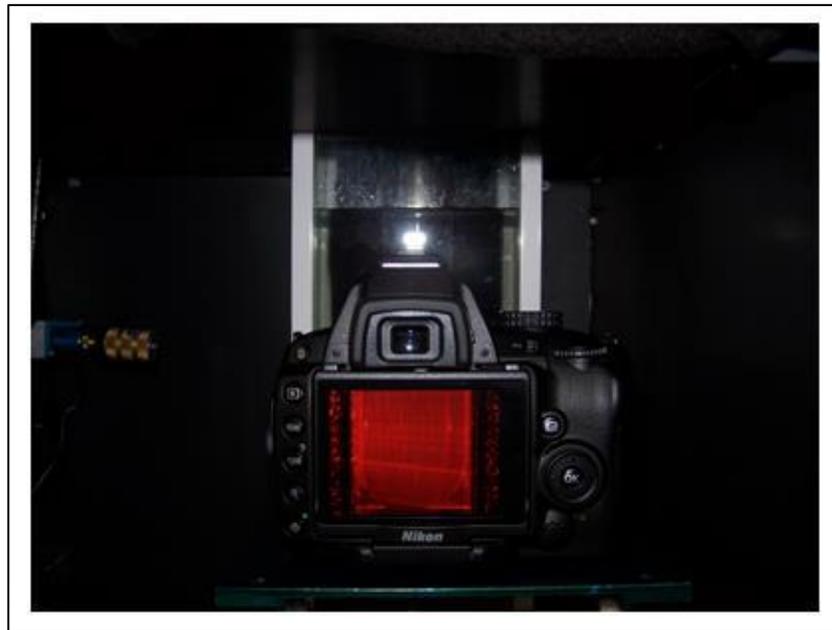
El fluido que viene de la parte inferior en la zona de prueba no se puede descargar directamente a presión atmosférica, lo cual sucede por el efecto de la gravedad la cual interviene en el flujo que impone el regulador de voltaje; para solucionarlo se le adicionó al equipo un segundo tubo de acero inoxidable (I) con idénticas dimensiones que el tubo de prueba. Estos tubos funcionan como vasos comunicantes que permiten regular la salida del fluido en ausencia de la gravedad, sin embargo esto ocasiona que el fluido se vaya a descargar por la parte superior del equipo; esta es la razón de que se coloque un tercer tubo (J) el cual es el encargado de conducir el fluido hacia un tanque recolector para un uso posterior.

### 2.1.5 Visualización de los Vórtices

Para la visualización de los vórtices y su análisis en las diferentes contracciones para las soluciones de los fluidos Hase y Boger se realizó el montaje de una cámara oscura cuyas medidas fueron de 45cm x 45cm x 40 cm, esto alrededor de la zona de contracción/expansión como lo muestran las figuras siguientes.



*Figura 2.1.5-1 Dimensiones de la cámara oscura para la visualización de vórtices*



*Figura 2.1.5-2 Dimensiones de la cámara oscura para la visualización de vórtices*



*Figura 2.1.5-3 Cámara oscura montada para lograr la visualización de los vórtices*

Las imágenes fotográficas fueron tomadas con una cámara fotográfica tipo Reflex de la marca Nikon modelo D5300, la cual se fijó para que durante todo momento estuviera en la misma posición en la experimentación, se ajustó la cámara con un tiempo de obturación de 35 segundos, obteniéndolo como un promedio entre el tiempo que se requería para obtener una adecuada fotografía a gastos pequeños y altos; las dimensiones de los vórtices se midieron empleando el programa ImageJ de libre uso, proporcionado por Java Applications, este programa proporciona las dimensiones medidas en pixeles por lo que fue necesario calibrar las fotografías tomadas, para esto se usó el diámetro interno de 4.5 cm del tubo de mayor diámetro del sistema de flujo y se obtuvo la relación de 0.00195 cm/pixel que se usó para hacer todas las mediciones relacionadas con los vórtices de cada una de las cinco relaciones de contracción.

## 2.2.1 Reología comparativa entre fluidos Boger y Hase

Un fluido Boger es un fluido viscoelástico el cual mantiene una viscosidad constante sin importar la rapidez de corte a la cual sea sometido, a diferencia de este el fluido el Hase, es un fluido viscoelástico que a medida que se le aplica una rapidez de corte mayor, su comportamiento comienza a ser adelgazante disminuyendo así la viscosidad de este.

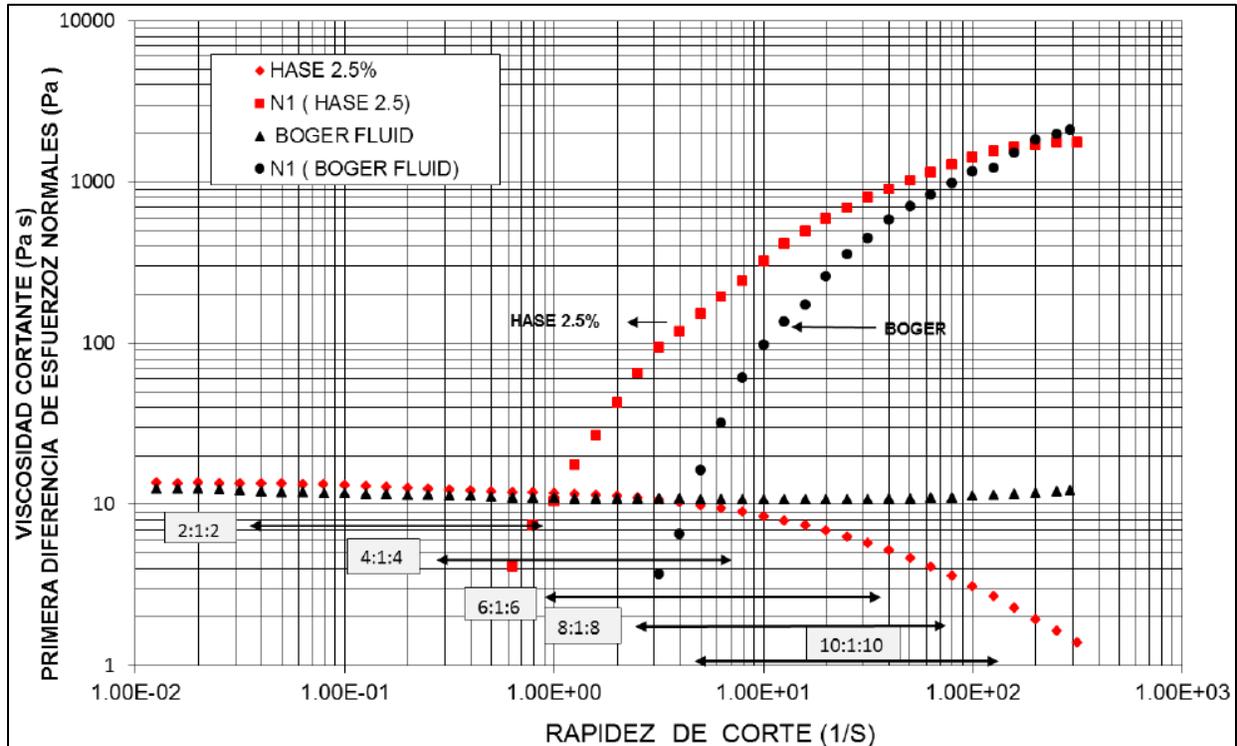
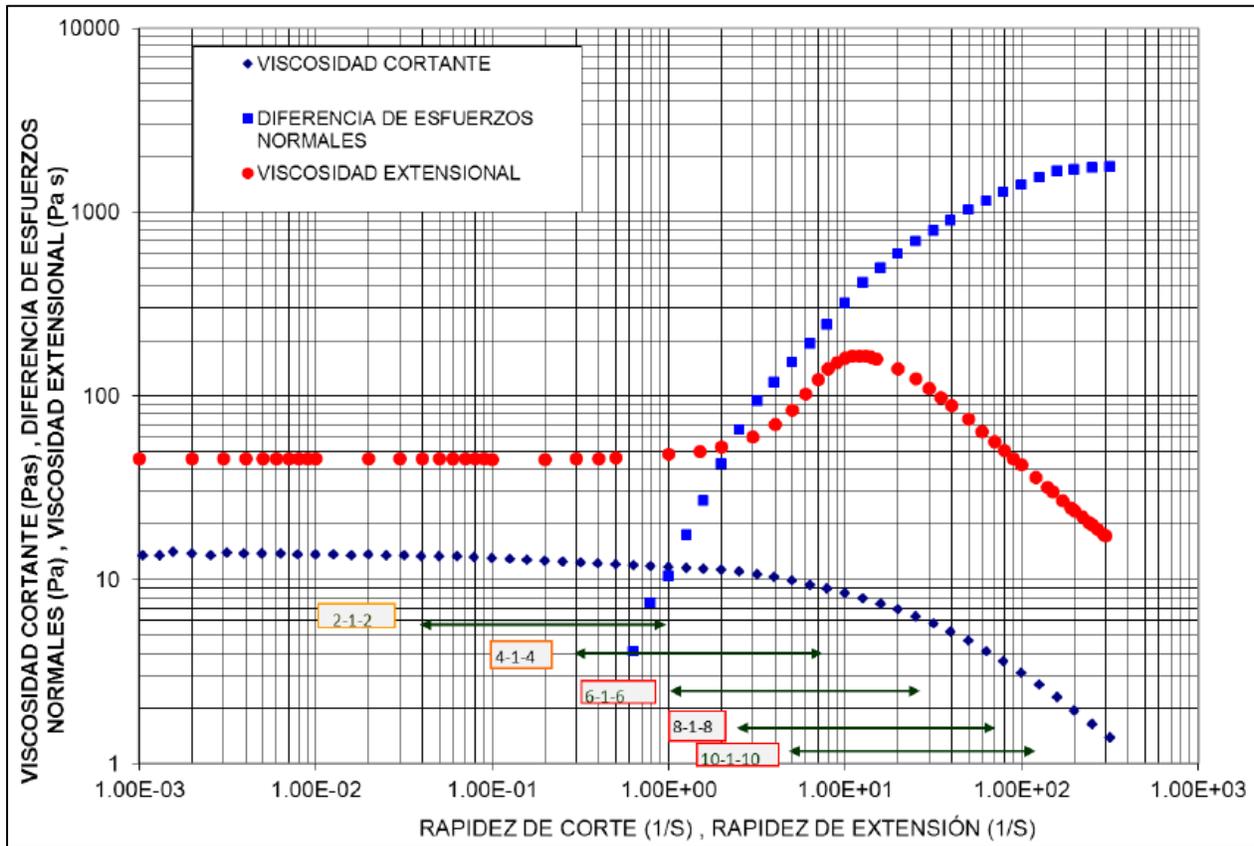


Figura 2.2.1-1 Reología Comparativa entre la solución de Hase 2.5% y un fluido de Boger

La energía que se requiere para que el fluido fluya en la tubería de mayor diámetro a régimen permanente es mayor a la que el mismo fluido requiere para fluir a través de una contracción, en la figura 2.2.1-1 a valores de rapidez de corte de  $7 \text{ s}^{-1}$  para los fluidos Boger y Hase se observa que ambos presentan valores muy cercanos en viscosidad, es decir que a valores de rapidez de corte inferiores la caída de presión es casi la misma; si bien el fluido de Boger posee viscosidad constante el Hase no, por lo que abate su viscosidad a valores tales que alcanza incluso la viscosidad del diluyente. De los resultados obtenidos por el reómetro se nota que en la primera diferencia de esfuerzos normales en corte hay una manifestación de la elasticidad por parte del fluido Hase la cual presenta antes que el fluido Boger, sin embargo

ambos fluidos logran adquirir prácticamente el mismo valor de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte a rapidez de corte alta.



*Figura 2.2.1-2 Reología Comparativa entre la solución de Hase 2.5% y un fluido de Boger*

Un estudio particularmente interesante es aquel presentado en la Fig. 2.2-1-2 que muestra el comportamiento reológico experimental del Hase el cual muestra una zona de viscosidad cortante constante y un posterior adelgazamiento que empieza alrededor de una rapidez de corte de  $1 \text{ s}^{-1}$ , alcanzando valores de abatimiento de viscosidad cortante prácticamente igual a la del disolvente a valores de rapidez de corte de  $300 \text{ s}^{-1}$ , por otro lado se muestra un estudio teórico empleando el modelo BMP sobre el comportamiento de la viscosidad extensional pura, la cual muestra 3 zona bien definidas , una primera zona de viscosidad constante , seguida de una segunda zona poco pronunciada pero muy importante en donde la viscosidad extensional inicia un crecimiento hasta alcanzar valores de 150 Pas que resulta ser casi 11 veces superior a la viscosidad extensional de inicio, posteriormente se presenta una tercera etapa en donde la viscosidad extensional decrece a valores prácticamente iguales a su correspondiente viscosidad cortante.

Como puede observarse la reología extensional de este fluido es más compleja que la mostrada por el fluido de Boger.

## ***Capítulo 3 Interpretación de la actividad experimental***

### **3.1.1 Fluidos en contracción-expansión 2:1:2**

En la figura 3.1.1-1-a se muestra el comportamiento que tiene la caída de Presión Total (Pa) contra la Rapidez de corte (1/s), en esta gráfica no se describe la dinámica de flujo de ninguno de los fluidos que están representados en la misma, debido a que la toma de las presiones toma en cuenta toda la sección de tubería, que abarca desde el tubo superior pasando por la contracción, hasta llegar al tubo inferior, de esta forma podemos empezar comentando que el desarrollo que tienen los fluidos en esta gráfica y las características que estos manifiestan son por la presencia de la elasticidad sin implicar que tipo de flujo es la que la origina, pudiendo ser una contribución elástica por parte del flujo cortante o del flujo extensional, además de no tener la capacidad de distinguir cuál de los dos flujos es el que contribuye en mayor proporción a la manifestación de la elasticidad; así mismo el fluido newtoniano de referencia dado que no presenta elasticidad mostrará las características del flujo cortante puramente viscoso en condiciones que solo este fluido desarrolla; los dos fluidos no newtonianos comenzarán a manifestar elasticidad a medida que la rapidez de corte aumente en valor, es destacable mencionar que al no presentar una elasticidad notable los fluidos solo poseen un flujo cortante a valores de gastos realmente bajos.

El Fluido Hase empieza a presentar una Caída de Presión Total mayor en relación a la trayectoria newtoniana, esto asociado a la manifestación elástica del fluido, presentando el carácter viscoelástico del mismo, sin embargo su elasticidad es menor a la desarrollada por un fluido Boger y la presión total que genera al final de la recta es apenas de 28 Pa más que la del fluido newtoniano; el fluido de Boger va a desarrollar una recta con una pendiente más pronunciada con respecto a las rectas del fluido Hase y del Fluido de Referencia, esto debido a que es más viscoelástico, generando una diferencia entre las presiones totales tomadas al final de las respectivas rectas del fluido newtoniano y del Boger de 72 Pa aproximadamente, siendo esta cantidad poco más del doble de la presión total del fluido newtoniano; es importante tomar en cuenta que las dos trayectorias de los

fluidos son superiores a la del fluido newtoniano, ambos con contribuciones elásticas que se obtienen sin saber con precisión a cuál de los dos flujos (cortante o extensional) es a quien se le debe la generación en mayor medida de esta característica.

Un fluido que fluye a través de una tubería requerirá de cierta cantidad de energía para poder fluir en estado estacionario, dentro de la tubería si se tiene una contracción-expansión la energía que necesitará el fluido para fluir adecuadamente en este estado antes de la contracción, en la contracción y en la expansión serán diferentes, siendo la energía necesaria para fluir antes de la contracción mayor que la necesaria en la contracción, por lo que el fluido liberará energía al pasar por la contracción. Los fluidos newtonianos realizan la liberación de esta energía mediante la caída de presión que resulta de las interacciones viscosas entre el fluido y la pared de la contracción, siendo atribuida esta caída de presión al flujo cortante; un fluido viscoelástico hará la liberación de energía de 2 maneras, la primera a través de la interacción del fluido con las paredes de la contracción, la segunda en la cual el fluido hará la liberación de energía es a través de la formación de vórtices debido a su presencia elástica. Es importante mencionar que la elasticidad no se manifiesta de una manera inmediata como la caída de presión, sino que debe de adquirirse en el sistema ciertos valores de rapidez de corte que le permitan manifestarse en forma de vórtices.

En la figura 3.1.1-1-b se tiene el comportamiento de la caída de presión en exceso normalizada contra la rapidez de corte, la caída de presión en exceso normalizada es un valor adimensional que se encuentra justo en la entrada de la contracción y nos muestra la constante competencia entre el flujo cortante y el flujo extensional uniaxial, esto debido a que es una división entre caídas de presión en exceso y que retomando las ecuaciones del capítulo anterior 1.1.6-11 y 1.1.6-12; el valor que se encuentra en el numerador del cociente es el resultado de la caída de presión en exceso en el fluido (Boger o Hase) y que detecta el desarrollo del flujo extensional uniaxial, el valor que se encuentra en el denominador en el cociente está representando al flujo cortante tomando como referencia un fluido newtoniano, por

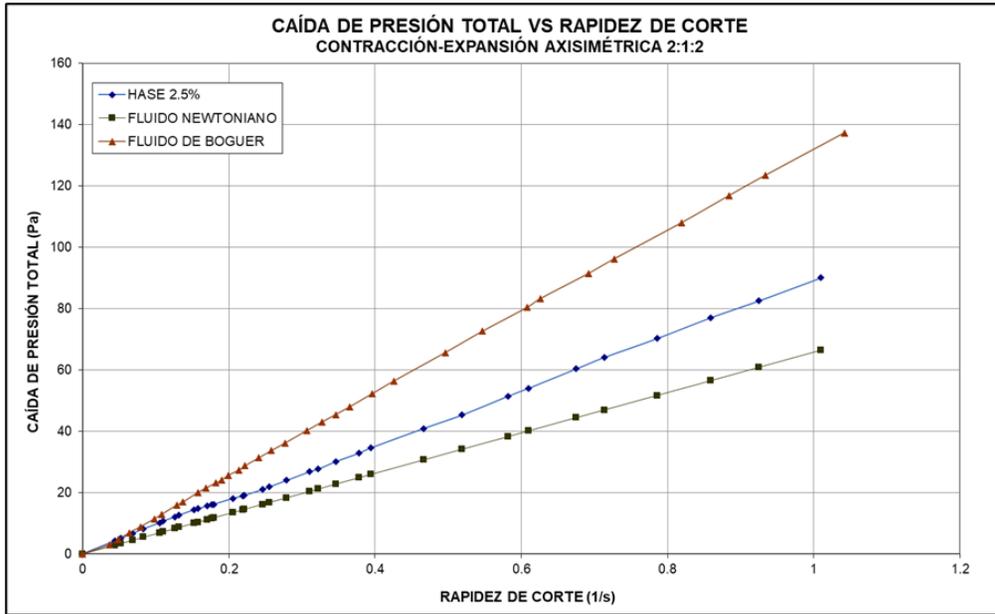
lo que constantemente ambos valores variables representarán la forma en que se manifiesta la competencia de alguno de los dos tipos de flujos que se encuentran en un fluido. En el caso particular para un fluido newtoniano, donde las interacciones viscosas con las paredes son las únicas que se presentan y el fluido presenta solamente el tipo de flujo cortante el valor resultante del cociente será siempre de 1 debido a que el valor del numerador y del denominador serán iguales creciendo a la par a medida que el valor de rapidez de corte continúe en crecimiento, generando una línea horizontal a lo largo de la gráfica, la cuál puede ser utilizada como una referencia de la zona de flujo cortante.

En el fluido de Boger se presenta una predominancia del flujo de tipo extensional, se puede ver lo rápido que crece el valor de la caída de presión en exceso normalizada con respecto al fluido newtoniano y al Hase, yendo en aumento rápidamente hasta que se llega a un valor de rapidez de corte de 0.2 donde la velocidad a la cual crecen los valores de la caída de presión en exceso comenzará a frenar hasta que el flujo cortante comenzará a limitar más el desarrollo del flujo extensional, la curva se mantiene aparentemente constante y a partir de un valor de rapidez de corte cercano de 0.4 podríamos decir que en adelante, en la rapidez de corte la caída de presión en exceso se mantiene constante, dado que mientras el flujo extensional continua en crecimiento el flujo cortante crece en la misma proporción, generando el comportamiento asintótico que se aprecia en la gráfica sucediendo esto sin sobrepasar valores para la caída de presión en exceso de 3.125, presentando por primera vez un vórtice como liberación de energía en un valor apenas superior de 0.4 para rapidez de corte; de la curva que apreciamos en la gráfica para el fluido de Boger podemos decir que, la naturaleza viscoelástica de este fluido es más pronunciada que la del fluido de referencia así como la del fluido Hase.

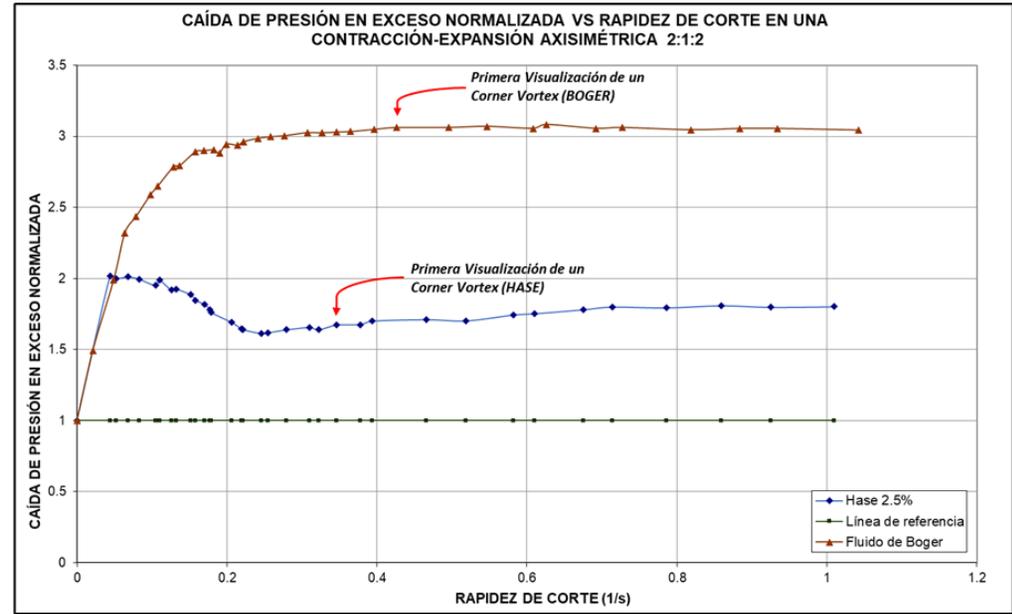
En la curva del fluido Hase se presenta la manifestación de una predominancia para el flujo cortante desde una rapidez de corte de 0.07 sin permitir un desarrollo mayor por parte del flujo extensional, disminuyendo en los valores de caída de presión en exceso a medida que se avanza dando como resultado una curva descendente en

esta zona, a medida que el gasto aumenta al llegar a un valor de rapidez de corte de aproximadamente 0.22 se llega a un límite inferior para la caída de presión en exceso y se entra a una zona de predominancia del flujo extensional donde se empieza a desarrollar un poco más el flujo extensional uniaxial, haciendo que la curva vaya en crecimiento ligeramente mientras el gasto sigue aumentando, al llegar a un valor de rapidez de corte de 0.6 se entra a la zona donde ambos tipos de flujo crecen en valores simultáneamente manteniéndose relativamente constante el valor de la caída de presión en exceso normalizada en valores cercanos a 1.75; podríamos llegar a decir que para un fluido de tipo Hase hay una competencia constante entre el flujo extensional uniaxial y el flujo cortante muy intensa desde el principio, donde la competencia viscosa es más intensa que la extensional.

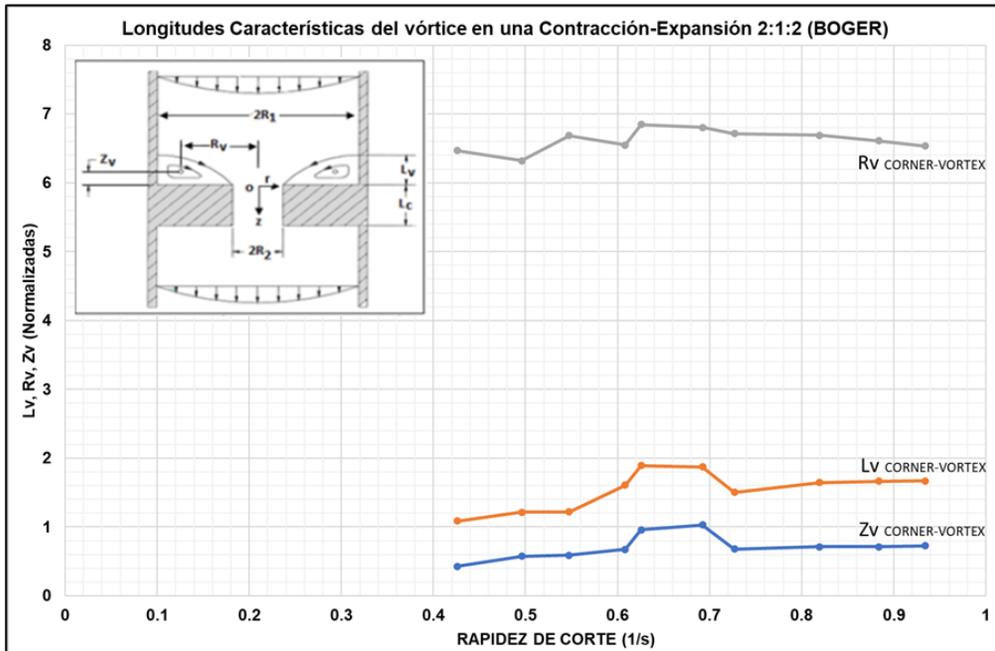
Es importante mencionar que en todo momento ambos fluidos se encuentran por encima de la línea de referencia, lo que nos permite decir que en todo momento el flujo extensional está desarrollándose y que existe la competencia de flujos desde bajos gastos.



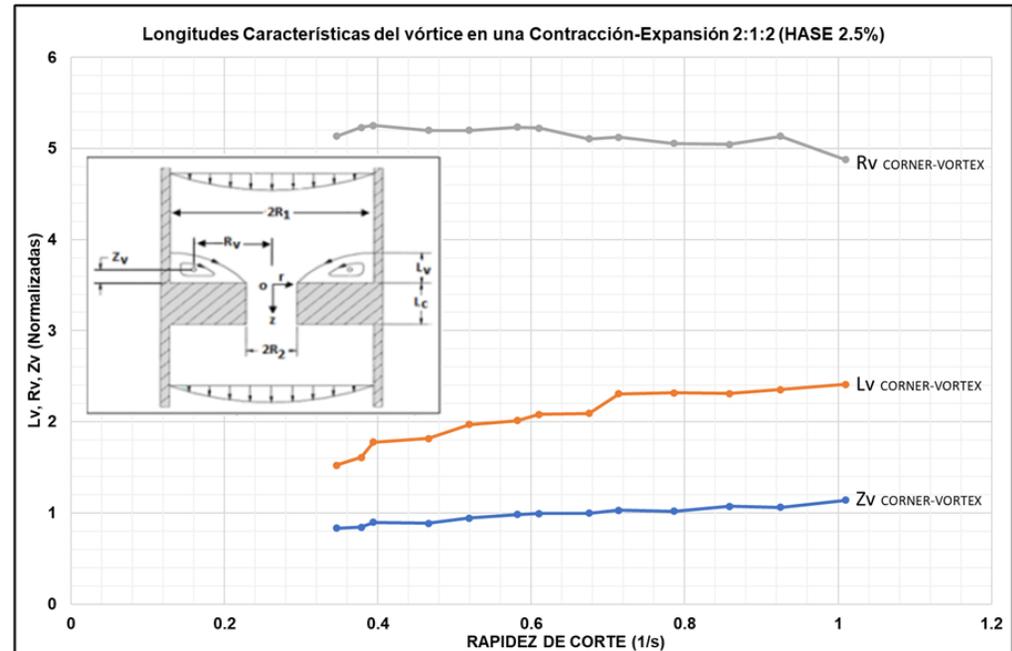
a)



b)

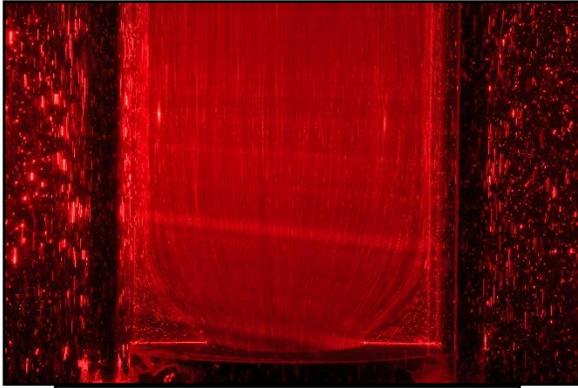


c)

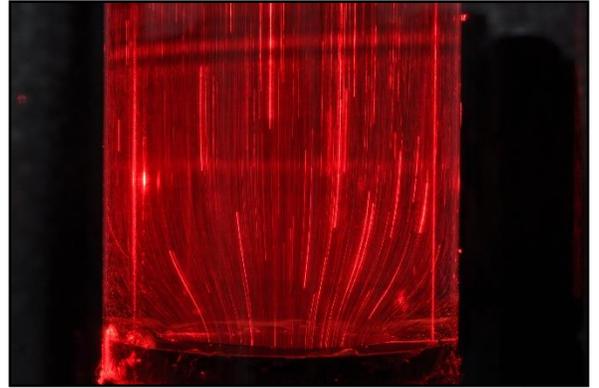


d)

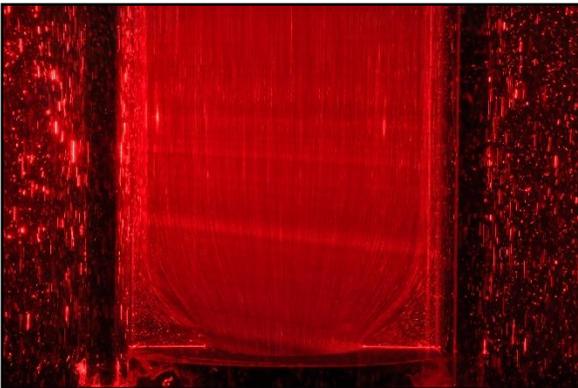
**Figura 3.1.1-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 2:1:2**



Hase 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.3218 \text{ 1/s}$



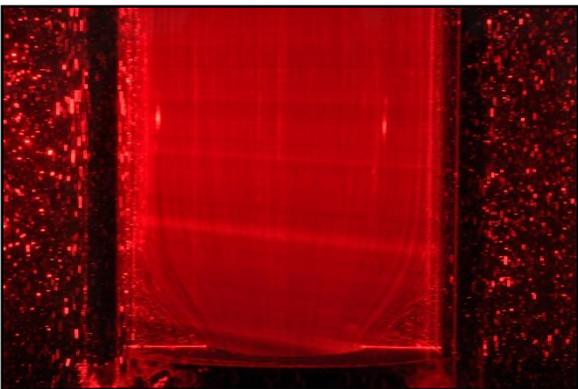
Boger 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.3959 \text{ 1/s}$



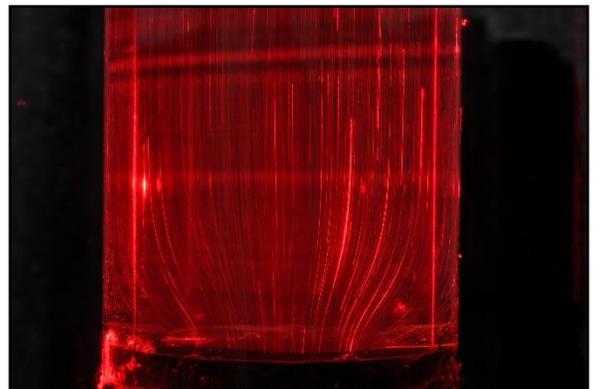
Hase 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.3462 \text{ 1/s}$



Boger 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.4262 \text{ 1/s}$



Hase 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.7142 \text{ 1/s}$



Boger 2:1:2  $\dot{\gamma} = 0.6255 \text{ 1/s}$

*Figura 3.1.1-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 2:1:2*

Como se mencionó anteriormente un fluido que fluye a lo largo de una tubería requiere de energía para poder continuar desplazándose a lo largo de esta, esta energía puede ser energía cinética, energía potencial o energía de presión, esta última será necesaria para que el fluido pueda desarrollar condiciones estacionarias, cuando el fluido llega a una contracción la cantidad de energía reinante en condiciones estacionarias es menor que la reinante en el tubo superior a la contracción, por lo tanto, la energía que proviene del tubo superior debe de ser liberada.

Como se muestra en la figura 1.1.5-4 los esfuerzos cortantes  $\tau_{rz}$  provenientes del desarrollo del flujo cortante en el tubo superior apartados de la contracción, poseen un valor en el centro de 0 al igual que los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$ , en este mismo punto se tiene la velocidad máxima en la dirección de  $\tau_{rz}$ , sin embargo a medida que el fluido se acerca a la contracción se comienzan a favorecer los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  y justo antes de que el fluido entre a la contracción se desarrollan cada vez más a su paso dependiendo enteramente por el diámetro de la contracción.

La manifestación del tipo de vórtice, la forma que posee y las dimensiones que tendrá dependerán de cómo es que se manifieste reológicamente el fluido dentro de la contracción, así mismo, debido a la elasticidad del fluido al desarrollarse los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$ , se estarán incrementando las líneas de corriente extensionales a lo largo del diámetro de la contracción ocasionando esto un desplazamiento de las líneas de tipo cortante hacia las paredes del tubo superior por encima de la contracción, un crecimiento en el valor de la rapidez de corte en el sistema ocasionará de igual forma un incremento en las líneas de corriente de tipo extensional que se van a desarrollar en dirección vertical, mientras que las líneas de corriente de origen cortante cada vez más, serán desplazadas hacia las paredes ocasionando que el vórtice crezca en tamaño y que se desarrollen los esfuerzos  $\tau_{rr}$  manifestando la elasticidad del fluido y desplazando las líneas de corriente hacia las paredes tal como lo muestra la figura 1.1.5-5, de esta manera se presenta la

manifestación de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte  $N1$  y que participará en las características del vórtice.

Un vórtice se presenta por parte de un fluido viscoelástico en una contracción-expansión cuando la liberación de energía provocada por las interacciones viscosas del fluido con las paredes ya no es suficiente, ocasionando que el fluido requiera de la liberación de energía de origen viscoelástico; el vórtice no aparece desde que se pone en movimiento el fluido, para una contracción-expansión 2:1:2 en el caso del fluido de Boger aparece a una rapidez de corte de 0.44 aproximadamente y para el fluido Hase en un valor de 0.35 aproximadamente, se puede analizar la dinámica de flujo mediante las 3 dimensiones diferentes que conforman al vórtice las cuales son: la distancia de la base de la contracción al límite superior del vórtice ( $L_v$ ), la distancia de la base de la contracción al centro del vórtice ( $Z_v$ ) y la distancia del centro del vórtice al centro de la tubería ( $R_v$ ).

En las Figuras 3.1.1-1-c y 3.1.1-1-d se presentan los diferentes valores para las distancias de crecimiento que constituyen a los vórtices  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  contra la rapidez de corte para los fluidos Boger y Hase. Es importante mencionar que la observación que se muestra en ambas figuras únicamente corresponde solo de la primera observación de un vórtice al final del experimento y que antes de la primera observación existen muchos cambios donde predomina el desarrollo del flujo extensional.

Como se puede apreciar en la figura 3.1.1-1-b la aparición del primer vórtice se origina a una rapidez de corte de 0.44, el vórtice que aparece es del tipo Corner vortex y cuya zona corresponde a la trayectoria asintótica de la caída de presión en exceso normalizada, en la distancia  $R_v$  durante la primer trayectoria en los primeros cinco puntos y que llega hasta un valor de rapidez de corte de 0.62 en general se nota un comportamiento de crecimiento de esta distancia asociado al flujo extensional acorde a lo observado en la caída de presión en exceso normalizada de la figura 3.1.1-1-b donde es aproximadamente constante en estos puntos con un ligero crecimiento desde la primer visualización del vórtice donde el desarrollo del flujo extensional ligeramente por encima del flujo cortante provoca un

desplazamiento del vórtice hacia las paredes; posteriormente  $R_v$  en general va en un ligero descenso desde un valor de rapidez de corte de 0.62 hasta 0.94 aproximadamente y que en comparación con la figura 3.1.1-1-b podemos ver que el flujo cortante gana cierta predominancia ante el flujo extensional ocasionando que las líneas de corriente se puedan orientar hacia el centro de la contracción, generando que la distancia  $R_v$  del vórtice decrezca, comparando el comportamiento del fluido de Boger con su respectiva reología mostrada en la figura 2.2.1-1 en el valor de rapidez de corte donde se presenta el vórtice, el fluido aún no presenta valores para la primera diferencia de esfuerzos normales por lo que podemos decir que en una contracción-expansión 2:1:2 el Boger es un fluido estrictamente viscoso.

En relación al comportamiento de la distancia  $R_v$  del Hase mostrado en la figura 3.1.1-1-d se puede observar que este presenta su vórtice a partir de un valor de rapidez de corte de 0.35 aproximadamente, teniendo en  $R_v$  un ligero crecimiento hasta 0.4 en valor de rapidez de corte, donde comienza un descenso en general hasta un valor de rapidez de corte de 1.1, lo que ocasiona que el centro del Corner vortex se vaya acercando más al labio de la contracción siendo acercado debido al crecimiento del desarrollo del flujo extensional; a diferencia del Boger el Hase es un fluido que va a estructurarse y que va a mostrar un adelgazamiento, desde una rapidez de corte de 0.35 hasta 1.1 el fluido se encuentra en una zona adelgazante pero además en una rapidez de corte de aproximadamente 0.6 se va a encontrar en los primeros valores para  $N_1$  la primera diferencia de esfuerzos normales en corte presentando elasticidad.

Previo al punto donde aparecen por primera vez los vórtices en el fluido de Boger en un valor de rapidez de corte de 0.44 la liberación de esfuerzos se verá reflejada únicamente en la caída de presión de origen viscoso, por lo que después de este punto, podremos apreciar la manifestación de la naturaleza viscoelástica del fluido; podemos observar en las distancias del vórtice de la base de la contracción al límite del vórtice ( $L_v$ ) y de la base de la contracción al centro del vórtice ( $Z_v$ ) en la figura 3.1.1-1-c que estas se encuentran en crecimiento y esto es consecuencia del incremento en el esfuerzo extensional en la dirección  $\tau_{zz}$  por parte del fluido,

haciendo que las líneas de corriente extensional desplacen al flujo cortante, aumentando también en menor medida los esfuerzos cortantes en la dirección  $\tau_{rr}$ , siendo estas distancias incrementadas por el aumento del flujo extensional, así mismo, después de 0.62 se nota una disminución en las distancias, que si comparamos con la figura 3.1.1-1-b nos permitirá observar que en el momento en el cual empieza a predominar el flujo cortante ligeramente sobre el extensional, las distancias  $L_v$  y  $Z_v$  van a disminuir, atribuido lo anterior a la disminución de los esfuerzos  $\tau_{zz}$  y el dominio en menor medida sobre estos los esfuerzos  $\tau_{rr}$ .

Para el fluido de tipo Hase a partir de un valor de rapidez de corte de 0.37 y durante toda la ventana de observación del experimento la distancia  $L_v$  se encuentra en crecimiento y  $Z_v$  también aunque no crecen con la misma pendiente, esto se debe al adelgazamiento en el fluido, ya que a mayor rapidez de corte mayor adelgazamiento va a presentar, por lo que, a medida que los esfuerzos extensionales en  $\tau_{zz}$  van en crecimiento los esfuerzos en  $\tau_{rr}$  también pero con un menor valor, ocasionando que el crecimiento para  $L_v$  sea mayor que el de  $Z_v$ , si comparamos su comportamiento con la figura 3.1.1-1-b se nota que en el fluido Hase durante la ventana de observación del vórtice el predominio es para el flujo de tipo extensional; por lo que podemos decir que el crecimiento por parte de  $L_v$  y  $Z_v$  son estrictamente consecuencia del desarrollo del flujo extensional debido al crecimiento en los esfuerzos  $\tau_{zz}$ .

### 3.1.2 Fluidos en contracción-expansión 4:1:4

En la gráfica que se encuentra en la figura 3.1.2-1-a se puede observar el comportamiento de la caída de presión total (Pa) contra la rapidez de corte (1/s) para los fluidos de Boger y de Hase en una contracción 4:1:4, en esta se puede observar para el fluido de Boger que su recta se mantiene muy cercana a la línea de referencia que corresponde al fluido newtoniano manteniendo características similares a este, y que posteriormente al llegar a un valor en la rapidez de corte de 3.9 aproximadamente comienza a aumentar de valores para su caída de presión total por encima del fluido newtoniano, manifestando significativamente de mayor forma su elasticidad al haber llegado a este punto, así mismo continua en crecimiento aumentando el ángulo de su pendiente hasta alcanzar al final del experimento una diferencia con la línea de referencia de 110 Pa aproximadamente.

El fluido Hase se mantiene todo el tiempo debajo de la línea de referencia, teniendo un valor similar a esta durante la primera unidad en valor de la rapidez de corte, posterior a este punto el valor de la caída de presión total no incrementa como el de la línea de referencia, disminuyendo gradualmente su pendiente, si observamos la figura 2.2.1-1 y comparamos el valor en el cual la rapidez de corte cambia su pendiente podemos ver que cuando la rapidez de corte tiene un valor de uno el fluido comienza a adelgazarse con una mayor rapidez, y que aunado a esto, la aparición de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte afecta también al fluido haciendo que el Hase se hinche provocando que la entrada del fluido a la contracción se dificulte, evitando el desarrollo del flujo extensional haciendo que la caída de presión total sea más baja que la del fluido newtoniano; podemos decir que la razón por la cual el fluido Hase tiene estos valores de caída de presión se debe a la doble contribución por parte de la manifestación de los efectos elásticos ocasionados por la aparición de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte N1 y por el adelgazamiento que se presenta en el fluido al aumentar su rapidez de corte, sin embargo es importante recordar que la manifestación de los efectos elásticos tanto del Hase como del Boger en esta figura no dan razón alguna por la cual suceden.

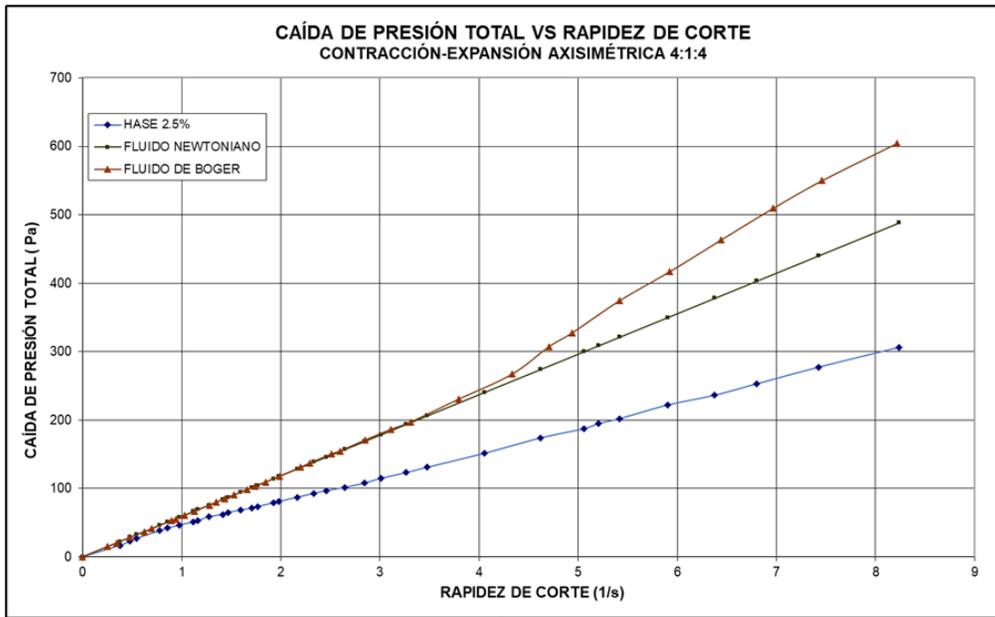
Se pueden comparar los resultados obtenidos entre la contracción 4:1:4 y la contracción 2:1:2 notando que ambos fluidos tienen valores mayores para la caída de presión total con respecto al fluido de referencia, sin embargo en la contracción más pequeña (4:1:4) el fluido Boger se mantiene similar al fluido de referencia hasta un valor de rapidez de corte poco mayor de 3.5 mientras que el Hase se mantiene similar al fluido newtoniano desde el inicio del experimento hasta un valor de uno para la rapidez de corte donde comienza a crecer con una pendiente menor al fluido de referencia.

Podemos observar en la figura 3.1.2-1-b cuyos valores representados son la caída de presión en exceso normalizada contra la rapidez de corte para una contracción 4:1:4, siendo importante recordar que con esta gráfica se puede analizar cómo es el comportamiento de la competencia de flujos para ambos fluidos; para el caso del fluido Boger se mantiene en valores relativamente constantes durante el trayecto en los primeros valores para la rapidez de corte, al llegar a un valor de rapidez de corte de aproximadamente 3.3 en adelante comienzan a crecer rápidamente sus valores para la caída de presión en exceso, teniendo una predominancia en el flujo extensional sobre el flujo cortante llegando a un posible comportamiento asintótico en un valor de rapidez de corte de 7.5 aproximadamente hacia el final de la experimentación, mostrando que en el cociente de la caída de presión en exceso normalizada los dos tipos de flujo crecen a la par manteniendo constantes los valores de la caída de presión en exceso normalizada, finalizando la experimentación con una diferencia de valores de esta de 0.42 con respecto al fluido newtoniano. Si comparamos la curva resultante con la obtenida en la contracción 2:1:2, podemos ver que a primeros valores de rapidez de corte en la contracción 4:1:4 el fluido Boger se comporta como el fluido newtoniano teniendo una competencia de flujos cortante y extensional en valores iguales, a diferencia de la contracción 2:1:2 donde se desarrollaba desde el inicio de la experimentación un flujo predominantemente extensional.

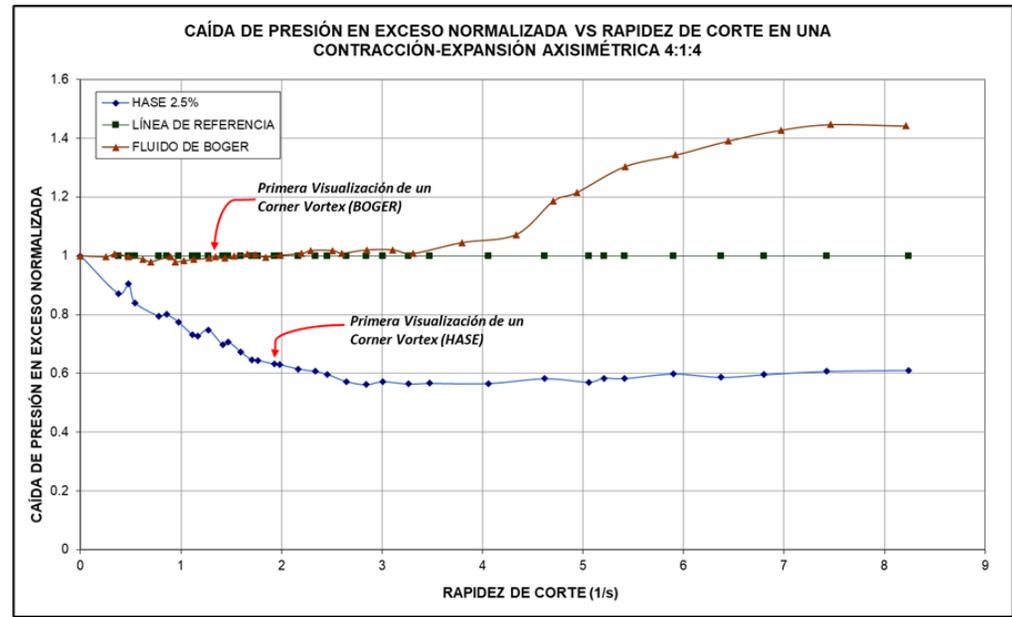
En la curva que está representada para el fluido Hase, es importante recalcar que se presentan dos condiciones que afectan al fluido directamente en su

comportamiento en la contracción, los cuales son el adelgazamiento del fluido y la presencia de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte  $N1$ , se puede observar cómo es que desde el principio comienza a predominar el flujo cortante presentándose igualmente la primera diferencia de esfuerzos normales en corte lo que ocasiona que el fluido se hinche hacia el centro de la contracción impidiendo que el flujo extensional que se encuentra sobre la línea central se pueda desarrollar con libertad y que se logra hasta un valor de rapidez de corte de 3 aproximadamente donde se alcanza el mínimo en el valor de la caída de presión en exceso, y que luego de este punto hasta el final de la experimentación el fluido se muestra en crecimiento en la caída de presión en exceso debido a que el flujo extensional va a ir tomando el control sobre las características del flujo. Comparando la curva con la que se encuentra para la contracción 2:1:2 podemos apreciar que el flujo extensional es el que predomina desde el inicio de la experimentación, mientras que para la contracción 4:1:4 a consecuencia del adelgazamiento del fluido primero se desarrolla el flujo cortante, por lo que en estos puntos el flujo extensional no tiene un desarrollo significativo y se encuentra limitado por el adelgazamiento del fluido.

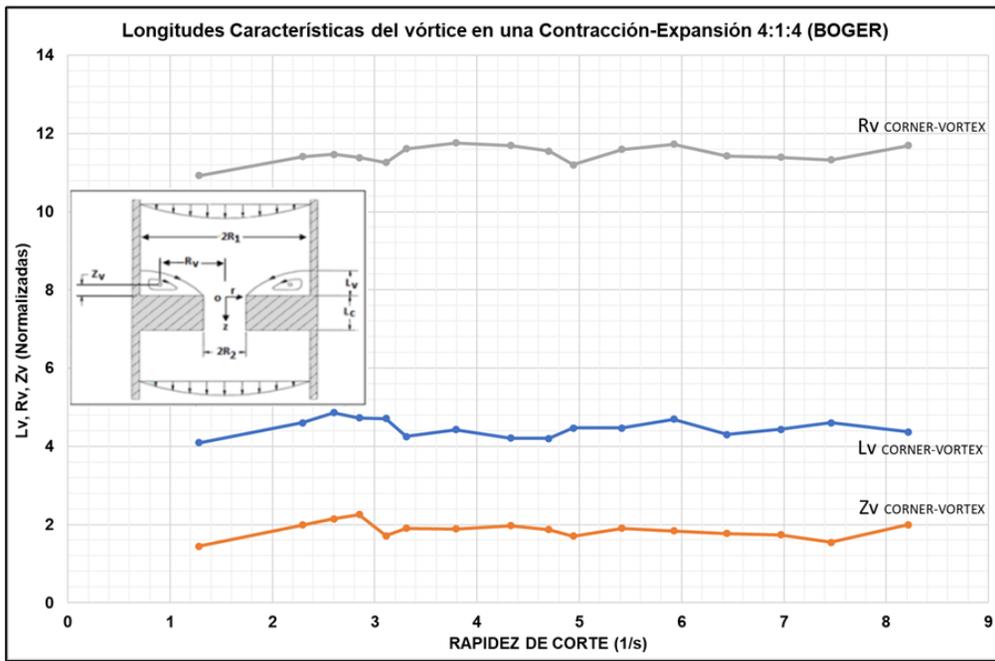
Es relevante recordar que los vórtices aparecen debido a la insuficiencia del fluido para continuar la liberación de energía debido a las interacciones viscosas con las paredes, apareciendo así las distancias de medición de los vórtices  $R_v$ ,  $L_v$  y  $Z_v$ , las cuales se ven modificadas por diferentes cambios en el tipo de flujo y en los fluidos en sí; más adelante en la figura 3.1.2-1-c se tiene la medición de estas distancias con respecto al fluido de Boger, para este fluido la aparición de los vórtices del tipo Corner Vortex se hizo a un valor de rapidez de corte de 1.2809; la distancia  $R_v$  es la que corresponde a la medición del centro del vórtice hacia el centro de la contracción y para el caso del fluido Boger comienza a presentarse esta distancia con un flujo extensional y una tendencia en su comportamiento ascendente ligeramente errática debido al ligero crecimiento del flujo extensional en este punto, el flujo extensional a medida que aumenta su desarrollo comienza a aumentar de igual forma los esfuerzos  $\tau_{zz}$  y por lo tanto desplaza las líneas de corriente  $\tau_{rr}$  con más fuerza hacia las paredes por lo que comienza a acrecentar la distancia  $R_v$  que para el fluido Boger en la contracción 4:1:4 crecerá a medida que el flujo extensional



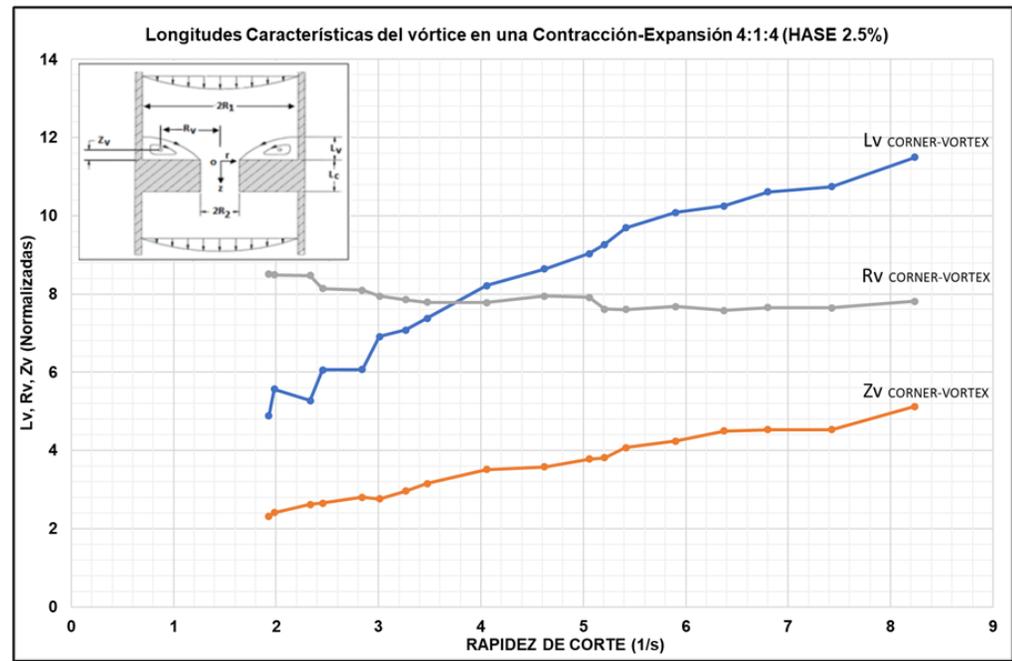
a)



b)

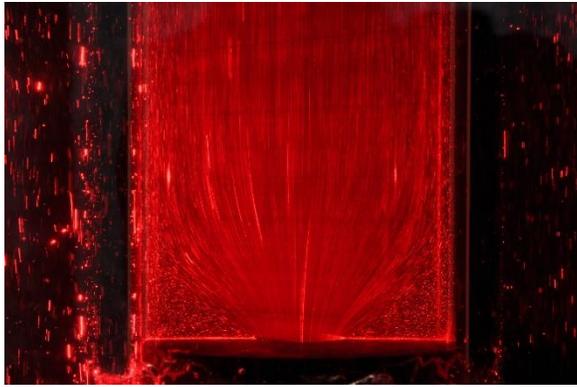


c)

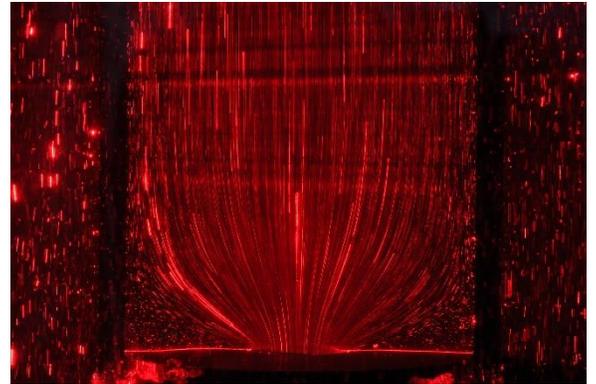


d)

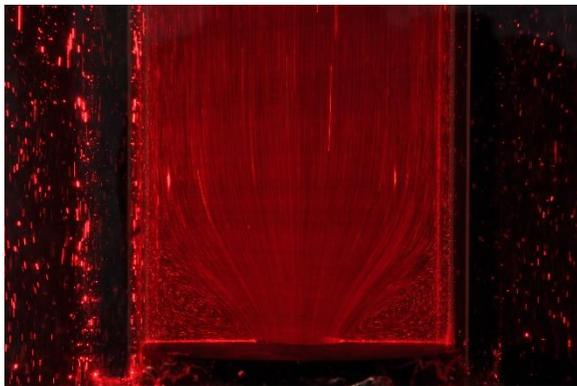
**Figura 3.1.2-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 4:1:4**



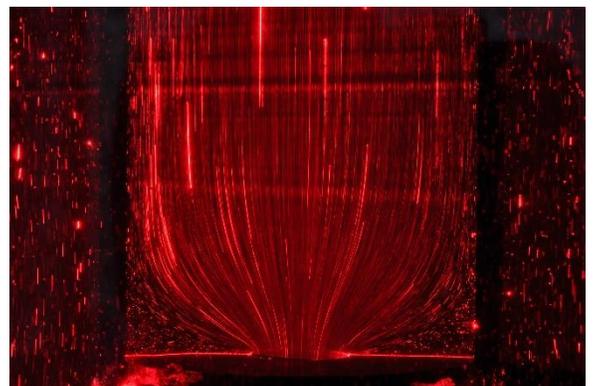
Hase 4:1:4  $\gamma = 1.9271$  1/s



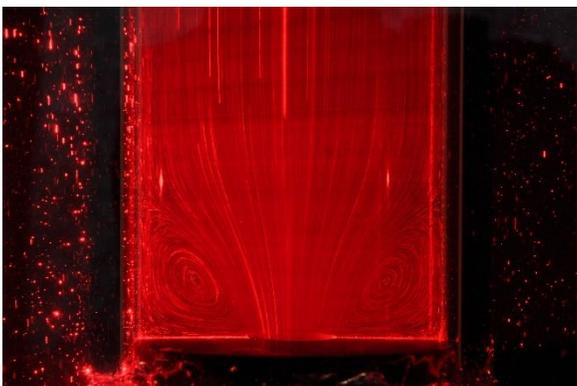
Boger 4:1:4  $\gamma = 1.2809$  1/s



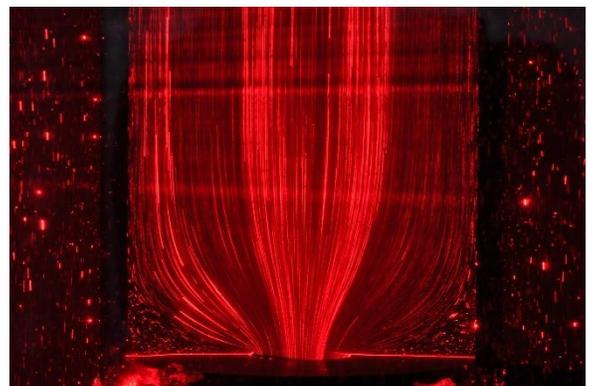
Hase 4:1:4  $\gamma = 3.0087$  1/s



Boger 4:1:4  $\gamma = 3.3070$  1/s



Hase 4:1:4  $\gamma = 7.4230$  1/s



Boger 4:1:4  $\gamma = 7.4608$  1/s

*Figura 3.1.2-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 4:1:4*

se desarrolle más, comparando esto con lo obtenido en la contracción 2:1:2 podemos apreciar que el flujo extensional se desarrolla más por lo que las medidas que produce en  $R_v$  son mucho mayores siendo la distancia máxima de la contracción 4:1:4 poco menos del doble del valor que se tiene para la de la contracción 2:1:2 por lo que se puede decir que los esfuerzos extensionales en esta contracción son mayores a los de la contracción anterior.

De igual forma que el fluido de Boger en la figura 3.1.2-1-d se tienen las distancias correspondientes a las diferentes longitudes de crecimiento del vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 4:1:4 esta vez para el fluido Hase, apareciendo el vórtice por primera vez a un valor de rapidez de corte de 1.9271, para la distancia que se conoce como  $R_v$  su comportamiento se ve afectado por el tipo de flujo dominante en el fluido además del adelgazamiento que este va teniendo a medida que aumenta en valor de rapidez de corte, razón principal por la que la distancia  $R_v$  tiene una ligera disminución desde que aparece el vórtice hasta un valor de rapidez de corte de 5.2 aproximadamente, punto en el cual el flujo extensional comienza a desarrollarse en mínima cantidad por encima del flujo cortante y que desemboca en la predominancia ligera del flujo extensional uniaxial, haciendo que crezca muy tenuemente desde este punto y hacia el final del experimento; los valores que tiene la contracción 4:1:4 para  $R_v$  en el Hase son mayores que los de la contracción 2:1:2 por lo que se puede determinar que los esfuerzos extensionales a pesar que no predomine el flujo extensional y que se vea afectado por la forma en la cual el fluido se hincha y limita su desarrollo siguen siendo más fuertes que los esfuerzos de la contracción anterior.

Podemos concluir de esta forma que la distancia  $R_v$  para ambos fluidos se ve en mayor medida afectada por el desarrollo del flujo extensional en la contracción, por lo cual entre más se logre desarrollar, estas distancias se acrecentarán en mayor medida, aumentando así los valores obtenidos para la distancia  $R_v$ .

La distancia  $L_v$  mide desde la base de la contracción al límite superior del vórtice, mientras que la distancia  $Z_v$  va desde la base de la contracción hasta el centro del vórtice; es importante conocer que estas se encuentran conectadas entre sí, debido

a que ambas se verán afectadas por las líneas de corriente de los esfuerzos  $\tau_{rr}$  que resultan desplazadas por los esfuerzos  $\tau_{zz}$ , además de las características del fluido; para el fluido Boger cuya aparición del vórtice está en un valor de rapidez de corte de 1.2809 y se aprecia en la figura 3.1.2-1-c ambas distancias tanto  $L_v$  y  $Z_v$  tienen un comportamiento similar, creciendo ligeramente durante los primeros 4 puntos y teniendo una disminución en un valor de rapidez de corte de entre 3.1 y 3.3 aproximadamente, intervalo entre el cual se manifiesta la primera diferencia de esfuerzos normales en corte N1 disminuyendo ambas distancias y manteniéndose relativamente constantes con cierta tendencia de  $L_v$  hacia un ligero crecimiento y llegando al final de la experimentación un ligero descenso en su distancia que podemos atribuir al mayor desarrollo del flujo cortante en la parte final de la experimentación, así mismo  $Z_v$  se mantiene constante y posteriormente tiene un ligero descenso, por lo que podríamos determinar que, así como  $R_v$ ,  $L_v$  y  $Z_v$  en el fluido Boger son sensibles a los cambios en el tipo de flujo predominante con el cual se van desarrollando a lo largo de la contracción, así como la manifestación de la primera diferencia de esfuerzos normales, haciendo que los esfuerzos extensionales

$\tau_{zz}$  a medida que comienzan a verse en menor medida superados por las líneas de corriente de los esfuerzos  $\tau_{rr}$  hacen que los valores de las distancias  $L_v$  y  $Z_v$  comiencen a disminuir. Comparando estos resultados obtenidos con los que se muestran en la contracción 2:1:2, podemos observar que  $L_v$  y  $Z_v$  tienen valores más altos en la contracción 4:1:4 de los que obtuvieron en la contracción con un diámetro mayor.

Para el caso del fluido Hase las características que intervienen en el desarrollo de las distancias  $L_v$  y  $Z_v$  son principalmente el tipo de flujo que predomina y el adelgazamiento que el fluido tiene, estas distancias las podemos apreciar en la figura 3.1.2-1-d, observando las curvas vemos que aunque ambas tienen un comportamiento similar en general creciendo a medida que la rapidez de corte aumenta,  $L_v$  tiene una pendiente mayor de la que tiene  $Z_v$  y esto es debido a la característica adelgazante del fluido Hase,  $Z_v$  va creciendo más lentamente porque a pesar de que el desarrollo de los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  crecen cada vez más

y desplazan cada vez más a los esfuerzos  $\tau_{rr}$  al adelgazarse el fluido hace que las líneas de corriente adelgacen de igual forma desplazando el centro del vórtice hacia lejos de la base de la contracción de manera menos intensa, sin embargo  $L_v$  crece más rápido debido a que al llegar a la pared las líneas de corriente  $\tau_{rr}$  y continuar su recorrido en sentido contrario al del que viene fluyendo el fluido y con la fuerza que tienen desplazan las líneas de corriente de los esfuerzos  $\tau_{rz}$  que vienen de la parte superior de la tubería incrementando la distancia del límite superior del vórtice a la base de la contracción. Si comparamos la contracción 2:1:2 con esta podemos ver que los valores de esta contracción son superiores a los que presenta la contracción de mayor diámetro; por lo que en el fluido Hase al igual que en el Boger al disminuir el diámetro de la contracción los vórtices adquieren un tamaño más grande y apareciendo antes en la experimentación que en los de la contracción 2:1:2.

Comparando las distancias en la contracción 4:1:4 para los fluidos Boger y Hase podemos llegar a la conclusión de que el fluido Boger presentará vórtices antes en cuanto a valores de rapidez de corte, así mismo estos vórtices no presentarán una variación significativa en cuanto al tamaño de crecimiento de sus distancias, también es importante mencionar que en cuanto a las distancias representadas para el fluido Hase la condición adelgazante que este tiene promueve un crecimiento del tamaño del vórtice volviendo vórtices de mayor tamaño que los que presenta el fluido Boger y con una mayor aproximación entre el centro del vórtice y el centro de la contracción.

### 3.1.3 Fluidos en contracción-expansión 6:1:6

A medida que la contracción disminuye su diámetro, los fluidos Boger y Hase comienzan a tener diferentes respuestas a los cambios de la contracción, los cuales se ven reflejados en las características de la dominancia del tipo de flujo, la presencia de vórtices y el tamaño que estos tienen.

En la figura 3.1.3-1-a podemos apreciar la gráfica de caída de presión total contra la rapidez de corte en esta podemos ver que el fluido de Boger se comporta similar al fluido newtoniano y a partir de 8.657 en valor de rapidez de corte crece rápidamente hasta 4,334 Pa aproximadamente siendo poco más del doble del valor máximo de la caída de presión alcanzado por el fluido newtoniano, indicándonos que después de este punto manifiesta el fluido su elasticidad. Para el fluido Hase el comportamiento de su recta durante toda la experimentación se mantiene debajo de la recta correspondiente al fluido de referencia, este comportamiento se debe a la forma en la cual el fluido se va adelgazando más a medida que la rapidez de corte aumenta, disminuyendo cada vez más rápido la pendiente que tiene gracias al decaimiento del valor de su viscosidad cortante. Es importante recordar que los resultados que tienen los fluidos en este primer gráfico no son concluyentes y las razones del comportamiento de sus curvas no es claro, por lo que muestran únicamente un panorama general de los fluidos en sí.

Si comparamos los valores que se han obtenido en la contracción 6:1:6 con los obtenidos en las dos contracciones anteriores podemos ver que ambos fluidos tienen un comportamiento similar al que se presenta en la contracción 4:1:4, pero aunque su comportamiento es similar los valores que llegan a presentar en esta contracción son mucho mayores en la caída de presión total, así mismo al igual que la contracción 4:1:4 solo el Boger se encuentra sobre el fluido newtoniano en comparación con la contracción 2:1:2, también el Boger comienza a tardar más en manifestar su elasticidad, a diferencia de esto el fluido Hase ya no se comporta como el fluido newtoniano durante una parte de la recta como en la contracción 4:1:4 o por encima del fluido newtoniano como en la contracción 2:1:2,

manteniéndose prácticamente por debajo de los valores de este desde el inicio de la experimentación.

En la figura 3.1.3-1-b se tiene la caída de presión en exceso normalizada contra la rapidez de corte en una contracción 6:1:6, es importante que recordemos la importancia de esta gráfica ya que en esta podemos visualizar la competencia de flujos a través de la normalización de la caída de presión en exceso. Lo primero que podemos ver en la curva de comportamiento del fluido Boger es que comienza con un ligero desarrollo del flujo extensional, sin embargo debido a un mayor desarrollo en el flujo cortante resultado de una interacción mayor del fluido con las paredes, los valores de la caída de presión en exceso normalizada disminuyen quedando ligeramente debajo de la línea de referencia, manteniéndose relativamente constantes a partir de un valor de rapidez de corte de 3.271, punto en el cual se manifiesta la primera diferencia de esfuerzos normales en corte N1, motivo por el cual el fluido se hincha previo a la contracción y dificulta la entrada del fluido a la contracción haciendo que sea más difícil el desarrollo del flujo extensional, que se mantiene constante con motivo de la aparición del efecto Binding provocado por la aparición de N1, cuando se llega a un valor de rapidez de corte de 6.935 el fluido comenzará rápidamente a aumentar en valores de caída de presión en exceso normalizada a medida que aumente el gasto, provocado principalmente por un mayor desarrollo del flujo extensional sobre el flujo cortante.

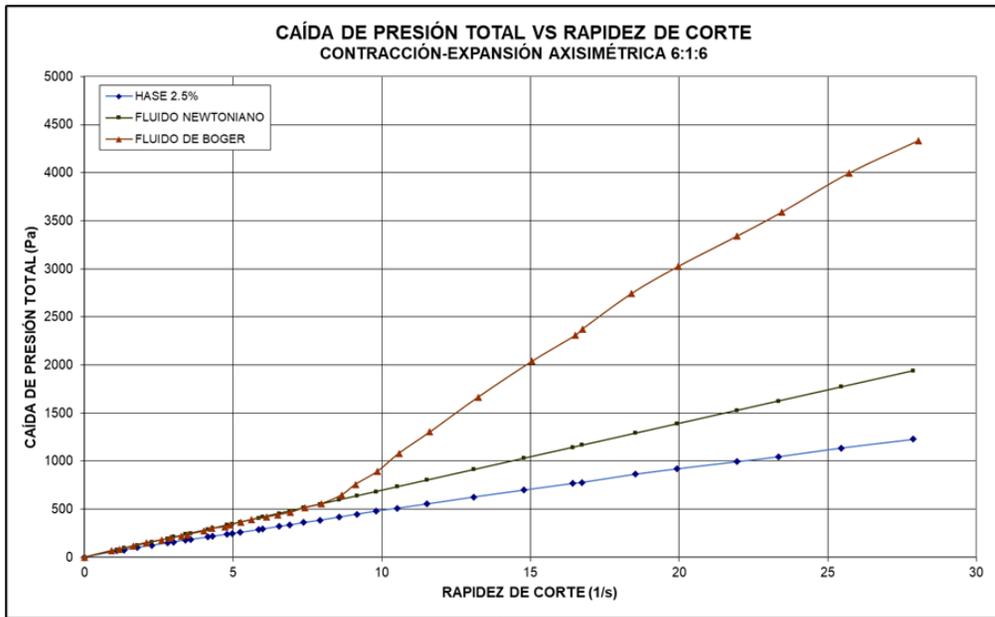
El fluido Hase comienza descendiendo desde los primeros valores que presenta, lo que nos permite observar una predominancia del flujo cortante sobre el extensional, posterior a esto el fluido continua su descenso ligeramente hasta llegar a un valor en la rapidez de corte de 5.856, donde comienza a ascender debido a un desarrollo mayor del flujo extensional y al llegar a un valor de rapidez de corte de 9.812 el fluido comienza a mantener sus valores de caída de presión en exceso normalizada constantes por lo que al suceder esto los dos tipos de flujos que coexisten se desarrollan en la misma proporción.

Es importante mencionar que al presentarse un mínimo en la caída de presión en exceso normalizada es posible asegurar la presencia del efecto Binding en el

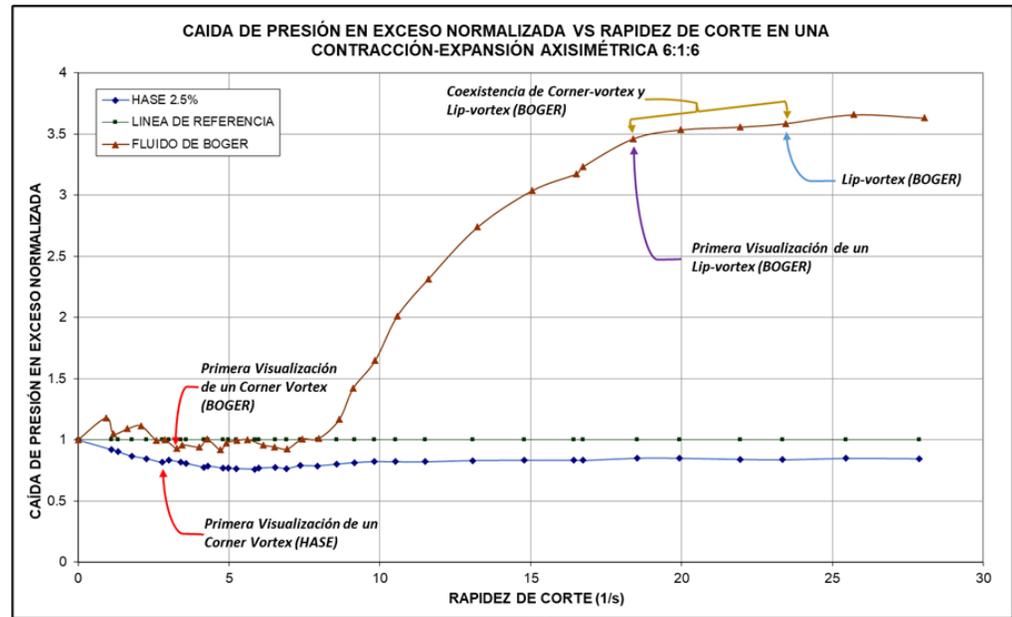
comportamiento que tiene el fluido al aumentar el gasto de este, también resulta fundamental que seamos capaces de notar que al disminuir el diámetro de la contracción el desarrollo del flujo extensional será más complicado y la fuerza de las líneas de corriente del flujo extensional serán más fuertes siendo estos dos aspectos provocados por el aumento de los efectos elásticos del fluido, para el fluido Hase tomando en consideración el punto anterior, aunado al adelgazamiento provocado por una viscosidad muy baja a estos valores de rapidez de corte, lo que origina un acercamiento de la curva en la contracción 6:1:6 con la del fluido newtoniano, que resulta más cercana que la que se tiene en la curva de la contracción 4:1:4.

La dinámica de flujo que se puede observar en esta contracción es notablemente diferente a lo que se presenta en las dos contracciones anteriores debido a las implicaciones que tiene el diámetro menor de la contracción y las características únicas que provoca en los fluidos; cuando un sistema que presenta una contracción ya no puede seguir liberando energía por medio de la interacción del fluido por interacciones viscosas con las paredes, se generan vórtices corner vortex como un modo para que el sistema pueda seguir liberando la energía, sin embargo cuando los vórtices que ha generado son insuficientes para continuar con la liberación de energía aparecen los vórtices secundarios para liberar la energía que no puede ser liberada por parte del vórtice primario.

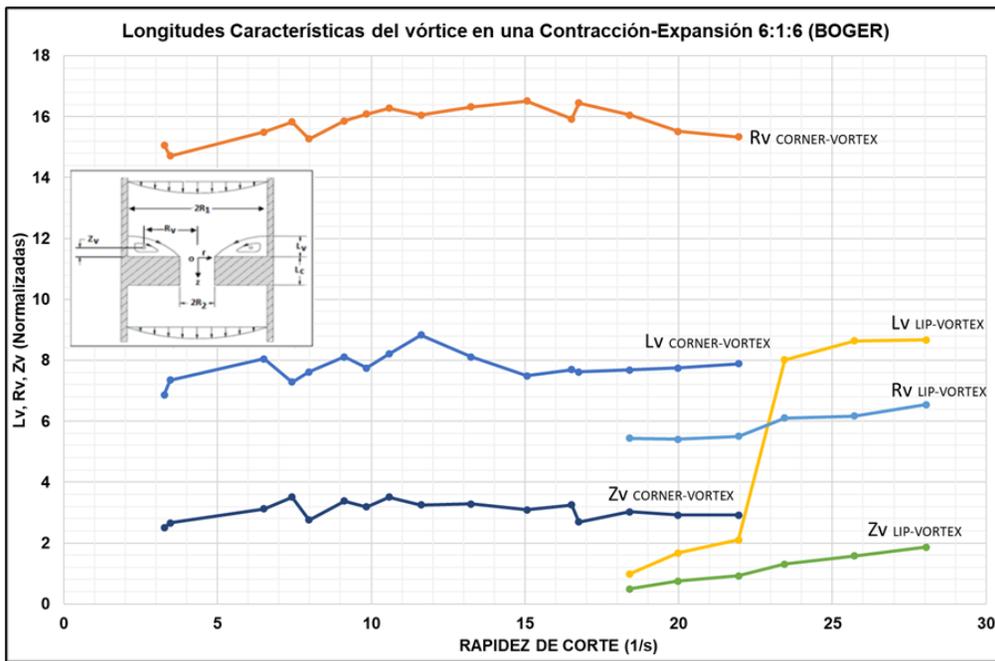
Es importante recordar cómo es que se distingue un corner vortex de un lip vortex, el corner vortex es un vórtice que se origina en la esquina entre las paredes previas a llegar a la contracción y la base de la contracción, este tipo de vórtice termina siendo producto de una mayor selectividad del flujo extensional sobre la contracción, los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  que vienen del centro de la contracción son más fuertes por lo que desplazan a los esfuerzos cortantes  $\tau_{rr}$  hacia las paredes de la contracción lo que conlleva a que al aumentar el valor de rapidez de corte aumente el flujo extensional y exista una mayor selectividad por parte de las líneas de corriente que entran a la contracción; a diferencia de este un lip vortex tiene como origen el labio mismo de la contracción generado por la acción misma de los



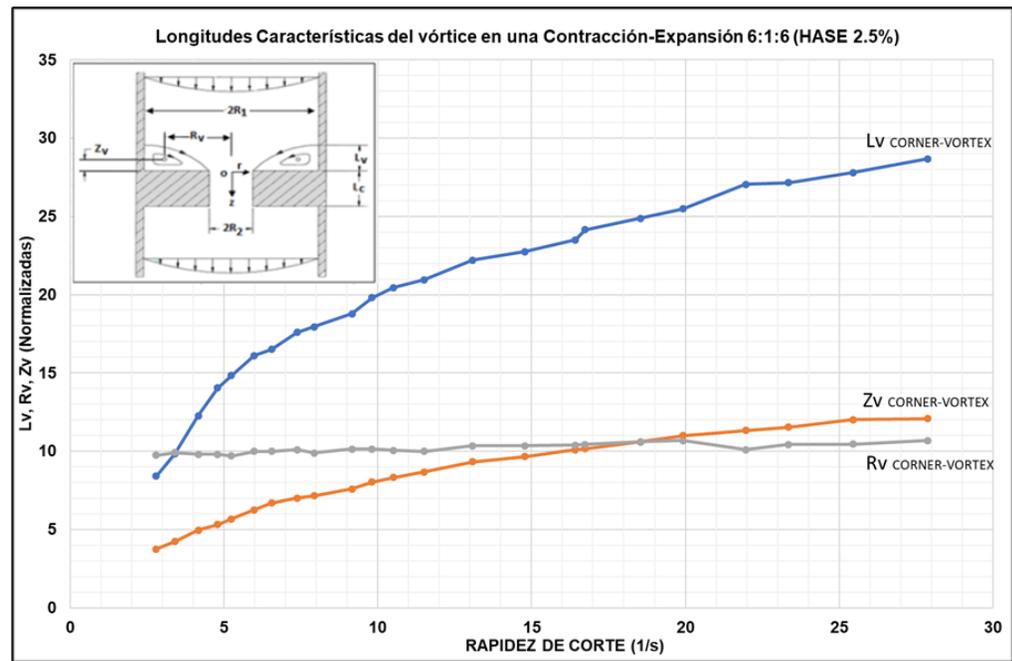
a)



b)

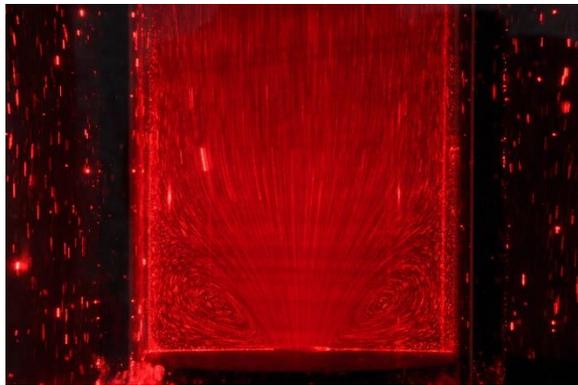


c)

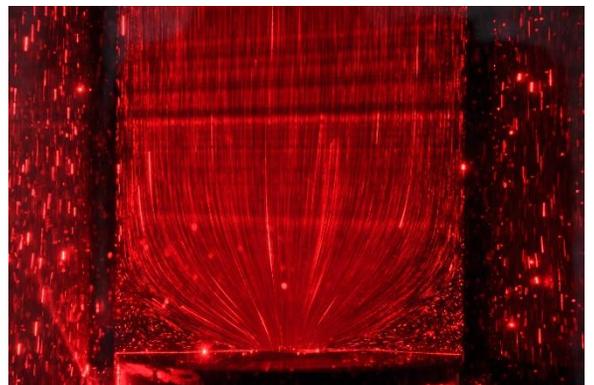


d)

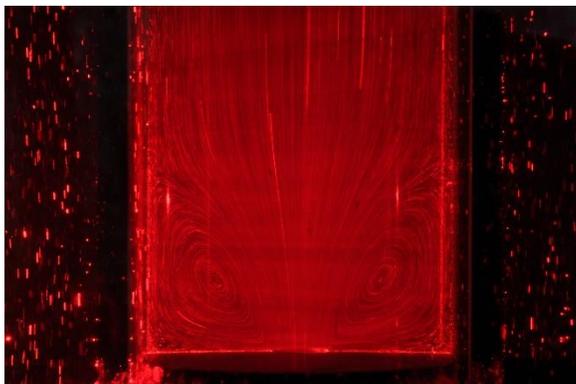
**Figura 3.1.3-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 6:1:6**



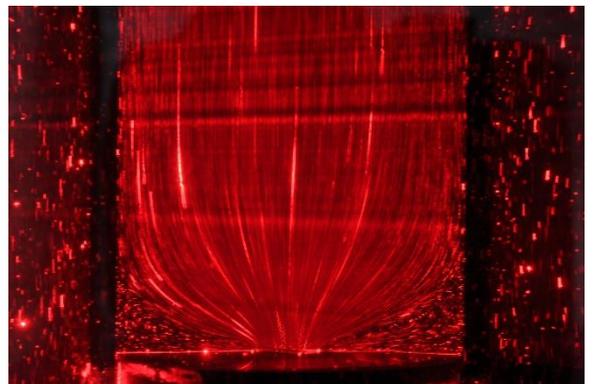
Hase 6:1:6  $\gamma = 4.7960$  1/s



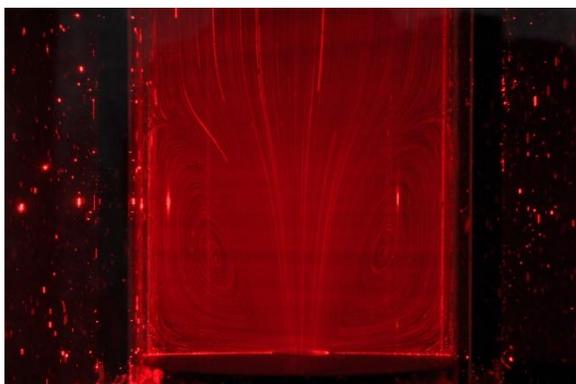
Boger 6:1:6  $\gamma = 16.5198$  1/s



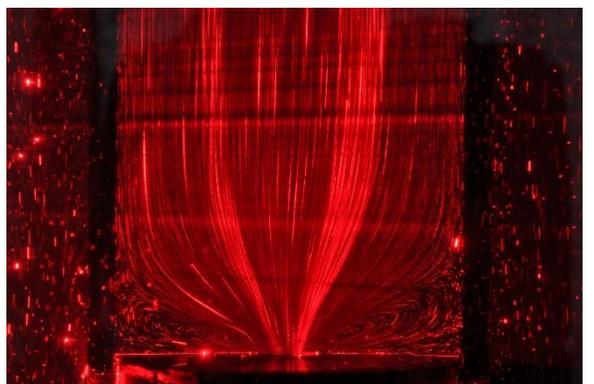
Hase 6:1:6  $\gamma = 11.5127$  1/s



Boger 6:1:6  $\gamma = 19.9780$  1/s



Hase 6:1:6  $\gamma = 27.8804$  1/s



Boger 6:1:6  $\gamma = 25.7099$  1/s

*Figura 3.1.2-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 6:1:6*

esfuerzos extensionales, donde la competencia de esfuerzos deja de darse entre los extensionales y los cortantes para pasar a ser únicamente entre los esfuerzos extensionales del centro de la contracción y los que se encuentran en las paredes de la contracción.

En la figura 3.1.3-1-c podemos observar las diferentes distancias que se presentaron para los vórtices contra la rapidez de corte para la contracción 6:1:6 en el fluido Boger, en esta figura podemos apreciar 2 conjuntos de curvas resultado de las diferentes distancias presentadas por los vórtices, ya que a diferencia de las contracciones anteriores para el fluido de Boger en la contracción 6:1:6 se presenta un vórtice secundario a un valor de rapidez de corte de 18.4035; comenzamos viendo a la primer distancia  $L_v$  que representa el tamaño del corner vortex desde la base de la contracción hasta el límite superior de este y que se aprecia por primera vez en un valor de rapidez de corte de 3.2710, después de este punto comienza a crecer ligeramente debido al desarrollo de los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  a lo largo de la contracción, los cuales comienzan a desplazar cada vez más a los esfuerzos cortantes  $\tau_{rr}$  ocasionando que el tamaño del vórtice crezca, sin embargo, al llegar a un valor de rapidez de corte de 11.6190 comienza a decrecer lo que le podemos atribuir al cambio de la competencia entre esfuerzos cortantes y extensionales, que pasa a ser únicamente competencia entre las líneas de corriente generadas por los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  (esfuerzos extensionales del centro de la contracción y esfuerzos extensionales de las paredes de la contracción) sucediendo hasta un valor de 18.4035 para la rapidez de corte, posterior a este punto aparece un vórtice secundario de tipo lip vortex, debido a la liberación de energía producto del desplazamiento de los esfuerzos extensionales cercanos a las paredes por parte de los esfuerzos extensionales de la línea central, este desplazamiento va a requerir de una liberación de energía cada vez más grande, por lo que esta será adquirida por la energía asignada a la formación del corner vortex razón por la cual este tiende a desaparecer a medida que el lip vortex va en crecimiento, ambos vórtices coexisten en los valores de rapidez de corte de 18.4035 y hasta 21.9506 manteniéndose el valor de  $L_v$  constante para el corner vortex entre estos puntos, mientras que para el lip vortex desde 18.4035 se tiene un crecimiento que se verá

impulsado luego de 21.9506 creciendo a partir de este momento hasta llegar al tamaño del corner vortex y continuando en crecimiento.

Para el caso de  $Z_v$  la distancia del centro del vórtice a la base de la contracción que presenta el corner vortex tiene un comportamiento similar al de  $L_v$  teniendo un ligero crecimiento hasta llegar a 11.6190 en rapidez de corte, donde posteriormente decrece y permanece constante durante los puntos de coexistencia de ambos tipos de vórtices hasta desaparecer el corner vortex; para  $Z_v$  del lip vortex que aparece en un valor de rapidez de corte de 18.4035 se mantiene en un crecimiento constante resultado del desplazamiento de los esfuerzos extensionales de la pared de la contracción hacia fuera de la contracción siendo afectada de igual forma que  $L_v$  por parte del cambio de competencia de esfuerzos.

En  $R_v$  para el corner vortex se mantiene un crecimiento constante desde la aparición del vórtice y hasta el punto donde cambia la competencia de esfuerzos en 11.619 en el valor de rapidez de corte, posteriormente decrece ligeramente y en los puntos de coexistencia de los vórtices se mantiene bajando su distancia entre el centro del vórtice y el centro de la contracción; para el caso de  $R_v$  en el lip vortex luego de su aparición en 18.4035 se mantiene en un ligero crecimiento siendo desplazado hacia las paredes por los esfuerzos extensionales desplazados de la pared de la contracción por los esfuerzos extensionales de la línea central de la contracción.

Para el fluido Hase tenemos un comportamiento de las distancias de los vórtices que son consecuencia directa del efecto conjunto del adelgazamiento significativo en la viscosidad cortante del fluido y la manifestación de la primera diferencia de esfuerzos normales la cual ocasiona que se presente el efecto Binding, así como una mayor manifestación de la elasticidad en extensión sobre el adelgazamiento.

Como se puede observar en la figura 3.1.3-1-d se aprecia el comportamiento de  $R_v$ ,  $L_v$  y  $Z_v$  las distancias que conforman a los vórtices generados en la contracción 6:1:6 para el fluido Hase en esta contracción se presenta únicamente el tipo de vórtice corner vortex, debido a que los esfuerzos extensionales crecen más en comparación que los esfuerzos cortantes debido al adelgazamiento del fluido, aumentando considerablemente más los efectos elásticos debido al mayor

crecimiento del flujo extensional que los efectos viscosos asociados al flujo cortante; el tipo de vórtice lip vortex no hace una aparición debido a que el fluido Hase al encontrarse en continuo adelgazamiento al aumentar la rapidez de corte genera que el desarrollo de los esfuerzos cortantes se hagan más pequeños, mientras que los esfuerzos extensionales seguirán acrecentándose, esto producto del constante crecimiento de los efectos elásticos del fluido.

La distancia que va de la base de la contracción hasta el límite superior del vórtice  $L_v$ , se incrementa durante toda la experimentación producto del desplazamiento de las líneas de corriente de los esfuerzos cortantes por parte del crecimiento de los esfuerzos extensionales en el centro de la contracción.

En el caso de la distancia que conforma a  $Z_v$  y que esta de la base de la contracción hasta el centro del vórtice se mantiene al igual que  $L_v$  en crecimiento, sin embargo este es menos pronunciado debido a que su desarrollo es proveniente de la manifestación elástica extensional en la zona de crecimiento de los vórtices, la cual no crece significativamente.

La distancia que va desde el centro del vórtice hasta el centro de la contracción  $R_v$ , se mantiene durante toda la experimentación relativamente constante, ya que la manifestación elástica proveniente de las líneas de corriente que están regresando del límite superior del vórtice no desplazan al centro del vórtice hacia las paredes, además de que los esfuerzos cortantes desplazados hacia las paredes no poseen la magnitud necesaria para aumentar el valor de  $R_v$ .

Tanto  $Z_v$  como  $R_v$  tienen un origen elástico y se ven modificadas por el desarrollo de la manifestación elástica en las líneas de corriente del fluido sin embargo su crecimiento es menos pronunciado o incluso muy reducido debido al adelgazamiento mismo del fluido lo que ocasiona que a pesar que se vuelve más elástico y pasan una mayor cantidad de líneas de corriente en el vórtice, este no se vea severamente afectado por estas.

### 3.1.4 Fluidos en contracción-expansión 8:1:8

A diferencia de las contracciones anteriores en esta contracción ambos fluidos se acentúan con una presencia elástica mayor, como resultado de que el orificio de la contracción resulta ser más selectivo con las líneas de corriente que deja pasar a través de la contracción.

En la figura 3.1.4-1-a podemos ver la gráfica correspondiente a la caída de presión total contra la rapidez de corte, es importante recordar que esta figura no presenta ninguna conclusión acerca de la dinámica de flujo para los fluidos y que los resultados no se pueden atribuir a factores específicos en sus cambios.

Si visualizamos el recorrido que tiene el comportamiento del fluido Boger podemos notar la manifestación de las diferencias elásticas en el fluido de Boger crece sustancialmente cuadruplicando el máximo de su caída de presión total de 15,970 Pa con respecto al máximo obtenido de caída de presión total en la contracción 6:1:6 de 4,300 Pa; comparando ahora el fluido de Boger con el newtoniano en la contracción 8:1:8 podemos ver que el Boger llega a ser hasta poco más de 3 veces más grande en su  $\Delta P_T$  que la obtenida en el fluido newtoniano en su máximo valor alcanzando 5,339 Pa; el Hase muestra un decremento visible y cuya curva resultante termina teniendo muy poca pendiente, debido en mayor parte al efecto viscoso del fluido y no tanto al elástico provocado por el adelgazamiento del fluido a medida que el fluido aumenta su rapidez de corte, teniendo el doble efecto que hace que su máximo de caída de presión sea de apenas 3,079 Pa lo que nos permite ver que el efecto elástico entre el fluido Boger y el Hase es muy diferente, siendo el Boger poco más de 5 veces mayor que el Hase.

Los fluidos se van comportando de maneras diferentes mientras se encuentran sometidos a diferentes contracciones, mientras más disminuye el diámetro de la contracción su comportamiento comienza a volverse más complejo. En la figura 3.1.4-1-b podemos visualizar el gráfico correspondiente a la caída de presión en exceso contra la rapidez de corte, en general el fluido Boger tiende a desarrollar su curva por encima del fluido de referencia con una pendiente más pronunciada entre

más se aumenta el gasto, mientras que el Hase se mantiene prácticamente sobre la línea de referencia.

El fluido Boger comienza su trayectoria desde 0 hasta un valor de 8.401 de rapidez de corte con una predominancia en las interacciones viscosas que tiene con las paredes dando como resultado un flujo cortante, en esta zona aunque exista la primera diferencia de esfuerzos normales en corte  $N_1$  estos resultan insignificantes comparados con los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  que se desarrollan en el orificio de la contracción y que hasta un valor en rapidez de corte de 10 los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  son prácticamente los que van a generar el crecimiento de la caída de presión en exceso adimensional, por lo que podemos decir que entre los valores de 0 a 9 en rapidez de corte prácticamente el crecimiento de los flujos cortante y extensional son iguales, teniendo después del valor de rapidez de corte de 9 y hasta 22.852 posteriormente un crecimiento predominante del flujo extensional generando una pendiente más grande, después de este punto el flujo cortante comenzará a crecer también haciendo que poco a poco la pendiente que se genera de la competencia de los flujos cortante y extensional tenga una pendiente menos pronunciada.

En el fluido Hase al aumentar su rapidez de corte y verse sometido a una contracción de un diámetro tan reducido en la contracción 8:1:8 presenta una doble contribución que resulta en la similitud de las trayectorias entre la curva del fluido Hase y la recta del fluido de referencia; la primera es el adelgazamiento tan elevado que aumenta con la rapidez de corte, mientras que la segunda es el efecto elástico tan alto que presenta el fluido, en combinación simulan el comportamiento del fluido newtoniano.

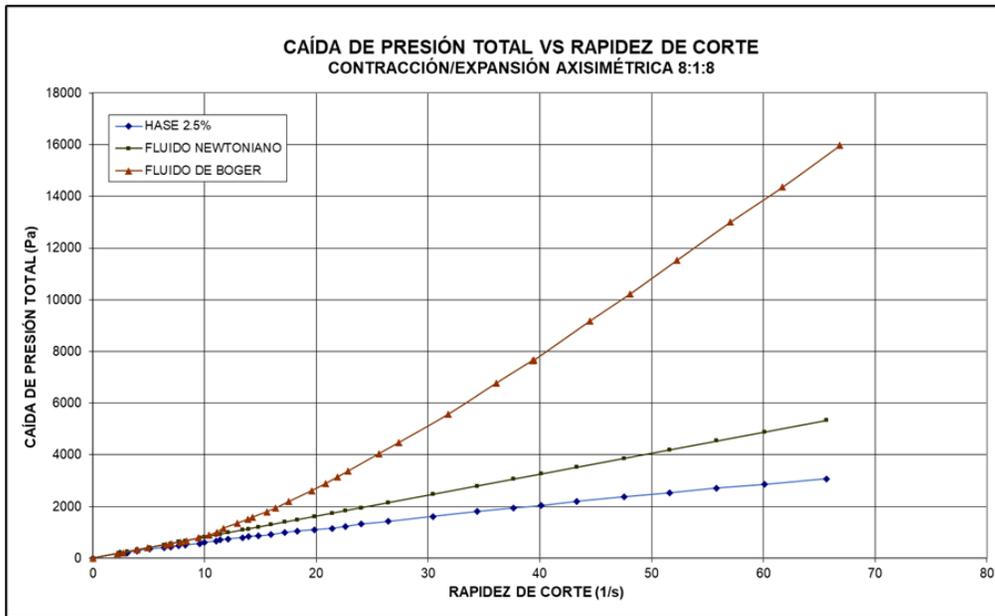
En las contracciones anteriores ninguno de los fluidos se había comportado de esta manera, el fluido Boger a pesar de que continúa teniendo una visible predominancia del flujo extensional sobre el cortante, cada vez permanece más tiempo con un crecimiento proporcional entre ambos tipos de flujo a valores de rapidez de corte bajos, mientras que en el Hase el efecto adelgazante que posee sumado a la alta

magnitud de su elasticidad le permiten tener una trayectoria menos variable en cuanto a sus valores de caída de presión en exceso.

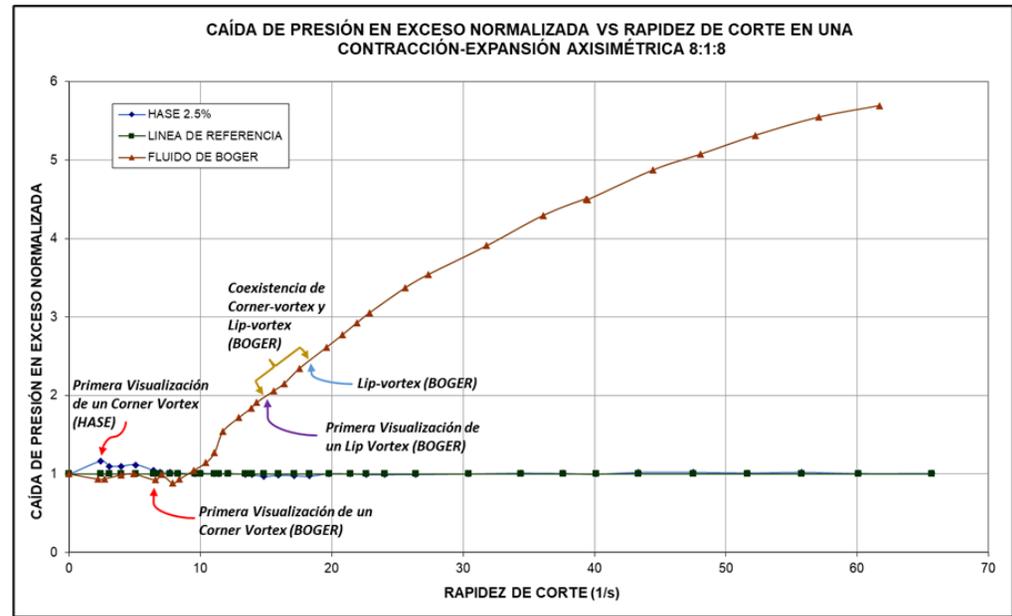
Como se mencionó en secciones anteriores, los vórtices se generan por la necesidad del sistema para liberar energía por un medio distinto a las interacciones viscosas del fluido con las paredes, debido a que estas son insuficientes para liberar la energía que tiene el sistema, entre mayor sea la necesidad de liberación energética mayor será el tamaño del vórtice, así mismo dependiendo del tipo de competencia que se esté llevando a cabo en la entrada de la contracción será el tipo y el tamaño del vórtice que se presente.

En el fluido Boger el diámetro de la contracción-expansión 8:1:8 al ser tan reducido genera una mayor selectividad al permitir el paso de las líneas de corriente; en la figura 3.1.4-1-c podemos ver las diferentes distancias de los vórtices  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  contra la rapidez de corte para el fluido Boger; cuando aparece el primer vórtice siendo este un corner vortex a una rapidez de corte de 6.5589 no hay un desplazamiento significativo de los esfuerzos cortantes por parte de los esfuerzos extensionales, por lo que a pesar de que los esfuerzos  $\tau_{zz}$  desplazan las líneas de corriente de los esfuerzos  $\tau_{rr}$  hacia las paredes estos no se encuentran en una competencia directa, siendo en mayor medida una competencia dominante desde que aparece el primer vórtice entre esfuerzos extensionales del centro de la contracción y esfuerzos extensionales próximos a las paredes de la contracción que tienen cierta contribución cortante, esta competencia entre esfuerzos extensionales es la razón por la cual el tamaño del corner vortex no se ve alterado, manteniendo relativamente su tamaño y la cantidad de líneas de corriente correspondientes al esfuerzo cortante desplazado hasta el último valor de rapidez de corte 17.6272 donde desaparece el vórtice consumido por el lip vortex que aparece como vórtice secundario en un valor de rapidez de corte de 15.0615 y que nace por la competencia entre los esfuerzos extensionales del centro y las paredes de la contracción.

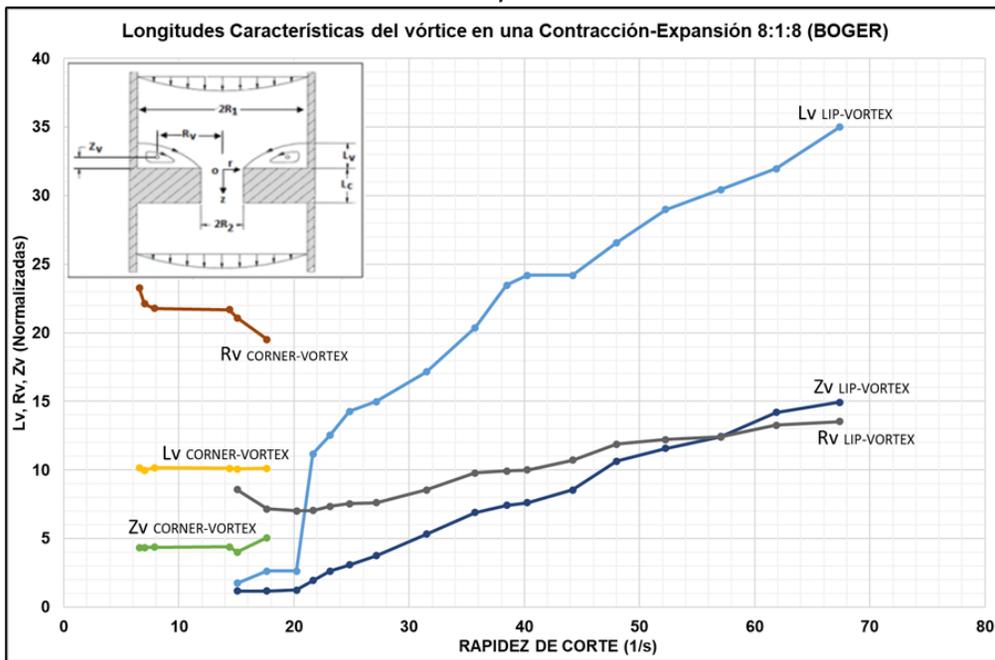
En la figura 3.1.4-1-c se aprecian las diferentes longitudes características que se midieron para los vórtices contrala rapidez de corte en un fluido Boger a una



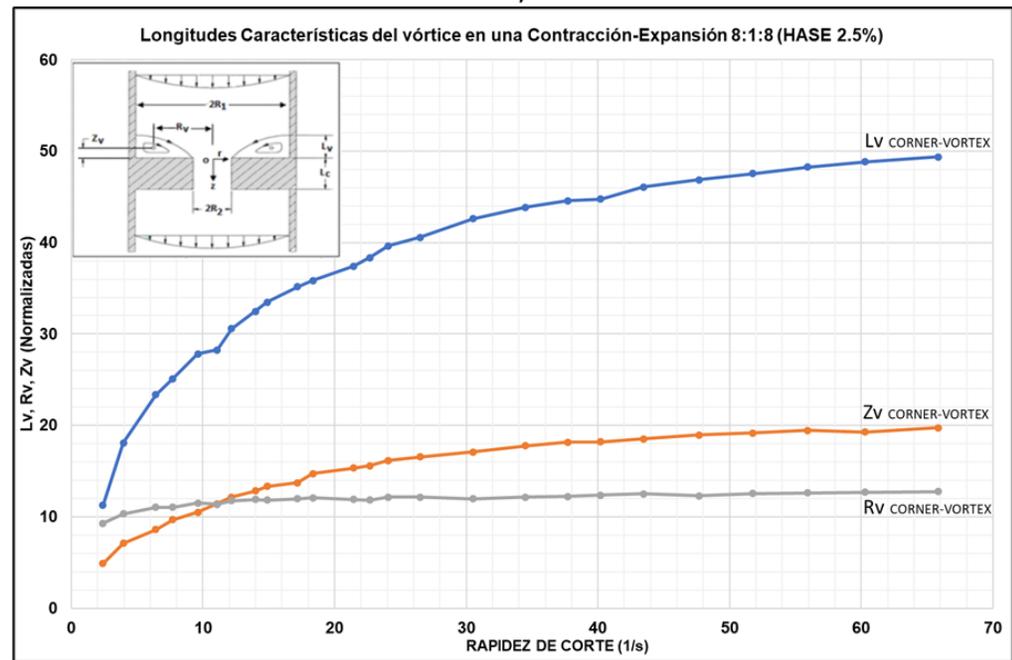
a)



b)

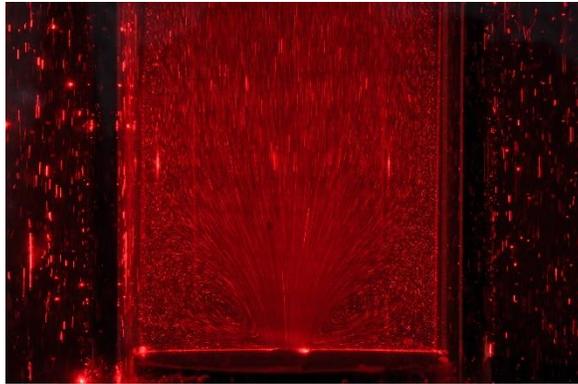


c)

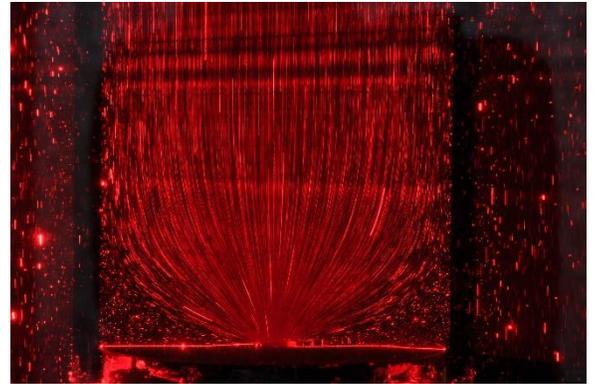


d)

Figura 3.1.4-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 8:1:8



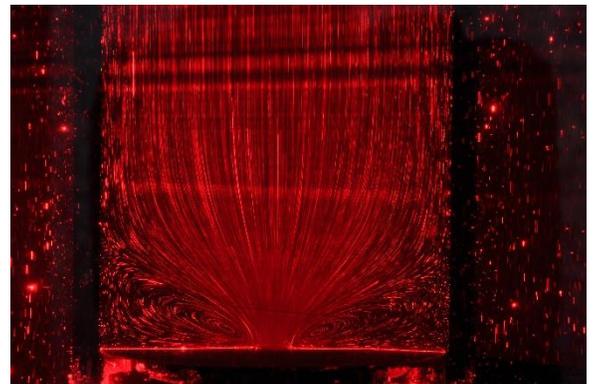
Hase 8:1:8  $\dot{\gamma} = 3.9652 \text{ 1/s}$



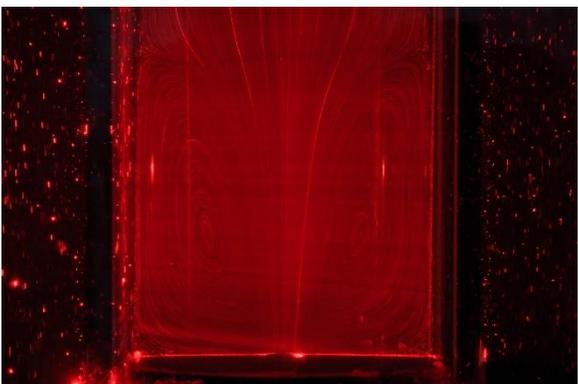
Boger 8:1:8  $\dot{\gamma} = 14.3907 \text{ 1/s}$



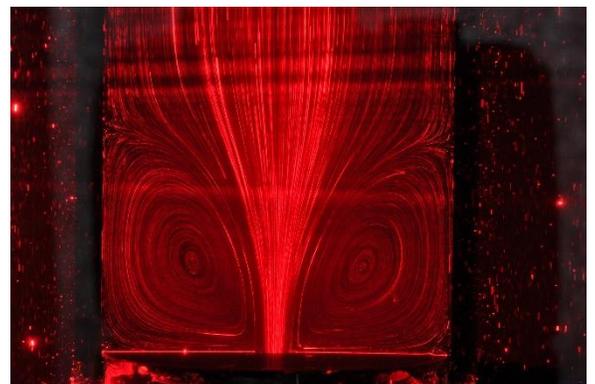
Hase 8:1:8  $\dot{\gamma} = 18.3502 \text{ 1/s}$



Boger 8:1:8  $\dot{\gamma} = 23.1229 \text{ 1/s}$



Hase 8:1:8  $\dot{\gamma} = 65.8332 \text{ 1/s}$



Boger 8:1:8  $\dot{\gamma} = 67.3740 \text{ 1/s}$

*Figura 3.1.4-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 8:1:8*

contracción-expansión 8:1:8, podemos apreciar en esta gráfica que al igual que en la contracción-expansión 6:1:6 luego de que aparece el primer vórtice (corner vortex), el fluido presenta una condición bajo la cual la competencia que se tenía en contracciones anteriores (2:1:2, 4:1:4 y 6:1:6) cambia, debido a la gran selectividad que presenta el diámetro tan reducido de esta contracción, hace que la competencia pase de ser entre esfuerzos cortante y extensional a ser entre los esfuerzos extensionales del centro de la contracción contra esfuerzos extensionales con cierta carga cortante de las paredes de la contracción, este fenómeno ocasiona que las distancias correspondientes al corner vortex  $L_v$  (distancia de la base de la contracción a límite superior del vórtice),  $Z_v$  (distancia de la base de la contracción al centro del vórtice) y  $R_v$  (distancia del centro de la contracción al centro del vórtice), que aparecen a un valor de rapidez de corte de 6.5589 se mantengan en valores iguales durante parte de la coexistencia con el lip vortex (Valores de rapidez de corte entre 15.0615 y 17.6272) y hasta que el corner vortex desaparece (a rapidez de corte de 17.6272), debido a que se mantiene un desplazamiento constante de las líneas de corriente de  $\tau_{rr}$  por parte de los  $\tau_{zz}$  de las paredes de la contracción que se encuentran en competencia con los  $\tau_{zz}$  del centro de la contracción.

Para el lip vortex que aparece a un valor de rapidez de corte de 15.0615 y que se mantiene hasta el fin de la experimentación,  $L_v$  mantiene un ligero crecimiento hasta que desaparece el corner vortex (rapidez de corte de 17.6272), punto después del cual comienza un crecimiento acelerado en su límite superior debido al aumento del número de líneas de corriente que son desplazadas por los esfuerzos extensionales de las paredes de la contracción con contribución cortante por los esfuerzos extensionales centrales haciendo que el vórtice crezca rápidamente;  $Z_v$  al igual que  $L_v$  se ve afectada por el mismo aumento de la cantidad de las líneas de corriente desplazadas de los  $\tau_{zz}$  de las paredes de la contracción por los  $\tau_{zz}$  del centro de la contracción aunque crecerá en menor medida de lo que crece  $L_v$  por sí misma;  $R_v$  para el lip vortex se mantiene bajo un crecimiento moderado en comparación de  $L_v$  y  $Z_v$ , este crecimiento es producto del desplazamiento del vórtice por parte de las líneas de corriente hacia las paredes provocado por el aumento en los esfuerzos

extensionales con cierta carga cortante que son desplazados de las paredes de la contracción hacia las paredes del tubo superior a la contracción.

Para poder analizar el panorama completo del comportamiento de las diferentes longitudes  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  de los vórtices presentados en el fluido Hase hay que recordar que los principales efectos que modifican la dinámica de flujo en esta contracción son el adelgazamiento y la intensa manifestación elástica que tiene el fluido, además de la alta selectividad que tiene la contracción gracias al diámetro tan pequeño que posee.

En la figura 3.1.4-1-d podemos apreciar las distancias  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  contra la rapidez de corte en la contracción expansión 8:1:8 para el fluido Hase; en esta figura podemos apreciar que el vórtice que aparece es del tipo Corner Vortex a una rapidez de corte de 2.4089 y que mantiene el tipo de vórtice hasta el final de la experimentación.  $L_v$  es la distancia que mide desde la base de la contracción hasta el límite superior del vórtice, durante toda la experimentación esta se mantiene en crecimiento en diferente proporción, esto se puede apreciar en la pendiente pronunciada que forma  $L_v$  hasta poco después de un valor de rapidez de corte de aproximadamente 12 donde comienza a reducir gradualmente su pendiente sin dejar de crecer, si comparamos este comportamiento con la figura 2.2.1-2 podemos ver que en el valor de rapidez de corte donde el crecimiento de  $L_v$  reduce su pendiente es también el valor máximo que alcanza la viscosidad extensional del Hase y que después de este valor comienza a adelgazarse al igual que la viscosidad cortante; los esfuerzos cortantes en la contracción se ven reducidos por efectos del flujo debido al descenso de la viscosidad cortante, lo que promueve a su vez que en el crecimiento de los esfuerzos extensionales estos hagan el desplazamiento de las líneas de corriente de los esfuerzos cortantes más fácilmente hacia las paredes del tubo superior, razón por la cual se presenta un crecimiento más marcado de  $L_v$ . Esta distancia en el fluido Hase es mayor que la que se presenta en el lip vortex del fluido Boger debido a que la baja viscosidad del fluido en la pared de la contracción desplaza una mayor cantidad de líneas de corriente.

La distancia que conforma desde la base de la contracción hasta el centro del vórtice  $Z_v$  crece de forma similar a  $L_v$  siendo consecuencia de una mayor liberación de líneas de corriente hacia las paredes del tubo superior a la contracción, en esencia si  $L_v$  crece,  $Z_v$  también; la diferencia que presenta es que sus valores son bastante menores a los de  $L_v$  y que además su crecimiento también es menos intenso.

En la distancia que va del centro de la contracción al centro del vórtice  $R_v$  las líneas de corriente desplazadas son débiles, tanto que el centro del vórtice no se desplaza en la dirección radial alejándose del centro, sin embargo las líneas desplazadas son lo suficientemente fuertes para impedir que el centro del vórtice se acerque al centro de la contracción por lo que prácticamente durante toda la experimentación esta distancia permanece en valores constantes.

El vórtice que se genera en el fluido Hase crece prácticamente solo en la dirección axial hacia la parte superior del tubo previo a la contracción, a diferencia de esto el fluido Boger crece en las direcciones axial hacia la parte superior de la tubería y radial hacia las paredes. Así mismo el vórtice que se presenta en el fluido Hase es más grande con respecto al Boger en la misma contracción estando relativamente 15 unidades por encima del valor máximo de  $L_v$ ; ambos fluidos presentan los vórtices más grandes en comparación con contracciones anteriores.

### 3.1.5 Fluidos en contracción-expansión 10:1:10

Esta contracción es la más pequeña de todas las que se utilizaron para la parte experimental que se usa como material para el análisis de la dinámica de flujo de los fluidos Boger y Hase a partir de la observación de vórtices, en esta las condiciones son aún más intensas que en las contracciones anteriores teniendo una mayor caída de presión además de presentar una selectividad alta de las líneas de corriente de ambos fluidos y que pasan a través de la contracción.

En la figura 3.1.5-1-a se tiene la caída de presión total contra la rapidez de corte, es importante recordar que esta gráfica no proporciona ninguna descripción de la dinámica de flujo de alguno de los fluidos, debido a que la medición de la caída de presión considera toda la sección del tubo, tanto antes de la contracción como después de esta, además de considerar la caída de presión en la contracción por lo que los datos que proporciona no son concluyentes para determinar alguna característica particular de la dinámica de flujo.

En la curva correspondiente al fluido Boger podemos notar que a gastos bajos mantiene un comportamiento similar al del fluido newtoniano y que al llegar a un valor de rapidez de corte de 19.421 comienza un aumento significativo en la pendiente aumentando rápidamente los valores de la caída de presión total; la caída de presión total tarda más en presentar su elasticidad debido a una mayor interacción viscosa del fluido con las paredes, el incremento que se presenta en  $\Delta P_T$  continua hasta el fin de la experimentación llegando a un valor máximo de poco más de 33,460 Pa siendo este valor más del doble de lo obtenido en el valor máximo de  $\Delta P_T$  de la contracción anterior y siendo 8 veces más grande que el máximo de la contracción 6:1:6; así mismo es casi 3 veces más grande que el máximo del fluido newtoniano en su misma contracción, con este comportamiento que tiene podemos saber que la manifestación elástica que el fluido Boger tiene en esta contracción es más fuerte de lo que fue en contracciones anteriores.

Para la curva del fluido Hase se tiene un comportamiento similar al del fluido de referencia a gastos bajos, sin embargo a partir de un valor de rapidez de corte de 13.615 se tiene un descenso en su pendiente, teniendo valores de caída de presión

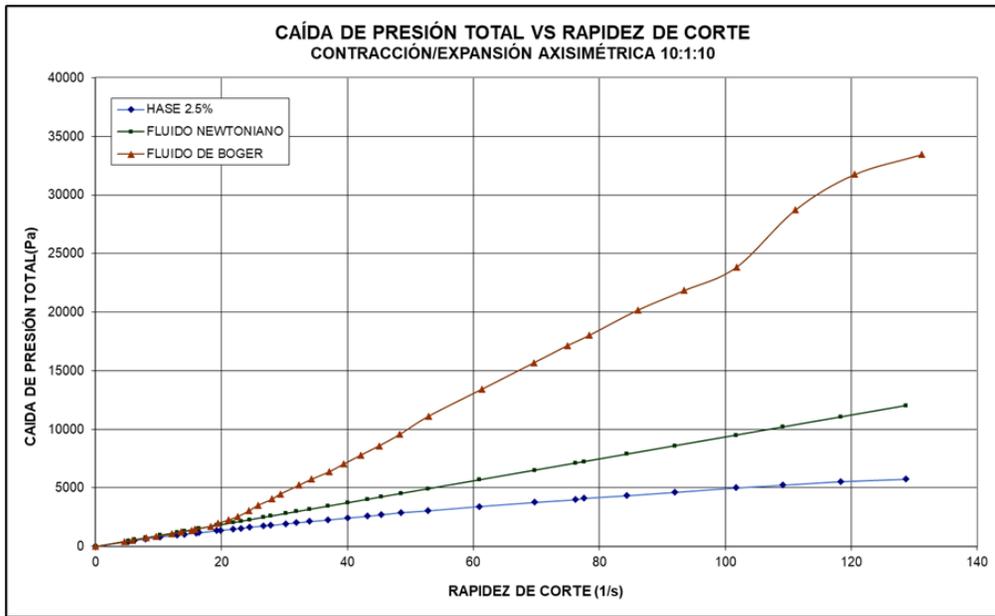
total más bajos a los del fluido newtoniano y a los del fluido Boger y que continúan en crecimiento, este comportamiento es ocasionado por dos motivos, el primero es la manifestación elástica del fluido la cual hace seguir creciendo la caída de presión y el otro es el adelgazamiento del fluido donde a medida que se aumenta la rapidez de corte el fluido se adelgaza cada vez más, estos dos efectos hacen que a pesar que el fluido tiene una manifestación elástica fuerte en esta contracción, la caída de presión total sea más baja que la del fluido de referencia, teniendo un valor máximo de 5,748 Pa siendo poco menos del doble del valor obtenido de la contracción anterior y ligeramente menor de 5 veces del  $\Delta P_T$  máximo obtenido en la contracción 6:1:6, al igual que el fluido Boger, en esta contracción el fluido Hase presenta una mayor manifestación elástica en comparación de las contracciones anteriores.

El comportamiento en esta contracción (10:1:10) guarda cierta similitud con la contracción 8:1:8, diferenciándose principalmente en la intensidad y la rapidez con la cual surgen los diferentes efectos que influyen en ambos fluidos (Boger y Hase) por lo que la acentuación de la presencia elástica y la selectividad más alta de la contracción son las dos razones principales de la manifestación más temprana e intensa de los cambios en la dinámica de flujo de los fluidos.

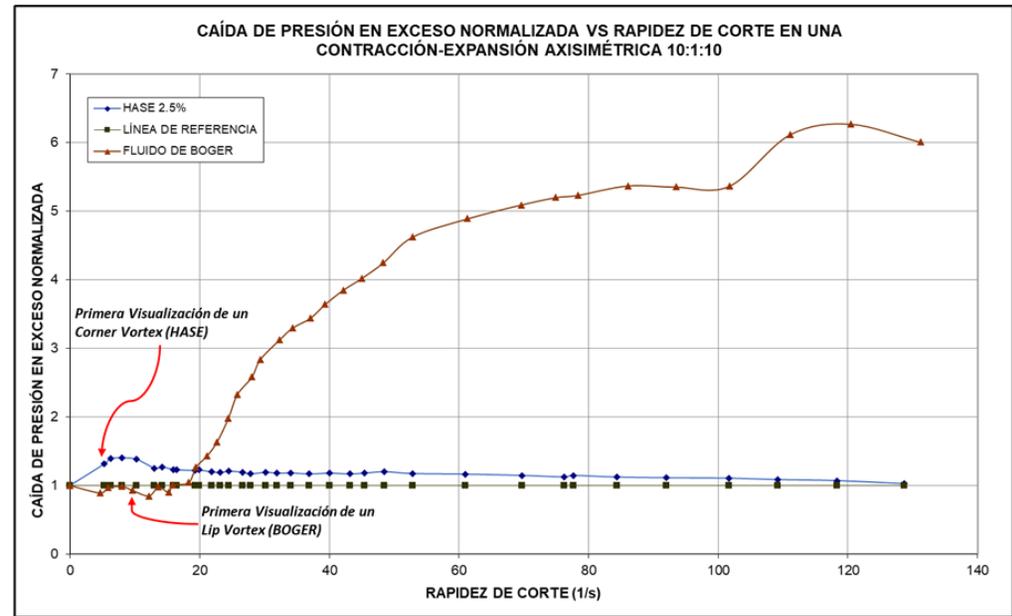
En la figura 3.1.5-1-b veremos la gráfica que muestra la caída de presión en exceso contra la rapidez de corte, en esta apreciamos que el fluido Boger tiene una predominancia en las interacciones viscosas y presenta el efecto Binding apenas perceptible al inicio de la experimentación alcanzando su mínimo valor para la caída de presión en exceso adimensional en un valor de 12.119 de rapidez de corte debido a la manifestación de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte; el fluido al llegar hasta un valor de rapidez de corte de 18.271 comienza su ascenso de la curva por lo que se indica un mayor crecimiento por parte del flujo extensional, después de este valor y hasta un valor en rapidez de corte de aproximadamente 52.868 el flujo extensional crece en una mayor proporción aumentando rápidamente su pendiente, posterior a este punto y hacia el final de la experimentación el flujo cortante comienza también a desarrollarse más haciendo que la pendiente

comience a descender ligeramente, manteniendo la competencia entre ambos tipos de flujo con menos diferencias en magnitud.

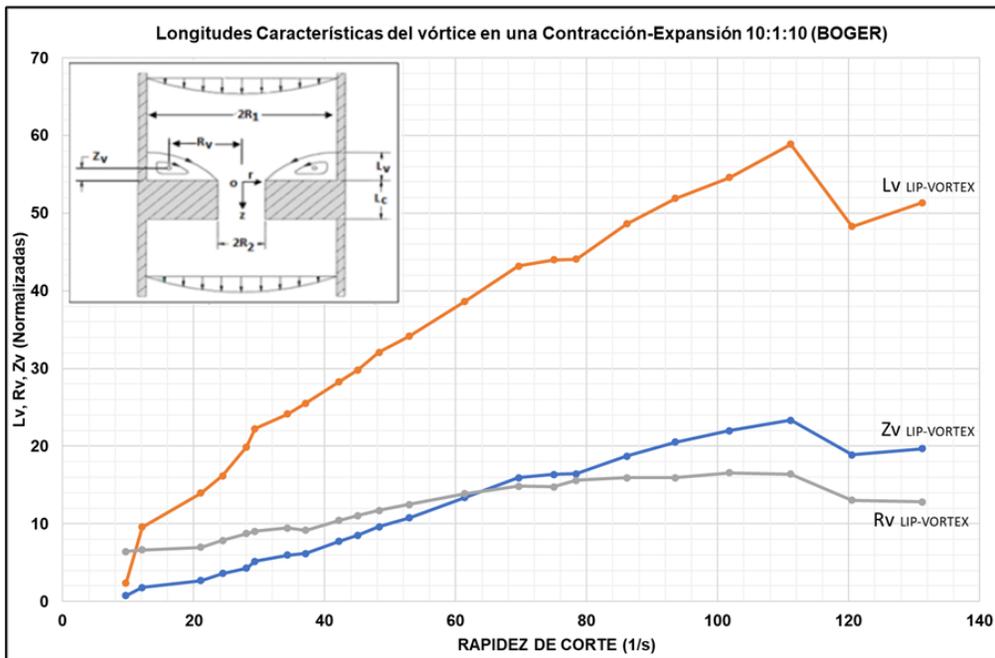
Antes de hablar del fluido Hase en esta contracción es importante recordar la observación de las curvas para este fluido en contracciones anteriores, si retomamos algunas de estas curvas podemos notar que luego de que se mantuviera debajo de los valores del flujo cortante puro, correspondientes a la línea que representa al fluido newtoniano, el fluido Hase vuelve a tener su curva por encima del fluido newtoniano para la contracción 10:1:10, el fluido tiene una muy baja viscosidad resultante del efecto adelgazante que hace que esta se asemeje al disolvente, sin embargo, la presencia elástica debido al corte es tan intensa que genera caídas de presión mayores a lo largo de la experimentación por lo que la curva del Hase termina estando por encima de la trayectoria correspondiente al fluido newtoniano; la curva para la contracción 10:1:10 aumenta debido a un mayor desarrollo del flujo extensional, estancándose en un valor de rapidez de corte de 6.22 manteniendo al menos por 3 mediciones un valor casi constante de la caída de presión en exceso normalizada, posteriormente al llegar a un valor de rapidez de corte de 10.228 decrece para posteriormente mantenerse en un muy ligero decrecimiento hasta llegar al final de la experimentación donde alcanza un valor muy similar al del fluido newtoniano; el adelgazamiento hace que el fluido de Hase tienda a tener una predominancia en el flujo cortante mientras que la elasticidad favorece al flujo extensional, si observamos la gráfica del  $\Delta P_e$  podemos ver que la trayectoria del fluido Hase está determinada por la competencia entre la elasticidad y la viscosidad, si comparamos esta grafica con la de la figura 2.2.1-2 podemos observar que en el momento donde la viscosidad extensional llega a su punto de máximo valor es aproximadamente el mismo donde la curva de la figura 3.1.5-1-b alcanza su máximo también, posteriormente la viscosidad extensional comienza a disminuir y a la vez la curva de la  $\Delta P_e$  comienza a decrecer luego de este punto lo que significa una mayor predominancia del adelgazamiento sobre la elasticidad del fluido por lo que el flujo cortante es el que predomina a partir de este punto.



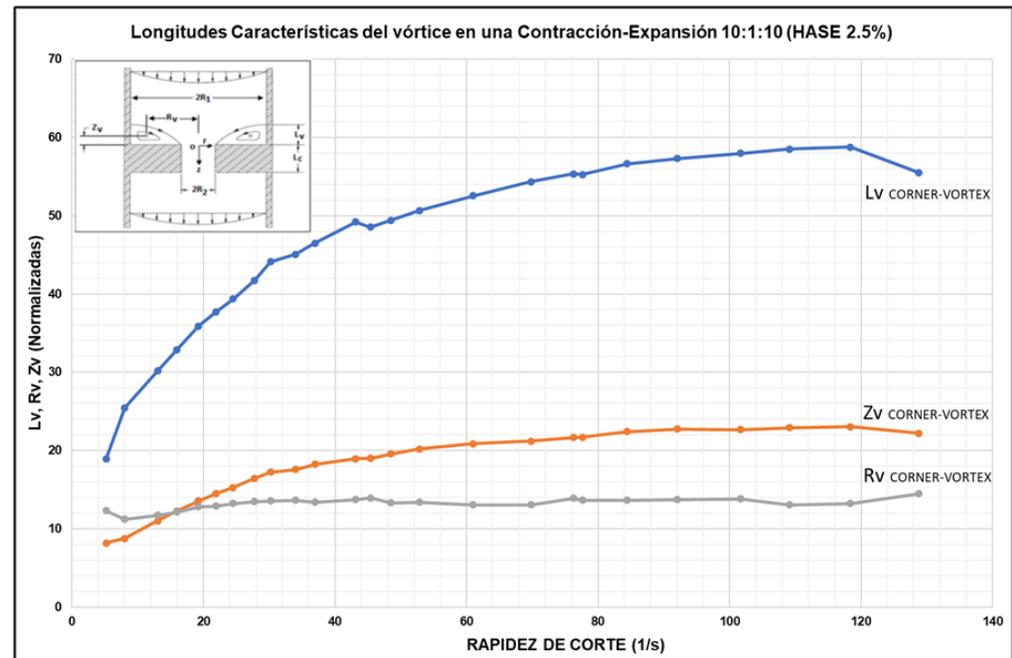
a)



b)

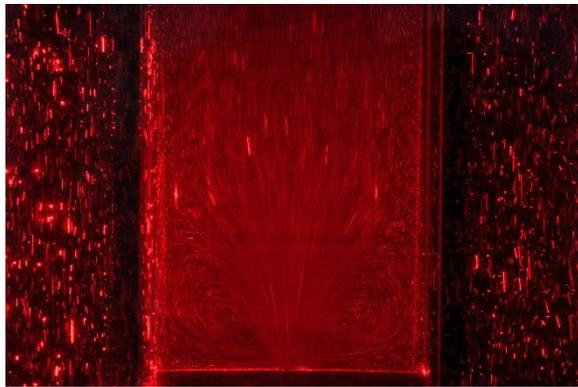


c)

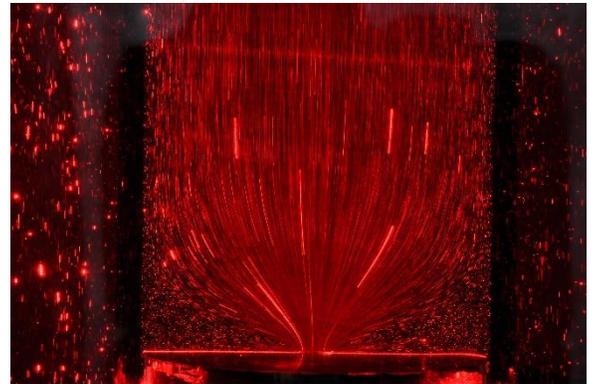


d)

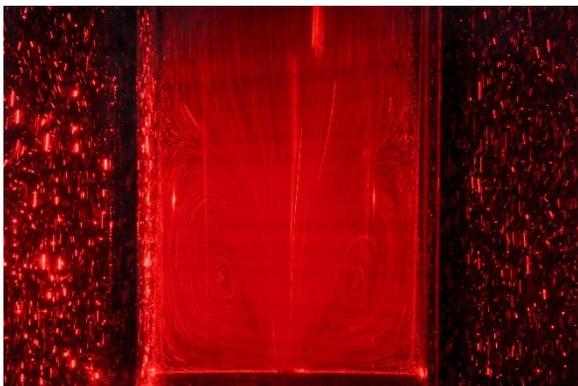
*Figura 3.1.5-1 Trayectorias de caída de Presión Total, Caídas de Presión en Exceso y Diferentes Longitudes de Crecimiento del Vórtice en una contracción-expansión axisimétrica 10:1:10*



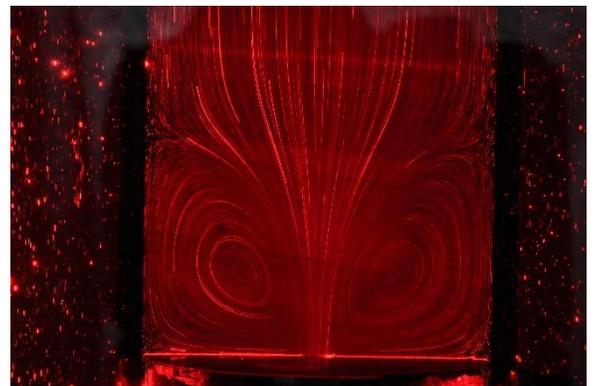
Hase 10:1:10  $\gamma = 13.0033$  1/s



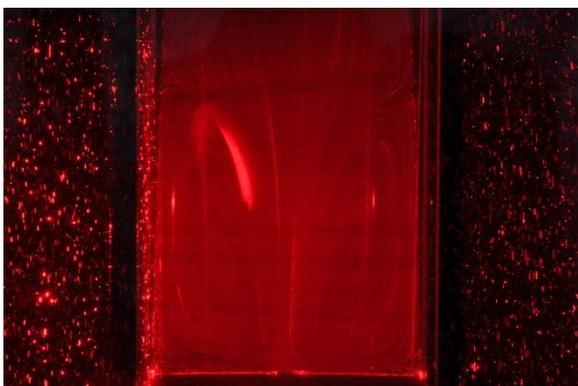
Boger 10:1:10  $\gamma = 12.1190$  1/s



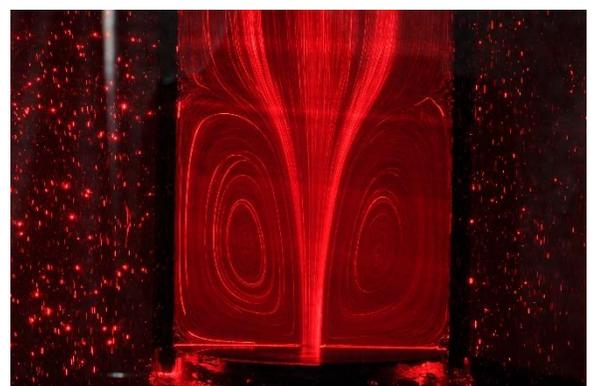
Hase 10:1:10  $\gamma = 43.1491$  1/s



Boger 10:1:10  $\gamma = 78.4133$  1/s



Hase 10:1:10  $\gamma = 118.3477$  1/s



Boger 10:1:10  $\gamma = 131.2393$  1/s

*Figura 3.1.5-2 Imágenes de vórtices en fluidos de Hase y Boger en una contracción-expansión 10:1:10*

Los vórtices para esta contracción son los que más rápido se presentan y cuyas longitudes presentan las distancias más grandes con respecto a contracciones anteriores; si bien los efectos que afectan a cada fluido son diferentes, la alta selectividad de la contracción permite tener una mayor intensidad de estos en la formación de vórtices.

En la figura 3.1.5-1-c podemos ver las diferentes longitudes características del vórtice formado en el fluido de Boger, teniendo como los ejes de la gráfica las distancias normalizadas  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  contra la rapidez de corte; para este fluido aparece como primer vórtice uno del tipo lip vortex a una rapidez de corte de 9.6369, esta diferencia en la aparición del vórtice, en relación a lo que se venía observando en las contracciones anteriores donde la primera aparición del vórtice es un corner vortex, es debido a que el fluido cuyos esfuerzos extensionales son muy intensos y la alta selectividad de líneas de corriente por parte de la contracción propician esta primera formación; los esfuerzos extensionales de la línea central de la contracción y los esfuerzos extensionales de las paredes de la contracción resultan tan fuertes que prácticamente no hay un desplazamiento de los esfuerzos cortantes que quieren entrar a la contracción, por lo que la competencia dada desde el inicio de la experimentación es únicamente entre los  $\tau_{zz}$  del centro de la contracción y los  $\tau_{zz}$  de las paredes con cierta contribución por parte de los  $\tau_{rr}$ .

Esta contracción permite un gran tamaño en los vórtices, debido a que la distancia que va desde la base de la contracción hasta el límite superior del vórtice  $L_v$ , crece considerablemente gracias a la intensidad de líneas de corriente de los  $\tau_{zz}$  de la pared de la contracción que son desplazados hacia las paredes de la parte superior a la contracción por los  $\tau_{zz}$  del centro de la contracción, y que al aumentar estos su intensidad al aumentar la rapidez de corte también desplazarán con mayor facilidad y con más impulso a los  $\tau_{zz}$  de las paredes de la contracción.

La distancia que corresponde de la base de la contracción al centro del vórtice  $Z_v$ , crece aunque en menor proporción de lo que lo hace  $L_v$  y se verá afectada principalmente por el crecimiento está, por lo que al crecer, inherentemente  $Z_v$  crecerá aunque en menor medida. Debido a esta similitud al momento de

incrementar el tamaño de ambas longitudes, podemos decir que el aumento del flujo extensional produce el crecimiento de  $L_v$  y  $Z_v$  en un fluido de Boger.

$R_v$  que representa la distancia del centro de la contracción al centro del vórtice crece ligeramente y con una pendiente mucho menor a como lo hace  $L_v$  y  $Z_v$ , viéndose afectada por el aumento en la intensidad y en la cantidad de las líneas de corriente  $\tau_{zz}$  de la pared de la contracción con contribución de los  $\tau_{rr}$  y que son desplazadas hacia las paredes de la tubería superior a la contracción, lo que provoca comience a alejarse del centro de la contracción a medida que aumenta el gasto, esta distancia crece gracias al mayor desarrollo del flujo extensional.

En lo que respecta para el fluido Hase la figura 3.1.5-1-d presenta las distancias  $L_v$ ,  $Z_v$  y  $R_v$  normalizadas contra la rapidez de corte, en esta podemos observar a una rapidez de corte de 5.21 la aparición del vórtice el cual es del tipo corner vortex y que se mantiene siendo de este tipo hasta el final de la experimentación, este vórtice no tiene un crecimiento tan abrupto como el lip vortex que presenta el fluido Boger, esto se debe al efecto conjunto de la fuerte manifestación elástica del fluido al aumento en la rapidez de corte en una contracción con alta selectividad.

La distancia que va de la base de la contracción al límite superior del vórtice  $L_v$  tiene un crecimiento con una pendiente alta, provocado por la alta manifestación elástica que propicia un mayor desarrollo del flujo extensional y de los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  desplazando con una mayor intensidad los esfuerzos cortantes  $\tau_{rr}$  hacia las paredes del tubo superior de la contracción haciendo que aumente rápidamente el valor de  $L_v$ , sin embargo el efecto al unísono del adelgazamiento hace que poco a poco se desarrolle cada vez más el flujo cortante por lo que  $L_v$  comienza un descenso de su pendiente frenando su crecimiento.

La distancia  $Z_v$ , que abarca desde la base de la contracción al centro del vórtice, posee un comportamiento similar a  $L_v$ , sin embargo a pesar que los efectos que producen el aumento y la disminución de tamaño son similares, esta no tiene un crecimiento tan pronunciado como  $L_v$  teniendo apenas un ligero crecimiento desde su aparición lo que nos indica que el centro del vórtice tuvo un ligero desplazamiento hacia la parte superior de la tubería alejándose de la base de la contracción; a

diferencia del fluido Boger donde crece a la misma proporción  $L_v$  y  $Z_v$ , en el fluido de Hase es menor esta proporción debido al adelgazamiento que este tiene.

La longitud que abarca del centro de la contracción al centro del vórtice  $R_v$  se mantiene relativamente constante y sin cambios durante toda la experimentación, lo que nos permite ver que a pesar de que los esfuerzos extensionales  $\tau_{zz}$  desplazan a los esfuerzos cortantes  $\tau_{rr}$  con una gran intensidad, los  $\tau_{rr}$  desplazados no son tan intensos para desplazar el centro del vórtice hacia las paredes de la contracción, sin embargo son lo suficientemente fuertes para evitar que el centro del vórtice se acerque al centro de la contracción.

Ambos fluidos son poseedores de un vórtice de gran tamaño, a diferencia de otras contracciones el máximo tamaño obtenido por el vórtice de ambos fluidos es muy similar a pesar de que son diferentes tipos de vórtices, sin embargo tienen diferencias significativas, el aumento de  $R_v$  en el fluido Boger que en el Hase es prácticamente constante, una pendiente de crecimiento para  $L_v$  y  $Z_v$  más pronunciada para el Boger que en el Hase y una aparición más rápida en el Hase. A diferencia de otras contracciones los vórtices en esta contracción son más grandes y los efectos de las diferentes competencias son más intensos, lo que da como resultado un comportamiento de la contracción 10:1:10 parecido al que se tiene en las contracciones 6:1:6 y 8:1:8, que sin embargo tiene cambios más rápidos y una mayor intensidad en los esfuerzos extensionales y cortantes.

## **Capítulo 4 Conclusiones**

Todo sistema en contracción tiende a liberar energía con el objeto de alcanzar el régimen permanente, los fluidos puramente viscosos liberan la energía por interacciones cortantes entre el fluido y la pared, los fluidos viscoelásticos liberan energía de origen viscoso pero también de origen viscoelástico, la liberación de energía de tipo viscoso se detecta a partir de caídas de presión evaluadas en la pared de la tubería, sin embargo bajo ciertos valores de rapidez de corte se forman vórtices de forma corner vortex y lip vortex, interpretándose este mecanismo como una forma de liberación de energía de origen elástico. Los vórtices sirvieron para identificar la dinámica de flujo existente en la contracción y apoyar a la interpretación de la dinámica de flujo estudiada a partir de las caídas de presión en exceso adimensionales.

En cuanto al fluido de Boger el cual es un fluido viscoelástico con viscosidad constante en la contracción 2:1:2 se observó a pesar de que los estudios de caída de presión en exceso predicen un desarrollo de un flujo extensional a valores de rapidez de corte bajos, la observación de vórtices no se presentó hasta valores de rapidez de corte altos, esto debido a que gran parte de la liberación de energía fue de origen viscoso, a posteriores valores de contracción en 4:1:4, 6:1:6, 8:1:8 e inclusive 10:1:10 se observó que la aparición de los vórtices se dio a valores de rapidez de corte cada vez mas pequeñas, esto se interpretó por el efecto de la reducción del diámetro de la contracción, sin embargo a partir de la contracción 6, 8 y 10 la forma del vórtice fue de tipo lip vortex, lo cual se interpretó como una competencia muy intensa entre el flujo cortante y el flujo extensional en la contracción dado que las líneas de corriente extensionales son muy intensas y compiten fuertemente con las líneas cortantes, desplazándolas hacia el labio de la contracción.

Para el fluido Hase el cual es un fluido viscoelástico que se adelgaza a medida que la rapidez de corte aumenta, se observó que en la contracción 2:1:2 el corner vortex se presentó a valores altos de rapidez de corte que en comparativa con el fluido Boger el vórtice se presentó antes, mientras que en la contracción 4:1:4 el corner

vortex en el fluido Hase se presenta a valores de rapidez de corte posteriores a la primera visualización del vórtice en el fluido Boger, esto sucedió debido a que el fluido Hase no requiere del mecanismo de liberación de energía porque adelgazó y solo liberó energía por interacciones cortantes; en las contracciones 6, 8 y 10 se observó que al ir disminuyendo el diámetro de la contracción se favoreció el desarrollo del flujo extensional, así como la necesidad de liberación energética por medio de formación de vórtices del tipo corner vortex, apareciendo los corner vortex a valores más bajos de rapidez de corte a medida que disminuía la relación de contracción, por lo que la aparición de los vórtices fue cada vez más inmediata; los vórtices de todas las contracciones desde la 2:1:2 hasta la 10:1:10 fueron del tipo corner vortex debido al adelgazamiento del fluido a medida que crecía la rapidez de corte, por lo que no fue necesaria la aparición de lip vortex para tener una mayor liberación de energía.

Es importante mencionar que aunque se tienen estudios detallados de caída de presión en exceso normalizadas y que estos describen en su mayor parte la dinámica de flujo en la contracción, estos no explican otro fenómeno trascendental dentro de la dinámica de flujo como lo son la formación de vórtices, de igual manera los estudios unilaterales de la formación de vórtices y sus diferentes formas tampoco explican la dinámica tan compleja de un flujo de un fluido complejo en la contracción, sin embargo necesariamente ambos estudios son complementarios y deben de analizarse conjuntamente para poder dar una explicación acerca de la dinámica de flujo.

## *Bibliografía*

1. Abdul-Karem T., Binding D.M., Sindelar M., (1993) Contraction and expansion flows of non-Newtonian fluids, *Composites Manufacturing Vol.4 No.2*, 109-116
2. Baloch A., Townsend P., M.F. Webster, (1996) On vortex development in viscoelastic expansion and contraction flows, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 65, 133-149
3. Barnes H.A., Hutton J.E, Walters F. R. S. K., (1993) *An Introduction to Rheology*, University College of Wales, 75-95
4. Barnes Howard A., *A Handbook of Elementary Rheology*, (2000) Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics University of Wales, 151-162
5. Binding D.M., (1991) Further considerations of axisymmetric contraction flows, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 41, 27-42.
6. Boger D.V., Crochet M.J., Keiller R.A., (1992) On viscoelastic flows through abrupt contractions, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 44, 267-279
7. Cartalos U., Piau J.M., (1992) Creeping flow regimes of low concentration polymer solutions in thick solvents through an orifice die, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 45, 231-285
8. Cogswell F.N., (1978) *Converging flow and stretching flow: a compilation*, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 4, 23-38.
9. Gardea V. H., (2001) *Conceptos Básicos sobre la formación y teoría de los vórtices*, *Ingeniería Investigación y Tecnología II.2*, 81-87
10. Hasegawa T., Suganuma M., Watanabe H., (1997) Anomaly of excess pressure drops of the flow through very small orifices, *Phys. Fluids*, Vol. 9, No. 1
11. Macosko C.W., (1994) *Rheology Principles, Measurements and Applications* Ed. Wiley. UCH
12. McKinley G. H., Raiford W. P., Brown R. A., Armstrong R. C., (1991) Nonlinear dynamics of viscoelastic flow in axisymmetric abrupt contractions, *J. Fluid Mech*, vol. 223, 411-456
13. Morrison, Faith A., (2001) *Understanding rheology*, Oxford University Press, 105-166
14. Owens R.G., Phillips T.N., (2002) *Computational Rheology*, Imperial College Press
15. Pérez C. M., (2016) *Estudio Experimental de Fluidos Complejos en Flujo Contracción /Expansión*, Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México
16. Rothstein J.P., McKinley G.H., (1999) Extensional flow of a polystyrene Boger fluid through a 4:1:4 axisymmetric contraction/expansion, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 86, 61-88.
17. Rothstein J.P., McKinley G.H., (2001) The axisymmetric contraction-expansion: the role of extensional rheology on vortex growth dynamics and the enhanced pressure drops, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 98, 33-63.

18. Sampson R.A; (1891) on Stokes's current function, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A; Vol 182, 449-518
19. Tan H., Tam K.C., Tirtaatmadja V., Jenkins R.D., Bassett D.R., (2000) Extensional properties of model hydrophobically modified alkali-soluble associative (HASE) polymer solutions, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 92, 167–185
20. White J.L. and Kondo A., (1977) Flow Patterns in Polyethelene and Polystyrene Melts During Extrusion Through a die Entry Region: Measurements and Interpretation J. Non-Newtonian Fluid Mech. 3, 41-64.