



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**Estudio de la dinámica de flujo de un fluido en
contracción/expansión empleando un polímero asociativo a
través de una contracción hiperbólica.**

Tesis para obtener el título de:

Ingeniero químico

Presenta:

Narváez Solórzano Xochitl María Elena

Director de Tesis:

Mariano Pérez Camacho.

Ciudad de México Octubre 2020



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.

AGRADECIMIENTOS.

A mis padres Irma Solórzano y Enrique Narváez Hernández por el apoyo brindado en todos los aspectos, por sembrar siempre en mí las ganas de seguir avanzando, superándome académica, profesional, personal y espiritualmente definiéndome como la persona que soy ahora de lo cual les estaré eternamente agradecida pues han creído en mi a pesar de todo, de igual forma agradezco a mis hermanas y hermanos Irma Eréndira Narváez Solórzano, Ángela Judith Narváez Solórzano, Claudia Enriqueta Narváez Solórzano, Rodrigo Gutiérrez Solórzano y Víctor Hugo Gutiérrez Solórzano y a mis familiares, por su apoyo el cual fue el principal motor que me ha permitido alcanzar este logro.

A la Universidad Nacional Autónoma de México en especial a la facultad de estudios superiores Zaragoza, por permitirme ser parte de esta prestigiosa universidad, dándome el placer y el orgullo de ser representante de esta al desarrollarme social y profesionalmente.

A mi director de Tesis Dr. Mariano Pérez Camacho, de quien estoy plenamente agradecida por creer en mi capacidad para poder desarrollar el presente trabajo de investigación, el cual no hubiese sido posible sin su apoyo y dirección. Su desarrollo profesional ha sido fuente de motivación y admiración para poder impulsarme hasta la culminación del presente trabajo y alcanzar demás objetivos más adelante.

Al colega Ingeniero químico y maestro Muñoz Garduño Kevin David por su apoyo, comprensión y paciencia en el desarrollo experimental del reciente trabajo, quien con su experiencia y educación fue parte indispensable para sortear dificultades durante el desarrollo experimental del presente trabajo.

A mis profesores agradezco eternamente por compartir sus conocimientos y experiencia, permitiendo mi formación profesional, de igual forma agradezco profundamente a los sinodales quienes se encargaron de evaluar y corregir el trabajo de investigación presente.

A mis amigos y compañeros, Polet Mejorada Ordoñez, Janeth Lara Martínez, Beatriz Adriana Herrera Ramos, Valeria Lozada Chávez, Lourdes Nayeli Ambrosio

Robles, Karen Nájera Martínez, Ketzallin Amellali Valverde Gutierrez, José Martín Villafaña de la Rosa, José Carlos Godínez Deloya y demás amigos, con aquellos con los que he compartido buenos y malos momentos, por siempre brindarme una palabra o acción de apoyo cuando lo necesité y siempre estar para mí dentro y fuera del ámbito escolar, les estoy infinitamente agradecida con Dios por haberme permitido coincidir con ustedes en el camino.

INDICE

Resumen.....	6
Objetivo:.....	7
CAPITULO 1. ANTECEDENTES DE FLUJOS EN CONTRACCIÓN.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 DESARROLLO DEL TIPO DE FLUJO CORTANTE Y/O EXTENSIONAL.....	14
1.2.1 Campo de velocidades presentes en un flujo en contracción-expansión.	15
1.3 DIFERENCIA DE ESFUERZOS NORMALES.....	23
1.4 CAÍDAS DE PRESIÓN PRESENTES EN EL FLUJO DE UN FLUIDO VISCOELÁSTICO A TRAVÉS DE UN SISTEMA CONTRACCIÓN/EXPANSIÓN AXISIMÉTRICO.....	24
1.5 VARIABLES REOMÉTRICAS DE UN FLUIDO A TRAVÉS DE UN FLUJO CONTRACCIÓN /EXPANSIÓN.....	30
1.6 CONTRACCIÓN-EXPANSIÓN CUADRADA.	33
1.7 CONTRACCIÓN-EXPANSIÓN HIPERBÓLICA.....	41
Caídas de presión presentes en una contracción-expansión hiperbólica.....	44
1.8 MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD EXTENSIONAL EN UNA CONTRACCIÓN HIPERBÓLICA.....	46
CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	52
2.1 EQUIPO EXPERIMENTAL.....	52
2.2 OPERACIÓN DEL EQUIPO.....	54
2.3 GEOMETRÍAS EMPLEADAS.....	57
3 CAPITULO 3 DESCRIPCIÓN DE FLUIDO.....	58
3.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	61
3.3 REOLOGÍA CORTANTE DE LA SOLUCIÓN EMPLEADA.....	62
CAPITULO 4, RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	64
CAPITULO 5 ANÁLISIS DE REULTADOS:	67
CONTRACCIÓN AXISIMÉTRICA.....	67
CONTRACCION CUADRADA.....	90
CONTRACCIÓN HIPERBÓLICA.....	106

CONCLUSIÓN	134
Referencias bibliográficas.	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-1 Esquema de flujo en una contracción simple.....	9
Figura 1.1-2 Esquema de flujo en una contracción/expansión.....	10
Figura 1.1-3 Tipos de régimen de flujo de un fluido cercano a una contracción axisimétrica.....	12
Figura 1.1-4 Coexistencia del flujo extensional uniaxial y cortante en un flujo; contracción/expansión axisimétrica.	14
Figura 1.2-1 coexistencias de dominios de flujo dentro del flujo mixto.	14
Figura 1.2-2 Imagen de cada tipo de flujo extensional. a) uniaxial, b) biaxial y c) planar.	17
Figura. 1.2-3 Flujo cortante simple entre dos placas paralelas (Transport Phenomena Bird Lighthfoot, John wiley ans Sons1960)	20
Figura. 1.2-4 desarrollo de diferentes perfiles durante el paso de un fluido Viscoelástico a través de una contracción.....	22
Figura 1.3-1. Diferencia de esfuerzos normales.....	23
Figura 1.3-2 Comparación de la EPD vs No. We en una contracción/ expansión 4:1:4 (a)Resultados numéricos obtenidos por Walters, (b) Resultados experimentales por Rhotstein.(Walters et al . Korea-Australia Rheology Journal 21(4)-2009-939 Rothstein and McKinley. Journal of Non-Newtonian fluid Mechanics 86-1999 -61)	24
Figura 1.4-1 a) Configuración de diámetros de una contracción expansión de características axisimétrica empleando una placa de orificio, mostrando las caídas de presión que componen la caída de presión total.....	25
Figura 1.4-1. b) Puntos del sistema de contracción donde se desarrollan los tipos de flujo cortante y extensional.....	26
Fig. 1.6-1 sistema de flujo con una contracción-Expansión cuadrada	33
Figura. 1.6-2 Dinámica del desarrollo de un elemento de fluido a través de una contracción cuadrada	34
Figura 1.6-3 Líneas de corriente de un fluido viscoelástico a través de una contracción cuadrada. ..	35
Figura 1.6-4 Trayectorias de flujo de un fluido de Boger a través geometrías cuadradas con diferentes relaciones de contracción	36
Figura.1.6-5 Flujo en reversa que presentan los fluidos viscoelásticos a la entrada de una contracción cuadrada.....	37
Figura 1.6-6 Representación de las caídas de presión individuales y totales en Un sistema de flujo en Contracción- Expansión cuadrada.....	39

Figura. 1.6-7 Factor de forma vs Relación de apariencia para Geometrías rectangulares	40
Figura. 1.7-1 Trayectorias de flujo a través de una contracción hiperbólica de agua destilada en donde se observa el dominio de las fuerzas inerciales sobre las viscosas mediante la formación de vórtices en las cercanías de la contracción.	42
Laura Campo Deaño, Journal of non Newtonian Fluid Mechanics 166(2011) 1286-1296	42
Figura. 1.7-2 Características de la geometría hiperbólica propuesta por Tabatabaei Rheologica Acta 54(2015)869-885	45
Figura. 1.7-3 Caídas de presión individuales y total en una contracción-expansión axisimétrica	45
Figura. 1.8-1 Geometrías Semihiperbólica e hiperbólica	47
Figura 2.1-1. Zona de carga del fluido en la sección de tubo A y B.	52
Figura 2.1-2. Zona de contracción (a), Zona de llenado de pistón (b), Zona de acoplamiento de sensores 1 y 2 (c) (Operación)	53
Figura 2.1-3 Sistema de control para operar el equipo; Tablero de control para accionar el pistón (a) y equipo de recopilación de datos (b).	54
Figura 2.2-1. Descripción del equipo experimental.	55
Figura 2.3-1. Estructura de la geometría hiperbólica a analizar.	58
Figura 3.1-1 Estructura química del polímero asociativo empleado.	59
Figura 3.1-2 Tipos de asociación molecular del fluido HASE.	61
Figura 3.3-2. Reología de la solución HASE, que indica los intervalos de rapidez de corte evaluados, mostrando la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido empleado a estudio HASE, obteniendo parámetros como viscosidad y la elasticidad del fluido.	63
Figura 3.3-1. Reología de la solución HASE, que indica los intervalos de rapidez de corte evaluados, mostrando la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido empleado a estudio HASE, obteniendo parámetros como viscosidad y la elasticidad del fluido. Pérez Mariano [17]	63
Figura 4.1-1 Equipo empleado para la calibración de sensores	64
Gráfico 4.1-1 Tendencia de los resultados de la calibración de los sensores 1 y 2.	66
Figura 5.1-1 Caída de presión Total vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2)	70
Figura 5.1-2 Caída de presión en exceso vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2)	72
Figura 5.1-3 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2)	74

Figura 5.1-4 Viscosidad extensional vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2).	77
Figura 5.1-5 Caída de presión Total vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)	80
Figura 5.1-6 Caída de presión en exceso vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)	82
Figura 5.1-7 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)	84
Figura 5.1-8 Caída de presión en exceso Normalizada vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)	87
Figura 5.1-9 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)	92
Figura 5.1-10 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)	94
Figura 5.1-11 Caída de presión en Exceso Normalizada vs De (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)	96
Figura 5.1-13 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)	99
Figura 5.1-14 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte(Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)	101
Figura 5.1-15 Caída de presión en exceso Normalizada vs De (Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)	103
Figura 5.1-16 Caída de presión total vs rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)	110
5.1-17 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)	113
5.1-18 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)	116
5.1-19 Viscosidad extensional vs Viscosidad cortante del fluido HASE (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)	119
Figura 5.1-20 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)	122

Figura 5.1-21 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)	125
Figura 5.1-22 Caída de presión en exceso normalizada contra Número de Deborah (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4).....	128
Figura 5.1-23 Viscosidad extensional contra viscosidad cortante del fluido viscoelástico HASE (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)	131

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Dimensiones de las diferentes geometrías (Axisimétrica, cuadrada e hiperbólica)	57
Tabla 2 Calibración de sensores.	65
Tabla 3 Resultados obtenidos de caída de presión dentro de las contracciones	66

Resumen.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la dinámica de un fluido viscoelástico de viscosidad adelgazante, el cual se define con el nombre HASE que es un polímero asociativo con una concentración de 2.5%, este se hace pasar a través de dos relaciones de contracción 2:1:2 y 4:1:4, dichas relaciones de contracción fueron generadas con una geometría hiperbólica de características axisimétricas, el objetivo de ello fue observar la manifestación de propiedades del fluido como son, propiedades viscosas y viscoelásticas, adelgazamiento del fluido, primer diferencia de esfuerzos normales, formación de interacciones inter e intramoleculares y por último el desarrollo del dominio de flujo cortante y/o extensional. Los estudios de este tipo son importantes y tienen gran campo de aplicación industrial a procesos como son la extrusión, procesos de modelado por inyección y el uso de fluidos para fracturamiento hidráulico entre otros.

Dicho análisis se llevó a cabo realizando las corridas experimentales haciendo uso del equipo "EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS EN CONTRACCIÓN/EXPANSIÓN DE FLUIDOS COMPLEJOS" en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza graficando los resultados obtenidos, observando parámetros como caídas de presión totales dentro del sistema con el propósito de analizar el efecto que tienen las propiedades viscoelásticas en el desarrollo del dominio de flujo con respecto de las propiedades viscosas que presenta el fluido Newtoniano, la caída de presión en exceso empleando la relación de apariencia de Sanmpson, parámetro que permite observar el desarrollo del flujo extensional a lo largo de su trayectoria a la entrada de la contracción del sistema, la viscosidad extensional en la línea central del flujo, la cual permite seguir el crecimiento de la misma y seguir de una manera indirecta el desarrollo del flujo extensional uniaxial homogéneo, los tres parámetros antes mencionados se graficaron en función de la rapidez de corte aplicada al sistema; la caída de presión en exceso normalizada permitió definir el desarrollo de flujo dentro del sistema con base en la competencia entre el desarrollo del flujo extensional del fluido viscoelástico dentro del sistema con respecto al flujo cortante que presenta el fluido Newtoniano, graficando esta contra número de Deborah; el efecto que tuvieron las propiedades elásticas y adelgazantes del fluido se determinó

observando la reología de los fluidos en la sección 3.1 Figura 3.1-1 y 3.1-2 del presente trabajo, misma que fue obtenida en el Instituto de investigación de materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los parámetros antes descritos se obtuvieron con el fin de compararlos con resultados obtenidos en trabajos previos, realizados por los ingenieros Dr. Mariano Pérez Camacho [17] y Muñoz Garduño Kevin David quienes [14], emplearon diferentes geometrías, axisimétrica y cuadrada respectivamente, determinando con ello en cuál de las geometrías empleadas es posible vislumbrar la presencia del desarrollo del flujo extensional homogéneo y en cual se observa el no homogéneo.

Objetivo:

El objetivo del presente trabajo es analizar con base en experimentación la dinámica del flujo de un fluido viscoelástico de viscosidad adelgazante al corte (Polímero asociativo HASE 2.5 %) y un fluido Newtoniano, haciéndolos transitar a través de dos relaciones de contracción (2:1:2 y 4:1:4) dichas contracciones se describen como contracción/expansión de características axisimétricas con diferente geometría (hiperbólica, cuadrada y axisimétrica); comparando los parámetros reológicos que se presenta en cada geometría.

Para ello la experimentación se realizará dentro de la contracción hiperbólica, analizando el paso del flujo por las diferentes relaciones de contracción y determinando el dominio de flujo que se presenta en cada una, aunado a ello se determinará si la elasticidad o viscosidad adelgazante del fluido y el desarrollo de interacciones inter o intramoleculares afectan de manera directa el dominio del flujo dentro de la configuración del sistema.

El dominio del flujo se determinará siguiendo los valores obtenidos conforme a los parámetros definidos como; caída de presión total, caída de presión en exceso, viscosidad extensional contra rapidez de deformación y caída de presión en exceso normalizada contra número de Deborah. El seguimiento de dichos parámetros durante la experimentación permitirá determinar cómo afecta la relación de contracción a los parámetros ya mencionados y determinar cómo influyen en el desarrollo de flujo las dos diferentes relaciones de contracción empleadas.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES DE FLUJOS EN CONTRACCIÓN.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Los estudios realizados sobre fluidos que pasan a través de una relación de contracción se han estudiado empleando fluidos Newtonianos y No newtonianos de características viscoelásticas, con base en estudios teóricos, simulaciones y experimentación de los efectos suscitados en los parámetros de flujo al pasar el fluido a través de una contracción/ expansión o una contracción axisimétrica. En la literatura dichos estudios se han centrado en 3 casos el flujo en contracción axisimétrica, el flujo en contracción planar y el flujo en contracción tridimensional rectangular, desde luego cada uno de estos 3 casos, aunque con menor frecuencia, se han estudiado en su variante de contracción/expansión.

El objetivo de un estudio de este tipo es comprender la dinámica del fluido a través del sistema, observando los patrones de flujo y propiedades reológicas que se desarrollan en este.

La intención de esta sección en este trabajo está enfocada a mencionar las características más importantes de tres geometrías, la contracción simple y la contracción/expansión ambas de características axisimétricas, esto con el fin de poder discutir las peculiaridades entre una y otra, aunque en este trabajo se usará únicamente la geometría contracción/expansión.

Contracción expansión pura y axisimétrica

Debido a los estudios pioneros iniciados por Cable y Boger [19] los flujos en contracción simple y contracción/expansión axisimétrica han sido de los más estudiados tanto desde el punto de vista teórico como experimental por la comunidad científica.

Contracción pura o simple.

Una contracción pura se ve como la que se muestra en la Figura 1.1-1, consta de un tubo con un diámetro constante con radio R_1 , conectado a una sección de tubo más pequeña la cual se define como la contracción, pues el tubo se reduce abruptamente a un diámetro menor que la sección de tubo previa a la misma; este nuevo diámetro maneja un radio R_2 que se mantiene constante.

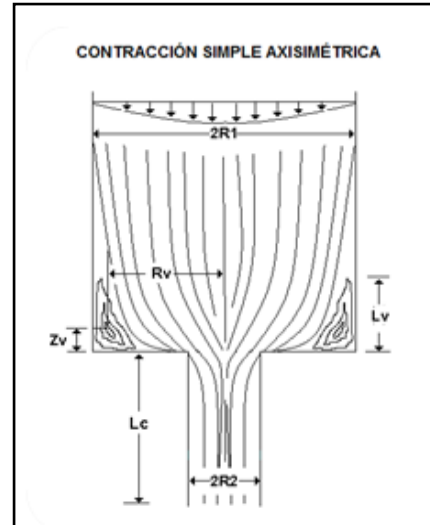


Figura 1.1-1 Esquema de flujo en una contracción simple.

El paso del fluido dentro de la configuración de diámetros se describe como sigue; un flujo totalmente desarrollado que entra dentro del tubo con R_1 y cambia repentinamente el área por la que atraviesa entrando a un tamaño de diámetro más pequeño con R_2 produce el siguiente efecto, el flujo que atraviesa dicho cambio de diámetros, denota una pérdida de contenido energético después de pasar a través de la contracción; cuando el fluido entra al tubo con sección más pequeña, después de un lapso de tiempo finito el flujo alcanza un nuevo régimen de estado estacionario con un contenido energético diferente al que tenía previo a la contracción.

Contracción/ Expansión.

Una contracción expansión es como aquella que se muestra en la Figura 1.1-2; esta contracción consta de un tubo con un diámetro constante y un $R1$, conectado a otra sección de tubo de igual forma con un diámetro constante pero menor con un $R2$, mismo que a su vez está conectado a una tercer sección de tubo con el mismo diámetro y radio previo a la sección de tubo con $R2$, es decir la tercer sección de tubo cuenta con las dimensiones de un diámetro constante y un $R1$.

El paso de fluido dentro de la configuración de diámetros se describe de la forma

siguiente, un flujo totalmente desarrollado que alcanzo un régimen de estado estacionario, el cual es interrumpido cuando el fluido cambia abruptamente el área por la que atraviesa, entrando a un tamaño de diámetro más pequeño con $R2$ produce el siguiente efecto, el flujo que atraviesa dicho cambio de diámetros, denota una pérdida de contenido energético después de pasar a través de la contracción; cuando el fluido entra a la tercer sección del tubo, recupera el régimen en estado estacionario y el contenido energético que tenía previo al paso por la contracción que es la segunda sección del tubo con $R2$.

Por lo tanto, la diferencia entre ambas contracciones además de las secciones de tubo y la configuración de diámetros es que en la contracción pura el contenido energético del flujo cambia al pasar este a través de la contracción; mientras que en el flujo que atraviesa la contracción/expansión el contenido energético si se recupera después de esta.

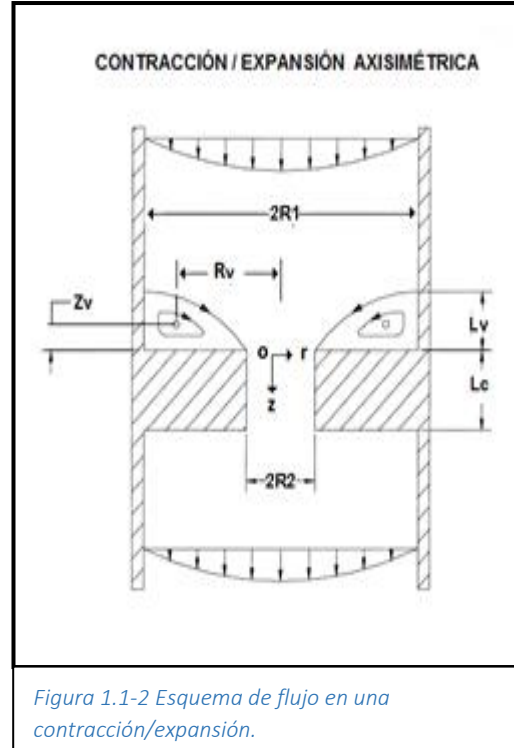


Figura 1.1-2 Esquema de flujo en una contracción/expansión.

En ambos flujos, el fluido proveniente del ducto con radio R_1 y la contracción con radio R_2 se comparte el mismo eje de coordenadas que divide el flujo en dos partes iguales, razón por lo cual se identifica a este experimento como flujo axisimétrico. Una de las características que distinguen a los flujos en contracción y contracción/expansión cuando manejan fluidos viscoelásticos es la formación de vórtices en la vecindad de la contracción como se ilustra en la Figura 1.1-1 y 1.1-2 según Rothstein y McKinley [3] una de las mayores aportaciones de este tipo de flujo es que permite probar la capacidad de disipación de energía que tiene el sistema la cual puede medirse experimentalmente, por lo tanto en un fluido viscoelástico la presencia de este fenómeno surge de una tensión disipativa que elimina la energía del flujo; los efectos de este esfuerzo disipativo serán reflejados en observaciones macroscópicas, de cantidades dinámicas tales como caídas de presión.

Dinámica dentro de una relación de contracción / expansión con geometría axisimétrica.

Los estudios formales de flujos en contracción y en contracción expansión iniciaron con los estudios experimentales de Nguyen y Boger en 1979 [4]. Sus estudios estuvieron basados en hacer pasar una serie de soluciones viscoelásticas de diferente concentración a base de poliacrilamida a través de una contracción axisimétrica, semejante a como lo que hoy es una placa de orificio (Figura 1.1-3).

Realizaron experimentalmente estimaciones de la velocidad promedio a lo largo de todo el diámetro de la tubería en diferentes puntos fijos alejados y cercanos al dado de contracción, entre sus descubrimientos identificaron 2 zonas bien definidas, la primera de ellas identificada como Régimen de Crecimiento del Vórtice, fue ubicada varios diámetros alejada de la zona de contracción, tal y como lo muestra la Figura. 1.1-3.

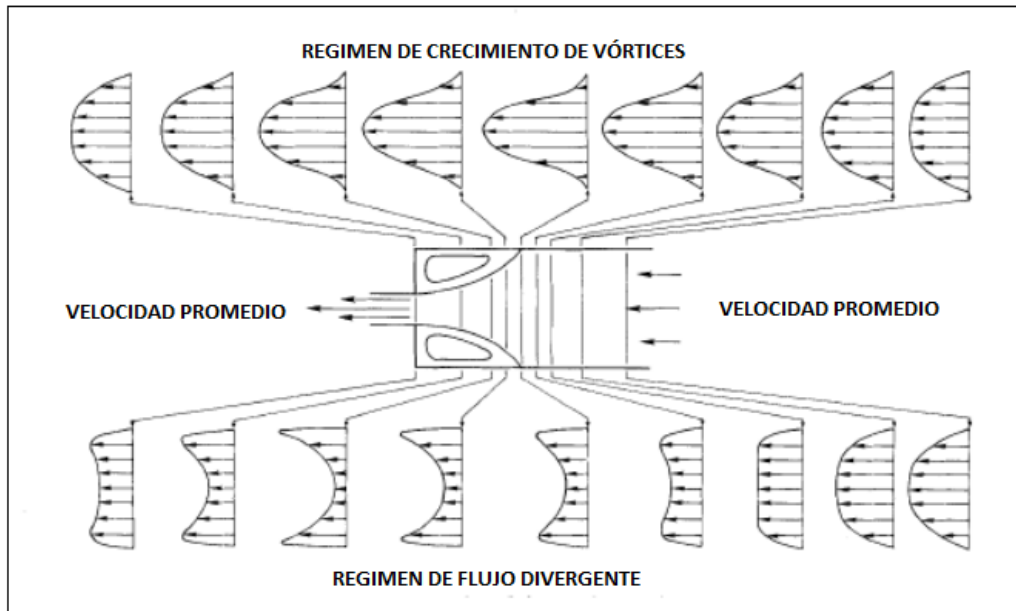


Figura 1.1-3 Tipos de régimen de flujo de un fluido cercano a una contracción axisimétrica.

La presencia de este tipo de flujo, los autores lo atribuyeron a la naturaleza viscoelástica de la solución, la cual fue definida más tarde como una liberación de esfuerzos por White y Kondo, el régimen de flujo divergente causó una gran controversia que para aquel tiempo, los autores no alcanzaban a comprender, como lo muestra la Figura 1.1-3, a medida que el fluido se acercaba a la zona de contracción el perfil de velocidades del centro hacia las paredes internas del tubo, en dirección radial se distorsionaba formando una trayectoria parabólica de trayectoria divergente, es decir se invertía a como lo hace el perfil de velocidades de la ecuación de Hagen-Poiseuille, resulta interesante el enunciado de Cable-Boger [5] el cual se cita a continuación:

“No es claro, sin embargo, la causa de la desaceleración de las partículas del fluido en la línea central. Es casi como pensar que el fluido es confrontado por un obstáculo invisible corriente arriba del pequeño tubo de entrada y el fluido es forzado a fluir alrededor de este, resultando un flujo divergente y una velocidad máxima cerca de la pared”.

Dichos perfiles con trayectorias parabólicas divergentes que se forman posterior a la contracción fueron interpretados posteriormente por Nguyen-Boger [4] como una zona en donde se llega a desarrollar un flujo extensional uniaxial que puede llegar

a ser un flujo extensional uniaxial homogéneo, exactamente sobre la línea central, como se indica en la Figura 1.1-3.

El flujo complejo a través de una contracción es un flujo que dentro de la misma presenta deformación cortante cerca de las paredes y un fuerte flujo extensional no homogéneo, sin embargo, puede serlo en una pequeña porción a lo largo de la línea central y dentro en la proximidad del plano de contracción. Los autores propusieron la coexistencia de estos dos tipos de flujo, como lo muestra la Figura 1.2-2, el primero de origen cortante el cual se desarrollaba preferentemente en la interacción del fluido con las paredes tanto del tubo de diámetro D como en el tubo de contracción con diámetro d y que gradualmente se va transformando a flujo extensional; las zonas que vislumbran el área donde estos flujos se desarrollan, no están bien definidas, excepto donde se desarrollan los flujos puros como lo son el flujo cortante y la porción donde se desarrolla el flujo extensional uniaxial.

Cabe mencionar que las láminas de flujo que están más cerca de cada uno de los flujos que se forman cortante y o extensional cuando son puros, conservan las características similares al flujo adyacente a estas. La coexistencia de dichos flujos corresponde a una zona donde se va desde un flujo cortante pasando por un flujo de transición hasta un flujo extensional, al conjunto de estos tres tipos de flujo se les denomina flujo mixto.

La viscosidad extensional uniaxial debido a la presencia del flujo extensional en gran medida era la causante de este comportamiento desconocido además de la desaparición de los vórtices.

Dichas parábolas que se forman posterior a la contracción fueron interpretadas posteriormente por Nguyen-Boger [4] como una zona en donde se llega a desarrollar un flujo extensional uniaxial que puede llegar a ser un flujo extensional uniaxial homogéneo, exactamente sobre la línea central, como se indica en la Figura 1.1-4.

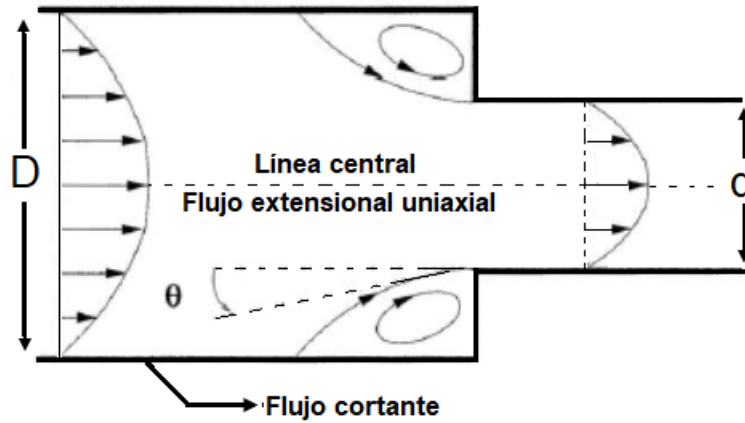


Figura 1.1-4 Coexistencia del flujo extensional uniaxial y cortante en un flujo; contracción/expansión axisimétrica.

1.2 DESARROLLO DEL TIPO DE FLUJO CORTANTE Y/O EXTENSIONAL

Cuando un fluido atraviesa un sistema de tubería bajo condiciones de régimen laminar, se desarrollan dentro los esfuerzos cortantes τ_{xy} a lo largo del diámetro de la tubería;

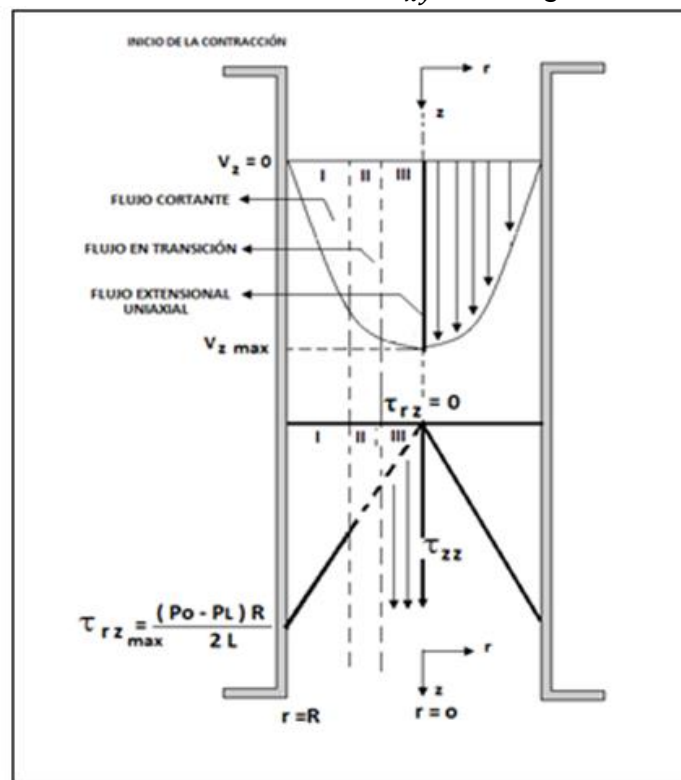


Figura 1.2-1 coexistencias de dominios de flujo dentro del flujo mixto.

dicho esfuerzo es posible de predecir empleando la ecuación de Poiseuille; La Figura 1.2-1 demuestra que, como se mencionó anteriormente los efectos cortantes en el

centro son igual a cero de tal manera que el fluido que está pegado a la pared crea resistencia al deslizar en la misma formándose la condición de adherencia, debido a dicha interacción se forma un perfil de velocidades parabólico como el que se observa en la Figura 1.2-1, en el cual la velocidad máxima se encuentra en el centro y la velocidad que es igual a cero se encuentra en la capa de fluido que está adyacente a la pared del cilindro, así conforme transcurre la transferencia de cantidad de movimiento que se da en la dirección de la pared al centro de este los efectos viscosos van disminuyendo.

La circulación del fluido por la tubería antes de la contracción lleva consigo un régimen permanente, mismo que cambia cuando el fluido entra en la contracción, por ello el sistema libera energía ya que en la zona del orificio se requiere de menor energía para poder desarrollar dentro de ella el régimen permanente generando vórtices, sin embargo dentro de la misma se desarrollan nuevos esfuerzos, τ_{zz} y τ_{zr} $\dot{\epsilon} = \frac{dv_x}{dx}$ que nacen de la línea central y favorecen el desarrollo del flujo extensional uniaxial.

El flujo uniaxial se forma de la línea central de la porción de fluido que entra directamente en la contracción sin padecer los efectos de los vórtices y el caótico reacomodo molecular de la trayectoria de las líneas de líquido una vez dentro de la contracción y libre de esfuerzos cortantes.

1.2.1 Campo de velocidades presentes en un flujo en contracción-expansión.

El desarrollo de un campo de velocidades es importante porque es el que define el tipo de flujo, en el estudio de fluidos complejos a través de contracciones se tiene la coexistencia de 2 flujos el cortante y el extensional y como lo muestra la Figura. 1.2-1 existen 3 zonas en la I predomina un flujo cortante puro, en la III, se desarrolla primordialmente el flujo extensional uniaxial pero solo sobre la línea central, pero en la zona II que bien puede identificarse como una zona de transición existe la coexistencia de ambos flujos, a lo largo de este capítulo de esclarecerán los campos de velocidad y de esfuerzos que predominan en las 3 zonas.

Partiendo del tensor gradiente de velocidades que en forma general puede escribirse como:

$$L_{ij} = D_{ij} + W_{ij} \quad (1.2-1)$$

Donde:

L_{ij} = Componentes i, j del tensor gradiente de velocidad

D_{ij} = Componentes i, j del tensor rapidez de deformación

W_{ij} = Componentes i, j del tensor vorticidad O también:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.2-2)$$

La Ec. 1.4-2 también se puede escribir en forma matricial en coordenadas rectangulares.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) & -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1.2-3)$$

Con la intención de abordar las expresiones de ambos flujos, se abordará cada uno de ellos por separado:

Flujo extensional uniaxial

Los estudios reológicos estaban protagonizados por los flujos de corte. A partir de entonces el interés por el flujo extensional ha aumentado, tras ser conscientes de que éste tenía gran importancia en multitud de situaciones prácticas y que los

líquidos elásticos no newtonianos exhibían comportamientos extensionales muy diferentes de los newtonianos.

Se pueden considerar tres tipos de flujo extensional, uniaxial a), biaxial b) y plano c) de manera que se definen tres viscosidades extensionales (η_E , η_b , η_p)

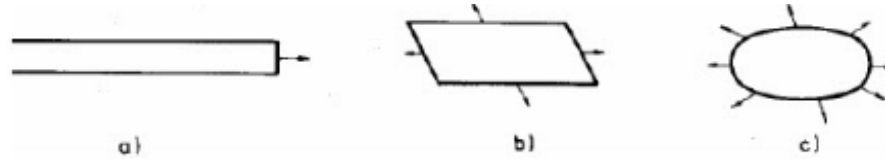


Figura 1.2-2 Imagen de cada tipo de flujo extensional. a) uniaxial, b) biaxial y c) planar.

El flujo extensional puro que se puede llegar a presentar en la línea central, en un proceso de contracción/ expansión, no presenta vorticidad ni componentes cortantes; representándose el mismo con el siguiente gradiente de velocidades dado por la ecuación 1.2-2

$$\underline{\underline{L}} = \underline{\nabla V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial y}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1.2-4)$$

El campo de velocidades se establece asumiendo que sí, el flujo se extiende en la dirección de este una unidad, las direcciones restantes lo harán en la dirección contraria en las dos direcciones restantes comprimiéndose en media unidad resultando el siguiente tensor gradiente.

$$\underline{\underline{L}} = \underline{\nabla V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial y}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.2-5)$$

Integrando cada uno de los términos resulta en:

$$V_x = \dot{\epsilon}X$$

$$V_y = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}y$$

$$V_z = -\frac{1}{2}\dot{\epsilon}z$$

Donde $\dot{\epsilon} = \frac{dv_x}{2dx}$ se define como rapidez de extensión, dicha expresión evalúa el cambio de la velocidad v_x en la misma dirección característica de un flujo extensional uniaxial.

Para un flujo extensional uniaxial se reporta a la función viscosidad como única función material ya que la dirección del flujo coincide con la del gradiente de velocidades, la expresión es:

$$\eta_E = \frac{\tau_{zz} - \tau_{yy}}{\dot{\epsilon}} \quad (1.2-5)$$

Donde $\dot{\epsilon}$ es la rapidez de extensión, η_E es la viscosidad extensional uniaxial. En cuanto a los valores de la viscosidad extensional, para un fluido Newtoniano resulta Figura 1.2-6:

$$\eta_E = 3\mu_0 \quad (1.2-6)$$

Relación que muestra que la viscosidad extensional es 3 veces más grande que la viscosidad cortante, dicha relación fue obtenida por Trouton (Figura 1.2-6). Tomando en cuenta un fluido Newtoniano, se cumple que, en la zona de baja rapidez de extensión, ambas viscosidades tienen un valor constante e igual a tres; así es como este cociente se conoce como la relación de Trouton.

Donde μ_0 , es la viscosidad cortante a cero rapidez de corte.

Flujo cortante.

El flujo cortante se representa en la Figura 1.2-3 es el tipo de flujo más común discutido en reología, dicho flujo es importante en situaciones donde la viscosidad es la propiedad dominante del material, como en flujos cerca de paredes y en aplicaciones de mezcla.

Dentro de este flujo la viscosidad es importante ya que, si bien esta propiedad del fluido es la misma en todo momento, los efectos de esta cerca de la superficie donde este fluye son mayores que el lado del flujo que no tiene contacto con dicha superficie para fluidos Newtonianos, mientras que para fluidos no newtonianos a mayor razón de deformación de corte un fluido que es de viscosidad adelgazante fluya con mayor facilidad ya que la viscosidad disminuye al corte y por el contrario un fluido que es de características espesantes a mayor razón de deformación el fluido presente mayor dificultad al fluir ya que la viscosidad aumenta al corte.

A diferencia de un fluido Newtoniano en el cual la razón de deformación aumenta o disminuye en proporción directa con el esfuerzo cortante aplicado y la viscosidad se mantiene constante, por ende, el fluido fluye sin problema, como se describe a continuación en la Figura 1.2-3.

Suponiendo que la distancia entre las placas mostradas en la Figura 1.2-3 están separadas por una pequeña distancia L y que entre ellas colocamos un fluido, la placa inferior comienza a moverse con una velocidad constante en la dirección x , a medida que el tiempo transcurre, el fluido empieza a ganar cantidad de movimiento (momentum) en la dirección Y ; la cual se entiende como, la extinción del movimiento transitorio inicial desde la placa en movimiento hasta la placa estacionaria, estableciendo así el perfil de velocidades en régimen estacionario.

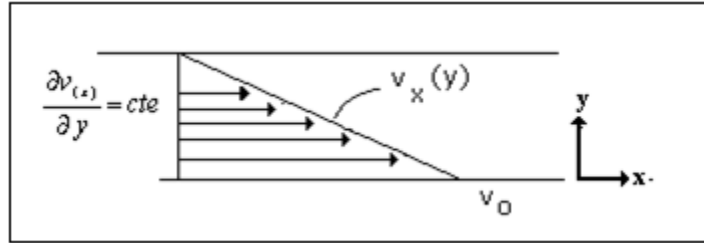


Figura. 1.2-3 Flujo cortante simple entre dos placas paralelas (Transport Phenomena Bird Lighfoot, John wiley ans Sons1960)

A un tiempo finito el fluido alcanza el estado estacionario en movimiento, para mantenerlo se debe aplicar un esfuerzo constante a la placa, se observa que, para resistir dicho esfuerzo, en la interface placa- material se crea un esfuerzo cortante que es la interacción del fluido con la pared.

Observamos que el fluido que está pegado a la superficie de la placa en movimiento, tiene la misma velocidad de la placa inferior y que el fluido pegado a la placa superior, con una velocidad igual a cero, recordando que esta no está en movimiento; el fluido entre las placas se desplaza con una velocidad $V_x(y)$ que varía linealmente en la dirección y, creando así un gradiente de velocidad constante V_x/dy ; cabe mencionar que en situaciones de flujo más complejo esto no se cumple.

El gradiente de velocidad es constante debido a la condición de no deslizamiento que tiene el fluido con la pared de la placa inferior, esto quiere decir que el fluido se adhiere a los linderos del sólido y no desliza, creando así la condición de adherencia o de no deslizamiento.

El tensor gradiente de velocidades dado por la Ec.1.2-3 se reducirá a:

$$\underline{\underline{L}} = \nabla \underline{V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial v_x}{\partial y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.2-7)$$

Como puede observarse el campo de velocidades de un flujo cortante, presenta vorticidad, la cual resulta de la interacción del fluido con la superficie (Ecuación (1.2-8)).

$$\underline{\underline{L}} = \nabla \underline{V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \dot{\gamma} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.2-8)$$

La integración de esta ecuación lleva al campo de velocidades (Ecuación 1.2-9)

$$\underline{v}_x = \dot{\gamma} Y \quad (1.2-9)$$

Ya que la dirección de la transferencia de cantidad de movimiento es perpendicular a la dirección del flujo, solo un componente de tensor de esfuerzos y no dos como en el flujo extensional, es necesario para definir la viscosidad cortante.

A esta expresión se le conoce como la ley de viscosidad de Newton.

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dV_x}{dY} \quad (1.2-10)$$

Donde:

τ_{yx} : Esfuerzo cortante con la fuerza aplicada en la dirección x y la transferencia de velocidad en la dirección Y.

μ : Viscosidad absoluta

$\frac{dV_x}{dY}$: Razón de deformación de corte (gradiente de velocidad, transferencia de cantidad de movimiento).

El signo negativo es debido a que el gradiente de velocidad se da de manera decreciente es decir que la transferencia de cantidad de movimiento va cuesta abajo, entonces se puede decir que el gradiente de velocidad es la fuerza impulsora de la transferencia de cantidad de movimiento. Los fluidos para los cuales el esfuerzo cortante está relacionado linealmente con la deformación de corte se definen como fluidos Newtonianos, siendo así que para los fluidos que no cumplen con lo antes mencionado se denominan fluidos no Newtonianos.

De tal manera que durante el paso del fluido a través de la contracción, se desarrollan 3 campos de velocidades, tal y como se muestra en la Figura.1.2-4.

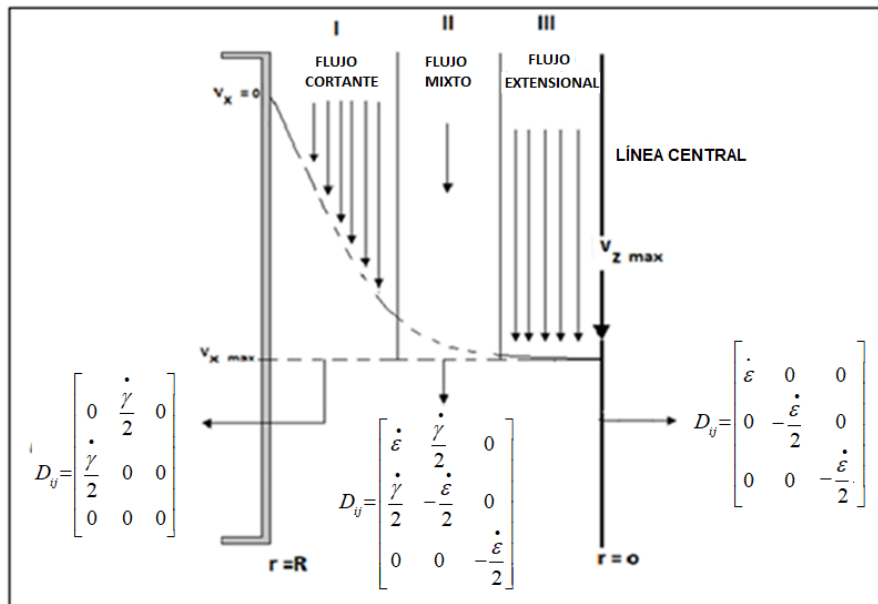


Figura. 1.2-4 desarrollo de diferentes perfiles durante el paso de un fluido Viscoelástico a través de una contracción

1.3 DIFERENCIA DE ESFUERZOS NORMALES.

Si en el sistema de flujo existen las condiciones dinámicas que permitan la manifestación de la elasticidad del fluido esta se manifestará inclusive interactuando las propiedades elásticas del fluido en un flujo con el otro, una de las consecuencias del paso del fluido por la contracción sin lugar

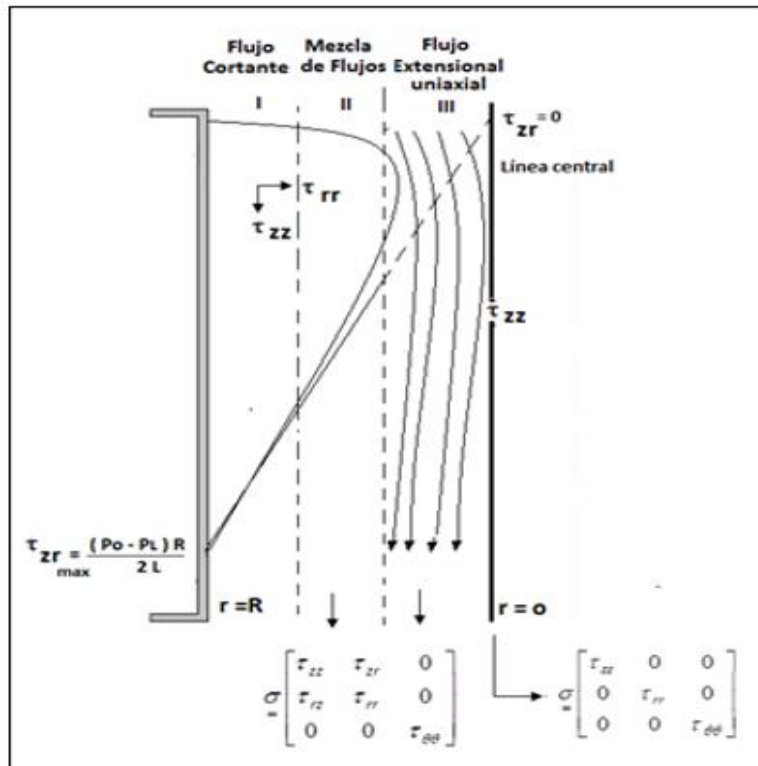


Figura 1.3-1. Diferencia de esfuerzos normales

a duda es la primera diferencia de esfuerzos normales N1 proveniente del flujo en corte que necesariamente se ha incrementado debido a la reducción del área de flujo.

En la Figura. 1.3-1 se ha ilustrado el desarrollo de N1 a lo largo de la contracción como puede observarse su efecto máximo se presenta justo a la entrada, si bien los esfuerzos extensionales τ_{zz} aun débiles debido al pequeño gasto impuesto al sistema, la diferencia de esfuerzos normales provenientes del flujo cortante $N1 = \tau_{zz} - \tau_{rr}$ interactuarán con el desarrollo de los esfuerzos τ_{zz} en extensión, se puede asumir que en esta zona controla el flujo cortante, sin embargo debido a su naturaleza de flujo fuerte, los esfuerzos extensionales crecerán más a medida que se incremente el gasto en el sistema, será cuando la naturaleza elástica en extensión controle el tipo de flujo imperante en el sistema.

Este efecto primeramente reportado por Zabo [6] mediante simulación numérica pero aún sin interpretar el fenómeno que estaba presente, reportó que a gastos pequeños la caída de presión en exceso de un fluido viscoelástico con cierta viscosidad presentaba un descenso en su valor en relación a un fluido newtoniano inelástico de idéntica viscosidad, el cuál cabría esperar que ambos fluidos presentaran los mismos valores de caída de presión en exceso.

Esta diferencia de esfuerzos normales creó una gran controversia entre los investigadores tanto teóricos como experimentales, argumentando estos últimos que ese efecto no había sido encontrado en sus experimentaciones, esta condición puede observarse en la Figura. 1.3-2.

La interpretación fue finalmente atribuida a Binding y que ha sido explicada en detalle al inicio de este capítulo, este efecto entre ambos flujos y de naturaleza elástica vino a sentar las bases del análisis de la dinámica de flujo en este tipo de geometrías y de otras como se verá posteriormente en el avance de este trabajo de tesis.

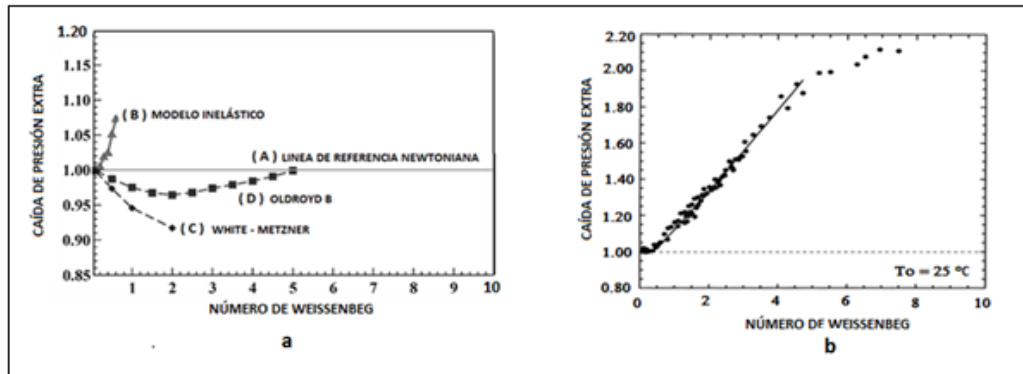


Figura 1.3-2 Comparación de la EPD vs $No. We$ en una contracción/ expansión 4:1:4 (a) Resultados numéricos obtenidos por Walters, (b) Resultados experimentales por Rhotstein. (Walters et al. Korea-Australia Rheology Journal 21(4)-2009-939 Rothstein and McKinley. Journal of Non-Newtonian fluid Mechanics 86-1999 -61)

1.4 CAÍDAS DE PRESIÓN PRESENTES EN EL FLUJO DE UN FLUIDO VISCOELÁSTICO A TRAVÉS DE UN SISTEMA CONTRACCIÓN/EXPANSIÓN AXISIMÉTRICO.

En esta sección del trabajo se presentan las diferentes caídas de presión que intervienen en el desarrollo de la dinámica de flujo, empleando un fluido

viscoelástico el cual transita a través de un sistema de contracción expansión de características axisimétricas.

En la Figura 1.4-1 Se esquematizan las caídas de presión individuales de características viscosas, la presión total y la caída de presión adimensional por efectos de entrada.

Uno de los mecanismos de liberación de energía que se generan como consecuencia de una tensión disipativa dentro de esta con Configuración de contracción de tipo axisimétrica, se desarrolla en el sistema debido a efectos viscosos y por ende puede obtenerse un valor empleando la ecuación de Poiseuille; dichas caídas de presión se esquematizan en la Figura 1.4-1 a) y el desarrollo de los flujos en la Figura 1.4-1 b) Desarrollo del flujo cortante y extensional.

Para estimar el valor de dicha caída de presión se toma como punto de estudio la caída de presión total, la cual se compone de la suma de la caída de presión (ΔP_{L1}) considerando la longitud L_1 de la sección de tubo previa a la contracción, más la caída de presión en la contracción (ΔP_{Lc}) considerando la longitud de la sección de contracción L_c , más la caída de presión (ΔP_{L2}) considerando la longitud L_2 de la sección de tubo posterior a la contracción; por último se suma a la caída de presión

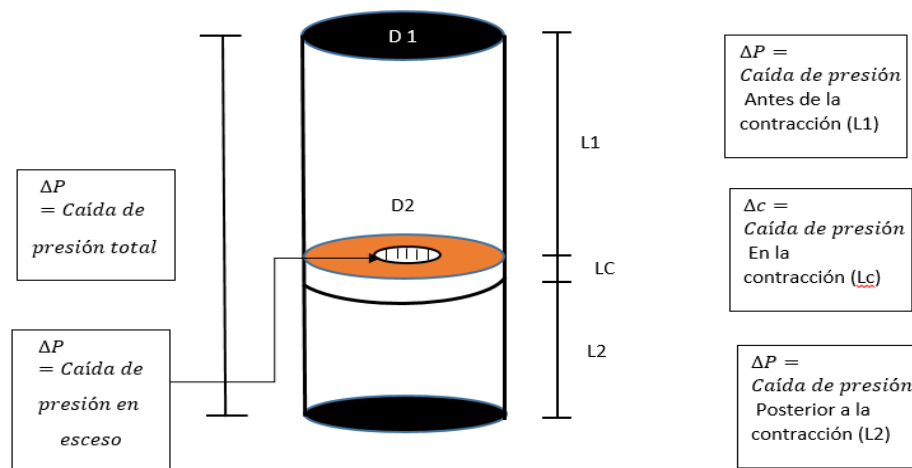


Figura 1.4-1 a) Configuración de diámetros de una contracción expansión de características axisimétrica empleando una placa de orificio, mostrando las caídas de presión que componen la caída de presión

total, la caída de presión en exceso (ΔP_{exc}), esta última caída de presión se presenta debido a efectos de entrada, es decir, esta se genera como consecuencia de la dificultad que tiene el fluido a direccionarse por completo y entrar en la contracción. Las caídas de presión que se toman en cuenta para el estudio de la dinámica de un fluido a través de una contracción se ilustran en la Figura 1.4-1, la cual muestra una configuración de diámetros empleando el uso de una contracción axisimétrica e ilustrando una contracción expansión de características axisimétricas.

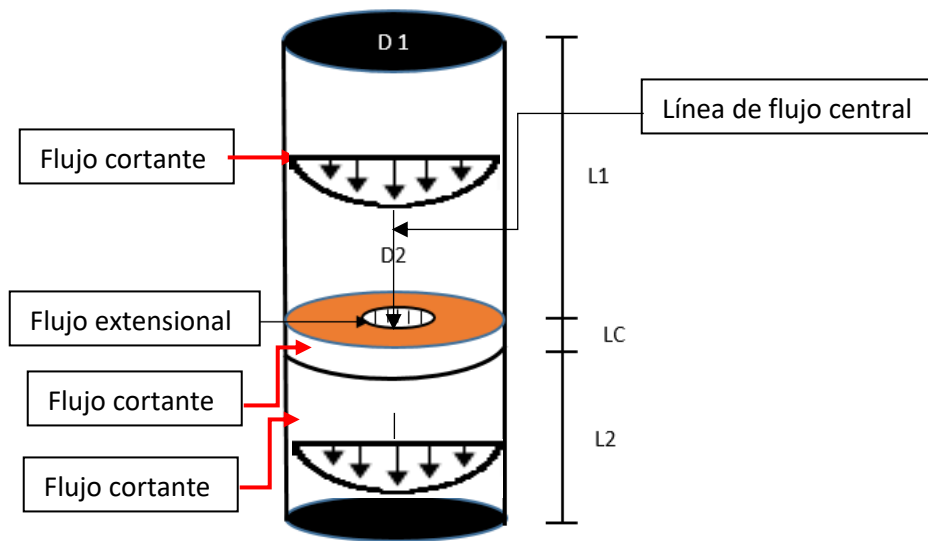


Figura 1.4-1. b) Puntos del sistema de contracción donde se desarrollan los tipos de flujo cortante y extensional.

Como se observó en la imagen 1.4-1 a) se esquematizan las caídas de presión individuales, mismas que al sumarlas componen el valor de la caída de presión total dentro del sistema, esta última se estima a partir de dos sensores individuales, colocados antes y después de la contracción y en la Figura 1.4-1 b) en que parte del sistema se desarrolla el flujo cortante y extensional.

$$\Delta P_{Total} = \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_c + \Delta P_{Exceso} \quad (1.4-1)$$

$$\Delta P_{Total} = \Delta P = \frac{Q8\mu L1}{\pi R1^4} + \frac{Q8\mu L2}{\pi R2^4} + \frac{Q8\mu Lc}{\pi Rc^4} + \Delta P_{Exceso} \quad (1.4-2)$$

Tomando en cuenta que los fluidos viscoelásticos a bajos valores de rapidez de corte no presentan elasticidad y tienden a tener un comportamiento parecido al de

un fluido Newtoniano, asumiendo que el flujo es bajo, la naturaleza elástica de la solución no afecta a las lecturas a como lo hace un fluido puramente viscoso, por ende como se mencionó anteriormente estas caídas de presión se pueden estimar a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille excepto la ΔP_{Exceso} .

Las ecuaciones para cada una de las caídas de presión son las siguientes:

Caída de presión L1

$\Delta P1$

$$\Delta P1 = \frac{Q8\mu L1}{\pi R^4}$$

Caída de presión L2

$\Delta P2$

$$\Delta P2 = \frac{Q8\mu L2}{\pi R^4}$$

Caída de presión LC

ΔPC

$$\Delta PC = \frac{Q8\mu Lc}{\pi Rc^4}$$

$\Delta P 1=$ Caída de presión del sensor 1 a la parte superior de la contracción

$\Delta P 2 =$ Caída de presión de la parte inferior de la contracción al sensor 2

$\Delta P c=$ Caída de presión a través de la contracción

Las caídas de presión antes descritas son de orden viscoso debido a que el fluido y las paredes presentan interacción entre ellas, lo que da como resultado que de las tres se generó la cuarta caída de presión ΔP_E ; dicha caída de presión se define como caída de presión en exceso y es de origen no viscoso (visible en la Figura 1.4-1 a)), esta se presenta en la entrada de la contracción.

La caída de presión en exceso representa la dificultad que manifiesta el fluido al entrar en la contracción debido al reordenamiento de las líneas de corriente del fluido dentro de la misma, por lo que dicha caída de presión es de origen geométrico, mientras que si se trata de un fluido viscoelástico, según Coswell [7], la ΔP_E es de origen elástico y según Cogswell en su valor se captura en su mayor parte las condiciones atribuidas al desarrollo del flujo extensional en la contracción, de aquí que algunas veces a esta caída de presión se le conoce como *caída de presión elástica*.

Para poder comprender de qué manera podríamos deducir la ecuación de la ΔP_{exceso} tomaremos en cuenta como abordo el tema de esta, Sampson en 1891 empleando un fluido Newtoniano.

Él, modelo la presión en exceso con una contracción parecida a la de la Figura 1.4-1 solo que la longitud de esta contracción era infinitamente delgada; entonces concluyo que la caída de presión en exceso no sucedía debido a efectos viscosos si no que esta se generaba solo por efectos de entrada, para poder comprender dicha caída de presión el autor crea una relación de apariencia la cual se define con el término entre paréntesis de la siguiente función:

$$\Delta P_E = \frac{Q\eta}{R} \left(\frac{8 L_{ideal}}{\pi R_c} \right) \quad (1.4-3) \text{ a)}$$

Donde L_{ideal} corresponde a aquella longitud ficticia que predice con exactitud la ΔP_E , Sampson encontró que el término entre paréntesis para fluidos Newtonianos tiene un valor exactamente a 3.

$$\Delta P_E = \frac{Q\eta}{R} 3 \quad (1.4-3) \text{ b)}$$

Sampson considero entonces que, la caída de presión en exceso también podría modelarse con la ecuación de Poiseuille (1.4-3) aplicando en ella su relación de apariencia, físicamente esta relación puede entenderse como la impresión que tiene el fluido al entrar en una contracción.

Para realizar el cálculo de la caída de presión solo en el poro de la contracción la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\Delta P_{poro} = \frac{Q8\mu L_c}{\pi R_c^4} + \frac{Q8\mu L'}{\pi R^3} \quad (1.4-4) \text{ b)}$$

Donde el primer término de la suma de la ecuación se refiere a una caída de presión por efectos viscosos pues el líquido interactúa con la pared interna de la contracción, mientras que el segundo término fue modelado con la misma ecuación. La caída de

presión en exceso no es por efectos viscosos debido a la placa infinitamente delgada, entendiendo que esta solo se considera a la entrada de la contracción.

Entonces, Sampson desarrolla con esta relación, una constante la cual es la siguiente:

Comienza poniendo a $\pi(L')$ para ambos miembros de la ecuación

$$\pi(L') = \frac{8L'}{R_c} \quad (1.4-5)$$

$$\pi(L_{ideal}') = \frac{8L_{ideal}'}{R_c} \quad (1.4-6)$$

Dónde: L lineal corresponde a la longitud ficticia que predice con exactitud la ΔP_E .

Sustituyendo (1.4-5) y (1.4-6) en (1.4-4), por lo tanto, la ΔP poro queda como:

$$\Delta P \text{ poro} = \pi(L') \frac{Q\mu}{R_c^3} + \pi(L_{ideal}') \frac{Q\mu}{R_c^3} \quad (1.4-7)$$

Donde: $\pi(L_{ideal}') = X \text{ sampson}$ constante de Sampson

La ecuación resultante es:

$$\Delta P \text{ poro} = [\pi(L') + X \text{Sampson}] \frac{Q\mu}{R_c^3} \quad (1.4-8)$$

Suponiendo que en el sistema de flujo experimental se emplea un fluido Newtoniano, entonces la caída de presión se determinará con la siguiente función.

$$\Delta P \text{ Total} = \frac{Q8\mu L'_1}{\pi R_1} + \frac{Q8\mu L'_2}{\pi R_2} + \frac{Q8\mu L'_c}{\pi R_c} + \frac{3Q\mu}{R_c} \quad (1.4-9)$$

$$\frac{Q8\mu L'_1}{\pi R_1} = \text{Tubo superior}$$

$$\frac{Q8\mu L'_2}{\pi R_2} = \text{Tubo inferior}$$

$$\frac{Q8\mu L'_c}{\pi R_c} = \text{Contracción.}$$

$$\frac{3Q\mu}{R_c} = \text{Efecto de entrada}$$

Para un fluido Newtoniano la relación (1.4-3) no es válida para determinar la caída de presión en exceso.

Cuando la naturaleza elástica de la solución no se manifiesta a regímenes de flujo a los que se lleva a cabo la experimentación aún puede emplearse la ecuación de Hagen- Poiseuille y partiendo del hecho de que la caída de presión total se estima experimentalmente, la caída de presión por efectos de entrada puede calcularse como la ecuación (1.4-10):

$$\Delta P_E = \Delta P_{\text{Total}} - \left[\frac{Q8\mu L'_1}{\pi R_1} + \frac{Q8\mu L'_2}{\pi R_2} + \frac{Q8\mu L'_c}{\pi R_c} \right] \quad (1.4-10)$$

La ecuación (1.4-10) es de naturaleza elástica, dicha ecuación alberga información referente al desarrollo del flujo extensional en particular de la viscosidad extensional.

1.5 VARIABLES REOMÉTRICAS DE UN FLUIDO A TRAVÉS DE UN FLUJO CONTRACCIÓN /EXPANSIÓN.

El comportamiento de un fluido cualquiera en un ducto circular es de naturaleza cortante, para obtener el valor de la rapidez de corte es necesario el uso de la ecuación de Weissenberg-Rabinowitsch [7], la cual está encargada de estimar la rapidez d

e corte de un fluido a través de un ducto circular y está dada por:

$$-\left(\frac{dV_x}{dr}\right)_{\tau_w} = \dot{\gamma} W = \left(\frac{1}{4}\right) \dot{\gamma}_{aW} \left[3 + \frac{d \text{Ln}Q}{d \text{Ln}\tau_w}\right] \quad (1.5-1)$$

Dónde:

$\dot{\gamma} W$ = Rapidez de corte en la pared del tubo

$\dot{\gamma}_{aW}$ = Rapidez de corte aparente en la pared del tubo = $\frac{4Q}{\pi R^3}$

Q = Flujo volumétrico

$$\tau_w = \text{Esfuerzo en la pared del tubo} = \left(\frac{R}{2} \right) \frac{\Delta P}{L}$$

Donde el término de la derecha que se encuentra entre paréntesis es la pendiente de la recta resultante de graficar $\ln Q$ vs $\ln \tau_w$, que en la mayoría de los casos es muy cercana a 1, por lo que la ec. 1.5-1 se reduce a:

$$-\left(\frac{dV_x}{dr} \right)_{\tau_w} = \dot{\gamma} W = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1.5-2)$$

Si se trata de un fluido que sigue la ley de la potencia, la rapidez de corte puede estimarse como:

$$-\left(\frac{dV_x}{dr} \right)_{\tau_w} = \dot{\gamma} W = \left(\frac{1}{4} \right) \dot{\gamma}_{aw} \left[3 + \frac{1}{n} \right] = \frac{3n+1}{4n} \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad (1.5-3)$$

Por lo que la viscosidad cortante podrá estimarse como:

$$\mu = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} = \frac{\pi R^4 \Delta P}{2QL} \left(\frac{n}{3n+1} \right) \quad (1.5-4)$$

Para un fluido Newtoniano con $n=1$

$$\mu = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8QL} \quad (1.5-5)$$

Para el caso en que la geometría de contracción-expansión axisimétrica desarrolla un flujo extensional sobre la línea central resulta una tarea considerablemente más compleja, para estimar los parámetros reométricos que permitan caracterizar el comportamiento del fluido en flujo extensional, existen diversos métodos, de hecho a lo largo de los últimos años han evolucionado tendencias a obtener valores de viscosidad extensional cada vez más precisos con la idea de obtener un equipo experimental que permita caracterizar en flujo extensional soluciones poliméricas

diluidas , sin lugar a dudas la idea inicial de estimar la viscosidad extensional surgió de un comentario de Cogswell [7] en el sentido de que la caída de presión de entrada ΔP_E dada por la Ec. 1.4-5 conserva en gran medida las características elásticas desarrolladas por la presencia del flujo extensional sobre la línea central de la contracción, Metzner [8] analizando la cinemática de flujo , propuso empleando coordenadas esféricas , que la velocidad en la dirección radial y que corresponde a la velocidad v_r en donde se desarrolla el filamento extensional estaba dado por :

$$v_r = -\frac{Q}{A}, \quad v_\theta = v_\phi = 0 \quad (1.5-6)$$

En donde el gasto Q debía ser evaluado experimentalmente y A corresponde al área transversal del filamento que se desarrolla en la línea central.

Macosko [9] propuso que la rapidez de extensión $\dot{\epsilon}$ dependía del ángulo de entrada a la contracción θ mostrado en la Figura. 1.1-2, consideró que 15° representaba razonablemente el promedio de ángulos con los que entraba el fluido en la mayoría de los estudios experimentales

Proponiendo:

$$\dot{\epsilon} = \frac{Q}{2\pi R_c^3} \quad (1.5-7)$$

En donde R_c es el radio de la contracción, la cual tomando en cuenta la expresión de la rapidez de corte aparente dada por la Ec. 1.5-2, la expresión de la rapidez de extensión se puede expresar como:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\gamma}_a}{8} \quad (1.5-8)$$

Partiendo de la definición de viscosidad extensional dada por la siguiente relación

$$\eta_E = \frac{\tau_{zz} - \tau_{rr}}{\dot{\epsilon}} \quad (1.5-9)$$

Balakrishnan y Gordon [9] que la primera diferencia de esfuerzos normales en extensión considerados en la Ec. 1.5-9 y que se desarrollan sobre la línea central

no hay efectos de la presencia de esfuerzos cortantes, la caída de presión de entrada puede escribirse como:

$$\Delta P_E = \tau_{zz} - \tau_{rr} \quad (1.5-10)$$

Por lo que la viscosidad extensional será:

$$\eta_E = \frac{8\Delta P_E}{\dot{\gamma}_a} \quad (1.5-11)$$

1.6 CONTRACCIÓN-EXPANSIÓN CUADRADA.

Claramente una diferencia notoria entre la geometría en contracción anterior y la relación de contracción de geometría cuadrada, es el aumento en el área de sección transversal, además de una mayor superficie de contacto del fluido con las paredes de la geometría en contracción, lo que supone el favorecimiento del flujo cortante, dentro de la dinámica que pudiese presentarse.

En la contracción del conducto cuadrado, las líneas de isopresión pueden cerrarse en la corriente cruzando las direcciones, como en la geometría axisimétrica, llegándose a presentar desequilibrios de tensión normales que conducen a flujos secundarios.

El desarrollo de un flujo a través de un sistema en contracción/expansión cuadrada se representa en la Figura. 1.5-1, un fluido que puede ser puramente viscoso o

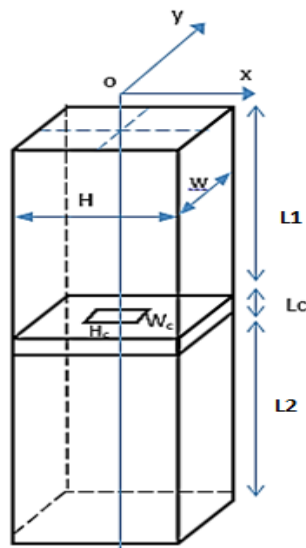


Fig. 1.6-1 sistema de flujo con una contracción-Expansión cuadrada

viscoelástico fluye a través de un ducto cuadrado de dimensiones $W \times H$ hacia una contracción también cuadrada de dimensiones $W_c \times H_c$, si bien la dinámica operativa de un sistema de contracción-expansión axisimétrica circular es muy semejante al sistema de flujo en contracción/ expansión cuadrada, la dinámica de flujo es muy diferente.

Probablemente la característica más importante entre ambos es que la contracción cuadrada está definida por tres dimensiones (3D) y depende del ángulo de visión del experimentador, mientras que la geometría axisimétrica circular está definida en dos dimensiones (2D), siempre y cuando el rayo de incidencia que permite la visualización del flujo sea perpendicular a la cámara fotográfica que toma las imágenes. Alves [10] ha propuesto una dinámica del desarrollo del flujo en una contracción cuadrada mostrada en la Figura. 1.6-2 , para ello propone al menos dos planos de observación, el plano (ABCD) que corresponde a la imagen que toma la cámara fotográfica y otra a 45° dada por el plano (EFGH) , el autor asume el desarrollo de las líneas de corriente semejantes a los resultados espectaculares reportados por D.Niedziela y O.Iliev and A.Latz,[11] mostrados en la Figura.1.6-3 , asume que las líneas de corriente forman un flujo divergente en las cercanías a la entrada de la contracción como el encontrado por Cable y Boger en contracción axisimétrica y mostrado en la Figura.1.1-1 , esto debido al desarrollo de corrientes de flujo de origen extensional, sin embargo, este flujo al igual que el flujo en contracción axisimétrica va a interactuar fuertemente a la entrada de la contracción con esfuerzos normales provenientes ahora de cuatro paredes que constituyen a la contracción cuadrada, ocasionando fuertes inestabilidades en el flujo de entrada,

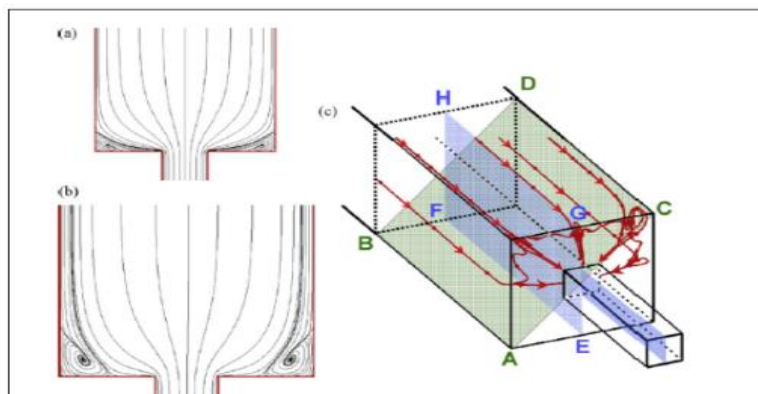


Figura. 1.6-2 Dinámica del desarrollo de un elemento de fluido a través de una contracción cuadrada

ocasionando principalmente flujos secundarios que interferirán fuertemente con el desarrollo del flujo extensional uniaxial en la línea central.

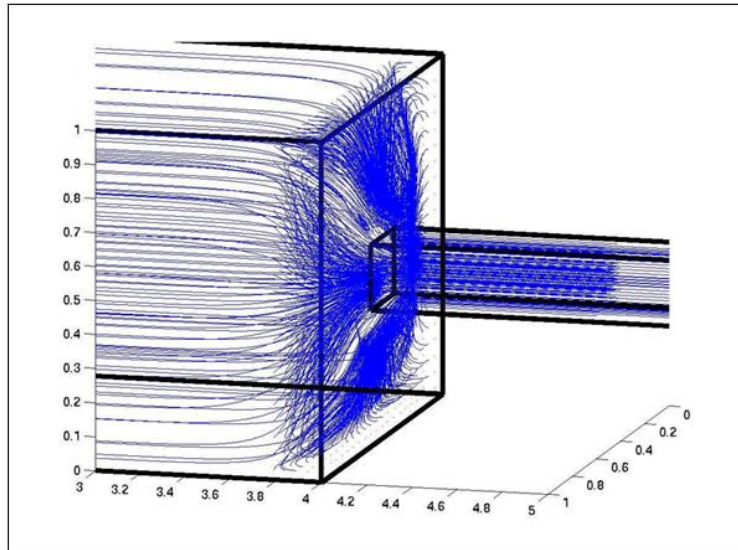


Figura 1.6-3 Líneas de corriente de un fluido viscoelástico a través de una contracción cuadrada.

Los trazadores empleados en esta investigación demostraron que las corrientes de flujo cercanas a la pared del tubo cuadrado que conduce al fluido hacia la contracción tienden a rotar en la esquina que pertenece al plano de desarrollo del vórtice tal y como lo muestra la Figura 1.6-2, para posteriormente dirigirse hacia el ojo del Vórtice localizado en el centro de ambas tuberías, para posteriormente ingresar a la contracción.

Los estudios formales sobre la dinámica de flujo a través de contracciones cuadradas en su forma de contracción simple o en contracción expansión, son escasos, probablemente el estudio más aceptado es el realizado por Sousa [11] el cual relaciona la dinámica de flujo a partir de la observación del desarrollo y crecimiento de vórtices en las cercanías de la contracción. Sousa ha propuesto un diagrama de las características y tamaños del Vórtice en función del número de Deborah para diferentes relaciones de contracción en geometrías cuadradas y que es mostrado en la Figura.1.6-4.

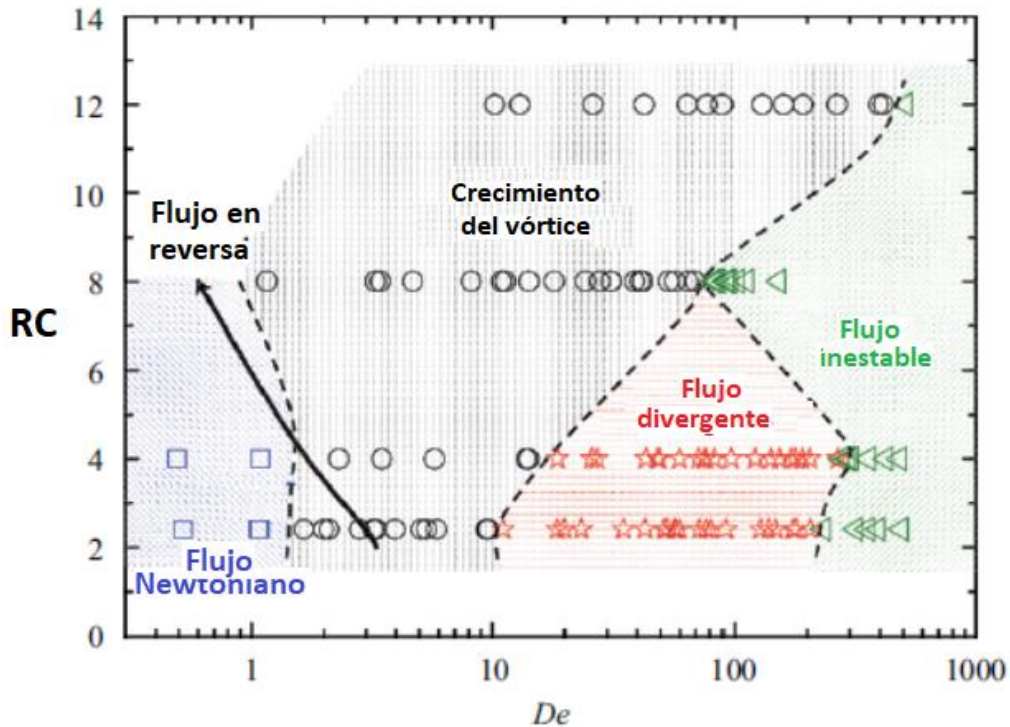


Figura 1.6-4 Trayectorias de flujo de un fluido de Boger a través geometrías cuadradas con diferentes relaciones de contracción

El autor propone la existencia de 4 etapas o regímenes de flujo que presenta un fluido de Boger a través diversas relaciones de contracción

- Régimen de comportamiento Newtoniano
- Régimen de crecimiento del Vórtice
- Régimen con líneas de corriente divergentes
- Regimen de estado transitorio o inestable

La primera de ellas se caracteriza por circular a través de la contracción flujos muy bajos con números de Deborah inferiores a 1.5, donde gobierna esencialmente el régimen viscoso y la manifestación elástica de la solución apenas es perceptible con formación de vórtices de esquina con concavidad hacia abajo.

En la segunda etapa llamada “Régimen de crecimiento de vórtices” su aparición depende mucho de la relación de contracción, se caracteriza principalmente por un crecimiento de constante en el tamaño del vórtice al incrementar el no. De Deborah en el sistema, para relaciones de contracción grandes arriba de la 5:1:5 el tamaño

empieza a incrementarse cada vez más a no. De Deborah pequeños para una relación 8:1:8 como lo muestra el diagrama, su manifestación empieza a $De \approx 0.8$ y sigue manifestándose hasta valores aproximadamente de $De \approx 80$, resulta evidente que en esta zona que resulta ser la más amplia el flujo del fluido está dominado por la naturaleza elástica de la solución.

Sin embargo, entre la primera y segunda zona existe un fenómeno que habla mucho de la dinámica de flujo, este fenómeno identificado por el autor como “Flujo en reversa” se representa en la Figura.1.6-5

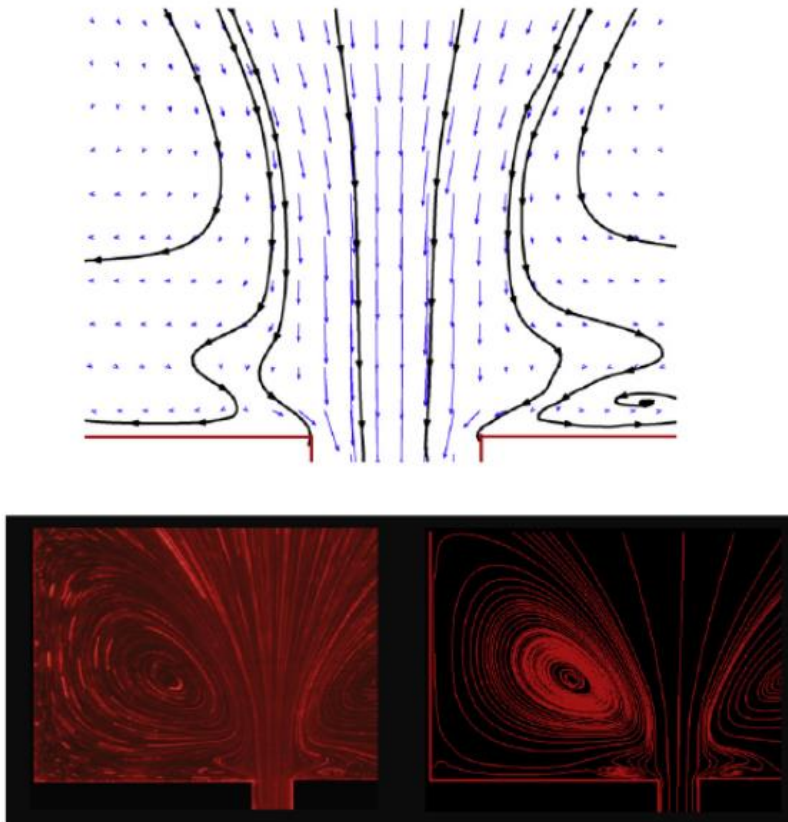


Figura.1.6-5 Flujo en reversa que presentan los fluidos viscoelásticos a la entrada de una contracción cuadrada.

Este fenómeno muestra a partir de sus líneas de corriente un fuerte desarrollo del flujo extensional que se desplaza desde el centro hacia las cuatro paredes de la contracción cuadrada, esta última zona posee valores de viscosidad extensional tan altas que hace que las líneas de corriente sin una entrada directa a la

contracción y que poseen una mayor carga de flujo cortante ubicadas en las cercanías de las paredes de la contracción, son desviadas hacia las paredes del tubo principal ocasionando un retorno del fluido hacia zonas por arriba de la placa de contracción, este fenómeno identificado como “Flujo en reversa” prácticamente lo presentan todas las contracciones como lo muestra la trayectoria indicada en la Figura.1.6-4 y a valores del no. de Deborah inferiores a 1.5 , lo que resulta altamente descriptivo e intrigante es observar cómo es que geometrías con relación de contracción más pequeñas como la 2:1:2 con un área de flujo de la contracción más grande llegan a presentar el fenómeno a números de Deborah muy pequeños, esto quiere decir que estas relaciones de contracción favorecen notablemente el desarrollo del flujo extensional, lo cual resulta explicable si se toma en cuenta que entre más grande es el área de flujo y con números de Deborah pequeños, la presencia de un flujo cortante sobre las paredes de la contracción se minimiza notablemente favoreciendo el desarrollo del flujo extensional uniaxial.

La tercera zona identificada como zona de “Crecimiento del Vórtice”, se desarrolla en intervalos del número de Deborah muy grandes, tal y como se observa en la Figura. 1.6-4, se caracteriza por aquella condición en donde el tamaño y tipo de Vórtice depende directamente del No. de Deborah impuesto al sistema, esta zona acortada notablemente a relaciones de contracción pequeñas como la 2:1:2 pero se va ampliando a medida que la relación de contracción crece es decir el área de flujo de la contracción se reduce.

Existe una tercera zona identificada como, “Zona de Flujo Divergente “. Esta zona se caracteriza por un fuerte desarrollo elástico en la zona de contracción, las líneas de corriente desarrolladas desde el centro hacia las paredes generan perfiles de velocidades semejantes a los descritos en la Figura.1.1-1, una visión de este tipo de flujo puede observarse en la Figura. 1.6-3.

A pesar de que este es un flujo altamente elástico y con una fuerte presencia de la primera diferencia de esfuerzos cortantes N_1 provenientes de un fuerte desarrollo del flujo cortante en las cuatro paredes de la contracción , aún no se presentan efectos desestabilizantes del flujo tal y como lo mencionó Walters y Rawlison [12] en el sentido de que en este tipo de contracciones se pueden generar una mezcla

de corrientes de flujo con esfuerzos de tipo normales que pueden generar inestabilidades en el flujo principal, esto probablemente a que una geometría cuadrada indudablemente presenta primera diferencia de esfuerzos normales, estos provienen de cuatro lados de dimensiones idénticas.

Existe una última zona identificada como “Zona de Inestabilidad”, se caracteriza por la formación de vórtices muy grandes definitivamente fuertemente elástica pero que presenta vórtices asimétricos con dimensiones de una parte de ellos diferentes a la otra parte, inclusive con direcciones de rotación opuestas, esto es debido a la presencia de corrientes secundarias que se mezclan una con otras, tal y como lo predijo Walters-Rawlison [12]. Esta es una zona aún inexplorada habiendo prácticamente pocos estudios sobre su predicción y la dinámica de flujo gobernante en estas condiciones.

Caídas de presión presentes en contracción-expansión cuadrada

En la Figura 1.6-6 se representan las caídas de presión presentes cuando un fluido fluye a través de un sistema de flujo en contracción-expansión cuadrada

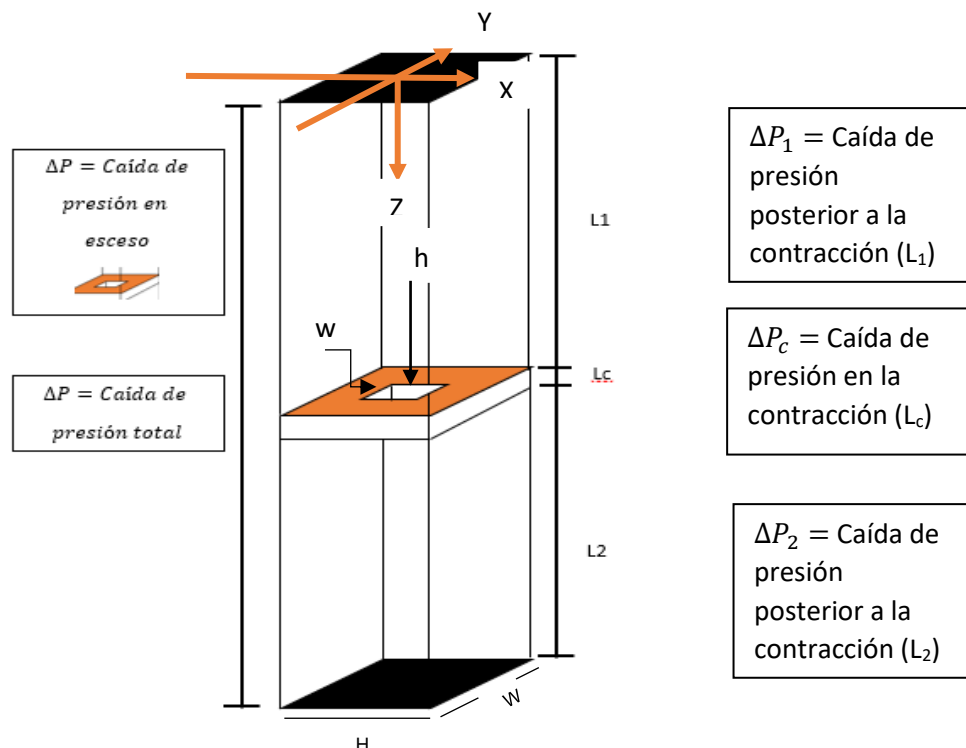


Figura 1.6-6 Representación de las caídas de presión individuales y totales en Un sistema de flujo en Contracción- Expansión cuadrada.

La caída de presión total en términos de las caídas de presión individuales se puede escribir como:

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_c + \Delta P_E \quad (6.1-1)$$

La predicción teórica de los tres primeros términos después del signo igual para un fluido tipo Hagen-Poiseuille para un fluido newtoniano se han reportado diversas ecuaciones en la literatura abierta, probablemente la más conocida es la que reporta Middleman [13].

$$\Delta P = \frac{12 \mu L Q}{W H^3 F_p} \quad (6.1-2)$$

Donde F_p es el factor de forma obtenido de la Figura. 1.6-7, y es dependiente de la relación de aspecto W/B dado que la Ec. 6.1-7 también es aplicable a ductos rectangulares.

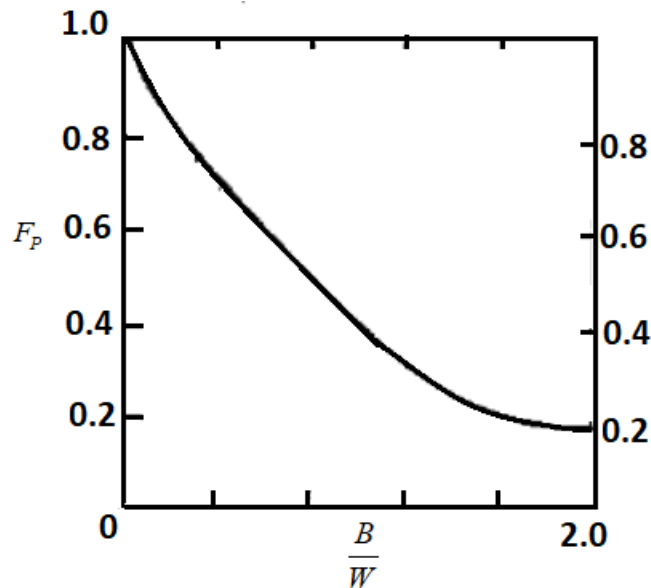


Figura. 1.6-7 Factor de forma vs Relación de apariencia para Geometrías rectangulares

Una deducción muy detallada de esta ecuación la presenta K. Muñoz [14]. Entonces si se consideran todos los términos de la EC. 6.1-1, la caída de presión total podrá escribirse como:

$$\Delta P_{total} = \underbrace{\frac{12 \mu L_1 Q}{W H^3 F_{p1}}}_{\text{Tramo 1 tubo recto}} + \underbrace{\frac{12 \mu L_2 Q}{W H^3 F_{p2}}}_{\text{Tramo 2 tubo recto}} + \underbrace{\frac{12 \mu L_C Q}{W H^3 F_{pc}}}_{\text{Altura de la Contracción}} + \Delta P_{Entrada} \quad (6.1-3)$$

No existe reportada en la literatura la caída de presión por efectos de entrada similar a la ecuación propuesta por Sampson, ni para fluidos Newtonianos ni para fluidos viscoelásticos, sin embargo, dado que la caída de presión total es estimada experimentalmente, la $\Delta P_{Entrada}$ para cualquier tipo de fluido puede obtenerse directamente por despeje

$$\Delta P_{Entrada} = \Delta P_{total} - \left[\underbrace{\frac{12 \mu L_1 Q}{W H^3 F_{p1}}}_{\text{Tramo 1 tubo recto}} + \underbrace{\frac{12 \mu L_2 Q}{W H^3 F_{p2}}}_{\text{Tramo 2 tubo recto}} + \underbrace{\frac{12 \mu L_C Q}{W H^3 F_{pc}}}_{\text{Altura de la Contracción}} \right] \quad (6.1-4)$$

1.7 CONTRACCIÓN-EXPANSIÓN HIPERBÓLICA

La geometría contracción/expansión hiperbólica a pesar de su simplicidad muestra una gran variedad de trayectorias de flujo que dependen desde la reología del fluido empleado hasta el tipo de trayectoria hiperbólica estudiada o inclusive si la geometría es rectangular o cilíndrica. Al igual que la geometría axisimétrica y cuadrada durante el flujo se presenta espontáneamente la competencia entre el flujo cortante que se manifiesta principalmente sobre las paredes de la contracción y el flujo extensional uniaxial que se presenta principalmente sobre la línea central. Al momento de entrar el fluido a la geometría esta impone condiciones de flujo que ocasiona respuestas del fluido muy diversas dependiendo de la reología del fluido, por ejemplo, si el experimento se lleva a cabo a flujo constante, a medida que el flujo se desarrolla, el fluido experimenta una aceleración diferencial a través de una diferencial de longitud, debido a la reducción de área, esta condición se mantiene hasta llegar al área más pequeña que ofrece la geometría, la cual se encuentra justo en su parte media para iniciar nuevamente el fenómeno en dirección inversa, es decir un proceso de expansión. Desde el punto de vista reológico, el fluido expuesto a una contracción-expansión hiperbólica, en su etapa de contracción experimenta

un incremento en la rapidez de deformación de forma también diferencial, si el fluido es de naturaleza Newtoniana su respuesta será exclusivamente de origen viscoso, el cual se desarrollará a lo largo de las paredes de la contracción, sin embargo dado que el área disminuye diferencialmente la respuesta viscosa del fluido irá disminuyendo para incorporarse cada vez más una respuesta de naturaleza inercial el cual tendrá su mayor presencia justo en el centro de la contracción, este efecto ha sido registrado visualmente debido a la presencia de vórtices de origen no elástico en las cercanías del plano medio de la contracción, tal y como lo reporta Campo Deaño [15].

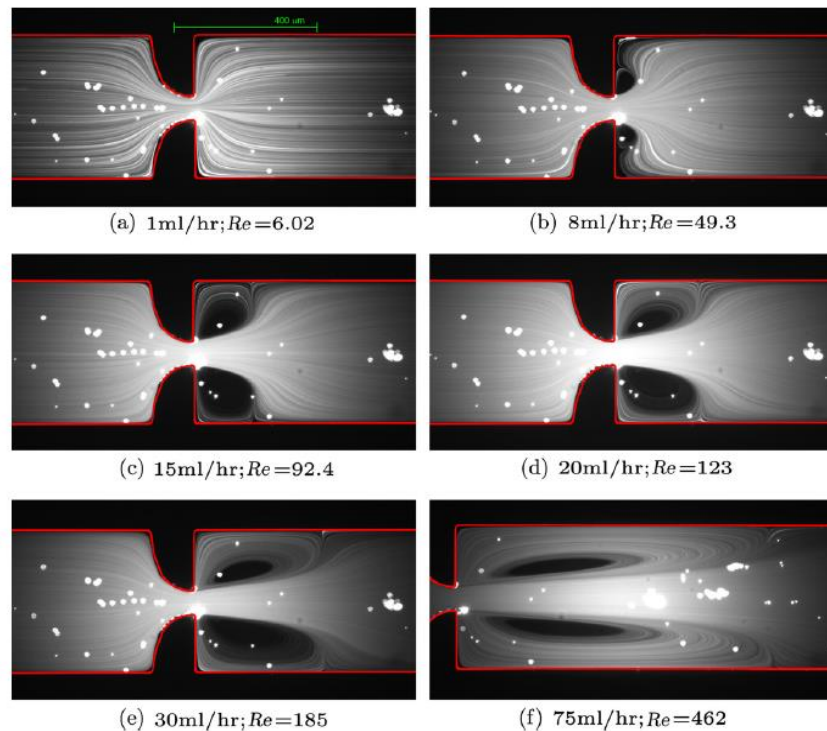


Figura. 1.7-1 Trayectorias de flujo a través de una contracción hiperbólica de agua destilada en donde se observa el dominio de las fuerzas inerciales sobre las viscosas mediante la formación de vórtices en las cercanías de la contracción.

Laura Campo Deaño, Journal of non Newtonian Fluid Mechanics 166(2011) 1286-1296

Si se trata de un fluido viscoelástico de viscosidad constante tal como el fluido de Boger, la competencia entre la respuesta viscosa proveniente del fuerte desarrollo del flujo cortante en relación a la respuesta de origen inercial resulta muy disparaja a menos de que las fuerzas inerciales se desarrollen debido a la impartición de gastos altos los cuales generarán velocidades altas, lo que si se presenta es el

desarrollo de esfuerzos extensionales que favorecen el desarrollo del flujo extensional a lo largo de la línea central que ahora se ve fuertemente favorecido debido a que esta geometría desarrolla al flujo hacia un área menor en relación a la que entra generando un flujo con líneas de corriente convergentes hacia la línea central, sin lugar a dudas la competencia entre el desarrollo del flujo extensional uniaxial y el flujo cortante resulta importante para entender la dinámica de flujo, aunado a esta competencia y teniendo en mente el estudio de la dinámica de flujo, la presencia de esfuerzos normales provenientes del desarrollo del flujo cortante es importante, ya que como se ha estudiado en las contracciones anteriores su presencia es determinante en la dinámica de flujo a valores de rapidez de corte pequeñas. Si bien el flujo extensional uniaxial se considera un flujo fuerte, a valores de rapidez de corte pequeñas debe competir con dos efectos contrarios como lo son el desarrollo del flujo cortante de origen viscoso y la primera diferencia de esfuerzos normales asociada a este flujo que es de origen elástico.

Si se trata de un estudio de la dinámica de flujo de un fluido viscoelástico pero adelgazante, su respuesta al flujo ahora involucra un efecto más en relación a la respuesta de un fluido de Boger, la naturaleza adelgazante va a ocasionar un descenso de la viscosidad de una manera diferencial a medida que se incremente la rapidez de corte diferencial a lo largo de la geometría, esta condición merma sustancialmente la presencia del flujo cortante, permitiendo un mayor desarrollo del flujo extensional, sin embargo la presencia de la N_1 en corte no cambia por el hecho de disminuir la viscosidad del fluido, de aquí que en este estudio se van a presentar dos tipos de competencias, a valores bajos de rapidez de corte, el desarrollo del flujo extensional compite tanto con el desarrollo del flujo cortante aún con un valor de viscosidad alta junto a su manifestación elástica correspondiente a la primera diferencia de esfuerzos normales.

A valores relativamente altos la competencia entre efectos contrarios, la competencia será entre un flujo extensional muy intenso con un flujo cortante muy disminuido en donde la viscosidad del fluido habrá a valores tan bajos como la del disolvente, sin embargo, con una respuesta elástica asociada al corte muy intenso

cuyos esfuerzos cortantes serán en magnitud muy similares o inclusive mayores a los esfuerzos extensionales desarrollados sobre la línea central.

Caídas de presión presentes en una contracción-expansión hiperbólica

El modelado del comportamiento de la caída de presión de un fluido a través de un sistema de flujo contracción/expansión hiperbólica, al igual que las geometrías anteriores la axisimétrica y la cuadrada debe iniciar a partir del establecimiento de una ecuación tipo Hagen-Poiseuille específico de una geometría hiperbólica, para esto se parte de la Ec. de Hagen-Poiseuille para el caso de un fluido Newtoniano a través de una geometría cilíndrica

$$\Delta P = \frac{8Q\mu L}{\pi r^4} \quad (1.7-1)$$

En general lo que se pretende obtener se puede seguir el método propuesto por Sochi [21] escribiendo en forma diferencial la Ec. 1.7-1, considerando la posición x para cualquier longitud L de la geometría que se pretende modelar y considerando que el radio que el radio de la geometría sea dependiente de la posición, de tal manera que la Ec. 1.7-1 ahora puede escribirse como:

$$\Delta P = \frac{8Q\mu}{\pi} \int_{x=0}^{x=L} \frac{dx}{r(x)^4} \quad (1.7-2)$$

Como puede observarse la integración de la Ec. 1.7-2 para un radio independiente de la posición como el caso de una geometría cilíndrica, se obtiene la Ec. 1.7-1.

La Ec. 1.7-2 es muy útil dado que en el denominador de la integral puede sustituirse una función geométrica en particular que se quiere estudiar, en particular en este trabajo será una función hiperbólica, la cual se seguirá la propuesta por Tabatabaei [22] e ilustrada en la Figura. 1.7-1

$$r(x) = \frac{r_{\max}}{\sqrt{\left(\frac{z}{15r_{\min}}\right)\left(\frac{r_{\max}^2}{r_{\min}^2} - 1\right) + 1}} \quad \text{para } 0 \leq z \leq 15r_{\min} \quad (1.7-3)$$

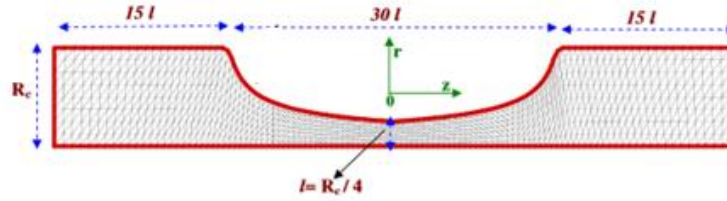


Figura. 1.7-2 Características de la geometría hiperbólica propuesta por Tabatabaei Rheologica Acta 54(2015)869-885

Sustituyendo Ec. 1.7-3 en Ec. 1.7-2 e integrando se obtiene finalmente

$$\Delta P = \frac{80Q\mu}{\pi r_{\max}^4} \left\{ r_{\min} + \frac{r_{\max}^2}{r_{\min}} + \frac{r_{\max}^4}{r_{\min}^3} \right\} \quad (1.7-4)$$

La Ec. 1.7-4 junto a la Ec. de Hagen-Poiseuille dada por la Ec. 1.7-1, permite hacer una predicción completa de la caída de presión total, la cual podrá escribirse como:

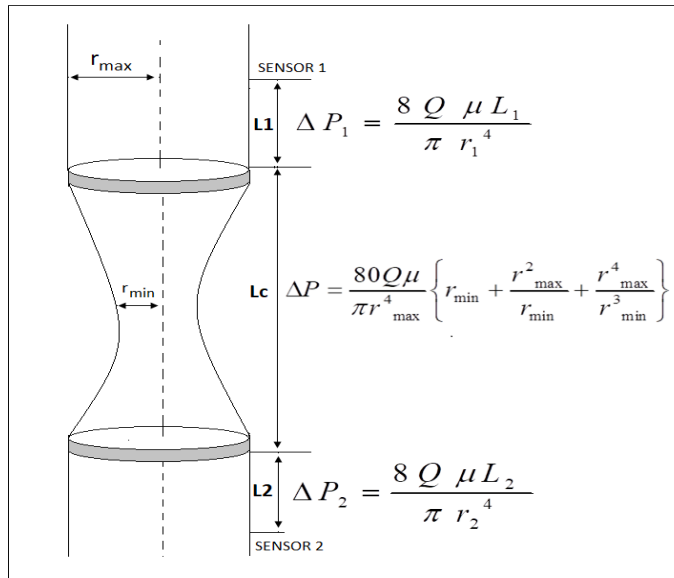


Figura. 1.7-3 Caídas de presión individuales y total en una contracción-expansión axisimétrica

$$\Delta P_{Tot} = \underbrace{\frac{8Q\mu L_1}{\pi r_1^4}}_{\text{tubo superior}} + \underbrace{\frac{80Q\mu}{\pi r_{\max}^4} \left[r_{\min} + \frac{r_{\max}^2}{r_{\min}} + \frac{r_{\max}^4}{r_{\min}^3} \right]}_{\text{contracción hiperbólica}} + \underbrace{\frac{8Q\mu L_2}{\pi r_2^4}}_{\text{tubo inferior}} + \underbrace{\Delta P_E}_{\text{Efecto de entrada}} \quad (1.7-5)$$

La caída de presión por efectos de entrada en una contracción hiperbólica cuando fluye un fluido Newtoniano podrá obtenerse a partir de de la Ec. 1.7-5 quedando como:

$$\Delta P_E = \Delta P_{Tot} - \left\{ \frac{8Q\mu L_1}{\pi r_1^4} + \frac{80Q\mu}{\pi r_{\max}^4} \left[r_{\min} + \frac{r_{\max}^2}{r_{\min}} + \frac{r_{\max}^4}{r_{\min}^3} \right] + \frac{8Q\mu L_2}{\pi r_2^4} \right\} \quad (1.7-6)$$

Mientras que para un fluido viscoelástico será:

$$\Delta P_E = \Delta P_{Tot} - \left\{ \frac{8Q\eta_1 L_1}{\pi r_1^4} + \frac{80Q\eta_c}{\pi r_{\max}^4} \left[r_{\min} + \frac{r_{\max}^2}{r_{\min}} + \frac{r_{\max}^4}{r_{\min}^3} \right] + \frac{8Q\eta_2 L_2}{\pi r_2^4} \right\} \quad (1.7-7)$$

Esta última caída de presión está asociada directamente al desarrollo de la dinámica del flujo extensional dentro de la geometría y en particular al desarrollo de la viscosidad extensional

1.8 MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD EXTENSIONAL EN UNA CONTRACCIÓN HIPERBÓLICA.

El flujo extensional que se desarrolla durante el flujo de un fluido viscoelástico a través de una contracción o una contracción-expansión hiperbólica como la mostrada en la Figura. no.1.8-1 y que a continuación se describe fue propuesto por primera vez por Collyer [15], para esto el autor consideró el uso de las ecuaciones de conservación de la materia o ecuación de continuidad, la ecuación de balance de cantidad de movimiento y la ecuación de conservación de la energía en particular la que está expresada en términos de la entalpía, las cuales pueden encontrarse fácilmente en el libro de Bird [18], todas ellas expresadas en su forma escalar.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\nabla} \rho = -\rho (\underline{\nabla} \cdot \underline{v}) \quad (1.8-1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\nabla} \underline{v} \right) = -\underline{\nabla} P + [\underline{\nabla} \cdot \underline{\tau}] + \rho \underline{g} \quad (1.8-2)$$

$$\left(\frac{\partial \underline{H}}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\nabla} \underline{H} \right) = -(\underline{\nabla} \cdot \underline{q}) + \underline{\tau} : \underline{\nabla} \underline{v} + \left(\frac{\partial P}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\nabla} P \right) \quad (1.8-3)$$

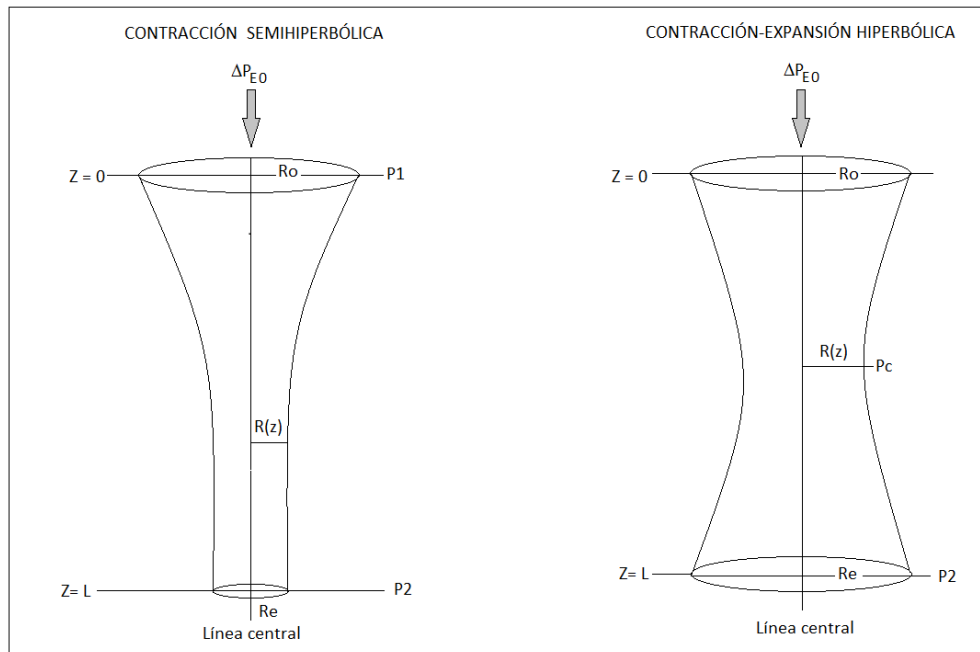


Figura. 1.8-1 Geometrías Semihiperbólica e hiperbólica

Las suposiciones básicas de este análisis y sus consecuencias son las siguientes:

1.- Las condiciones de esfuerzo que experimenta el fluido están determinados por la rapidez de extensión impuestos por la geometría, por ejemplo en un flujo extensional uniaxial solo los componentes correspondientes a la diagonal del tensor de esfuerzos son los que toman valores diferentes de cero, mientras que los componentes de tipo ortogonal o cortantes valen cero, también se asume que los componentes no son una función de la posición y que se debe cumplir la condición de incompresibilidad, por lo que necesariamente $\underline{\nabla} \tau = 0$, es decir:

$$\underline{\dot{\gamma}} = \underline{\nabla} \underline{v} + (\underline{\nabla} \underline{v})^T = \begin{bmatrix} -\varepsilon_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 2\varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \tau_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tau_{zz}}{2} \end{bmatrix} \quad (1.8-4)$$

Estas condiciones ya han sido discutidas en detalle en el capítulo 1.2-2 de este trabajo.

2.- El fluido es incompresible por lo que necesariamente $\underline{\nabla} \cdot \underline{v} = 0$

3.- El sistema opera isotérmicamente por lo que $\underline{\nabla} \cdot \underline{q} = 0$

4.- El flujo de desarrolla en condiciones estacionarias por lo que $\frac{\partial \square}{t} = 0$ siendo $\square =$

Alguna propiedad considerada en las ecuaciones 1.8-1 a 1.8-3.

5.- A pesar de que la geometría favorece el desarrollo de términos inerciales principalmente en la garganta con menos diámetro, estos se consideran despreciables respecto a los efectos de origen viscoso, por lo que $\underline{v} \cdot \underline{\nabla} \underline{v} = 0$.

Por lo que la Ecuación de balance de cantidad de movimiento se reduce a:

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{\tau} = 0 \quad (1.8-5)$$

Y para dar cumplimiento de incompresibilidad en la ec. 1.8-4

$$\tau_{rr} = \tau_{\theta\theta} \quad \text{y} \quad \tau_{rr} = -\frac{\tau_{zz}}{2} \quad (1.8-6)$$

Collyer [15] y Makosco [9] han propuesto que en una contracción hiperbólica el término de disipación elástica a lo largo de la contracción puede escribirse como:

$$\underline{\tau} : \underline{\nabla} \underline{v} = \frac{3}{2} \tau_{zz} \dot{\epsilon} \quad (1.8-7)$$

La Ecuación del balance de energía bajo las suposiciones 1-5 ya explicadas se reduce a:

$$\underline{v} \frac{\partial H}{\partial z} = \underline{\tau} : \underline{\nabla} \underline{v} + \underline{v} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.8-8)$$

Al sustituir 1.8-7 en 1.8-8 se obtiene:

$$\underline{v} \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{3}{2} \tau_{zz} \dot{\epsilon} + \underline{v} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.8-9)$$

En particular el campo de velocidades para un flujo extensional uniaxial, el vector velocidad considerado en la Ec. 1.8-9 está dado por la relación $v_z = -\frac{1}{2} \dot{\epsilon} z$, por lo que la ec. 1.8-9 se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial z} (H - P) = \frac{3}{2} \frac{\tau_{zz}}{z} \quad (1.8-10)$$

Si τ_{zz} es constante a lo largo del desarrollo del flujo extensional dentro de la geometría puede entonces ser evaluado directamente integrando la Ec. 1.8-10, sin embargo, tanto el esfuerzo como la viscosidad extensional que se desarrolla al paso del fluido por la contracción son generalmente dependientes del tiempo, si el tiempo de relajamiento de la solución es suficientemente pequeño puede pensarse probablemente en la presencia de un tiempo de relajamiento constante, en general los esfuerzos extensionales que desarrollan los fluidos viscoelásticos deben considerarse como transitorios dentro de la geometría, por lo que hay que considerar que el esfuerzo extensional en particular τ_{zz} se desarrolla en un intervalo de tiempo $t_0 \leq t \leq t_e$ donde t_0 corresponde al tiempo a la entrada del fluido a la geometría y t_e corresponde al tiempo en el cual le toma al fluido en salir de la misma, es decir a la Ec. 1.8-10 se debe corregir considerando la extensión que va experimentando el fluido en el intervalo de tiempo desde t_0 hasta t_e , es decir ahora

la Ec. 1.8-10 tendrá dos alternativas , cuando τ_{zz} es constante y cuando es dependiente del tiempo

$$\Delta H - \Delta P = \frac{2}{3} \int_{z=z_0}^{z=z_e} \frac{1}{z} \tau_{zz} dz = \frac{1}{3} \dot{\epsilon} \int_{t=0}^{t=t} \tau_{zz} dt \quad (1.8-11)$$

Observar que la extensión que experimenta el elemento del fluido se ha expresado a partir de la llamada extensión de Hencky dada por: $\epsilon_H = \dot{\epsilon}(t_e - t_0)$, por lo que ahora el esfuerzo extensional τ_{zz} en condiciones transitorias podrá expresarse como

$$\tau_{zz} = \frac{2(\Delta H - \Delta P)}{3 \epsilon_H} \quad (1.8-12)$$

$$\epsilon_H = \dot{\epsilon}(t_e - t_0) = \ln\left(\frac{A_0}{A_e}\right) = \ln\left(\frac{R_0^2}{R_e^2}\right) = \ln\left(\frac{Z_e}{Z_0}\right) \quad (1.8-13)$$

La viscosidad extensional en coordenadas cilíndricas está dada por:

$$\eta_E = \frac{\tau_{zz} - \tau_{rr}}{\dot{\epsilon}} \quad (1.8-14)$$

Si se tiene en cuenta la Ec. 1.8-12 y la suposición 5 dada por la Ec. 1.8-6 la viscosidad extensional podrá estimarse como:

$$\eta_E = \frac{\tau_{zz} - \tau_{rr}}{\dot{\epsilon}} = \frac{3\tau_{zz}}{2\dot{\epsilon}} = \frac{\Delta H - \Delta P}{\dot{\epsilon} \epsilon_H} \quad (1.8-15)$$

Si se define una viscosidad extensional efectiva como:

$$\eta_{ef} = + \frac{\Delta P}{\dot{\epsilon} \epsilon_H} \quad (1.8-16)$$

Entonces la viscosidad extensional podrá escribirse como:

$$\eta_E = \eta_{ef} + \frac{\Delta H}{\dot{\epsilon} \epsilon_H} \quad (1.8-17)$$

Resulta importante establecer el significado físico de los dos términos que componen a la expresión de la viscosidad extensional, en primer lugar, el término asociado a la ΔP el cual no debe confundirse con la caída de presión evaluada en las paredes, dado que este análisis ha sido elaborado exclusivamente en el filamento de fluido desarrollado sobre la línea central de la contracción, por lo que no es una caída de presión termodinámica, este término debe entenderse como

aquella ΔP que garantice el desarrollo del campo de flujo dado por las Ecs. 1.2-6 que ha sido impuesto por la geometría hiperbólica, desde luego con precisión esta caída de presión no puede ser evaluada, pero si puede emplearse razonablemente la conocida como caída de presión de entrada que para este tipo de geometría está dada por la Ec. 1.7-7 en la cual se considera en su mayor parte la contribución al desarrollo del flujo extensional.

Por otra parte, el término que contiene el término de la entalpía ΔH , debe entenderse como aquella condición asociada al cambio de fase debida al flujo inducido, que bien podría ser la transformación de fase de un líquido viscoelástico a una condición metaestable de un líquido cristalino o semicristalino, por supuesto en ausencia de este fenómeno el término correspondiente al cambio de entalpía en la Ec. 1.9-17 puede despreciarse.

Evaluación de la rapidez de extensión

La velocidad del fluido a la salida de la contracción puede estimarse como:

$$v_e = \dot{\epsilon}(z_0 + L) = v_0 + \dot{\epsilon}L \quad (1.8-18)$$

Por ecuación de continuidad, la velocidad en la contracción en términos de la extensión de Hencky se puede escribir como:

$$v_e = v_0 \left(\frac{A_0}{A_e} \right) = v_0 \exp \epsilon_H \quad (1.8-19)$$

Sustituyendo Ec. 1.8-19 en 1.8-18 se llega finalmente a:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{L} (\exp \epsilon_H - 1) \quad (1.8-20)$$

Desde luego en esta expresión así como en la Ec.1.8-17 se ha considerado un desarrollo del flujo extensional a lo largo de la línea central impuesto por la contracción y ha sido captado en la evaluación directa de la ΔP hasta donde se desarrolle la extensión de Hencky, si ambas ecuaciones se aplican a un sistema contracción-expansión hiperbólica la extensión de Hencky deberá estimarse como la relación de distancias como se indica en la Ec. 1.8-13.

CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

Descripción del equipo

El equipo utilizado para la fase experimental en este proyecto tiene su origen en dispositivos previos para estudios similares (Pérez, 2016 y Muños 2018) [16]; con las mejoras de diseño y adaptaciones pertinentes para operar con el tipo de contracción hiperbólica y dar la posibilidad de poder utilizar contracciones en otras geometrías a futuro.

Zona de carga y descarga de fluido

Consiste en un sistema de tubos interconectados apoyadas en una estructura metálica de aluminio, con el fin de facilitar el llenado y vaciado del equipo por medio del principio de vasos comunicantes. La ventaja principal de este tipo de configuración es la de minimizar la formación de cámaras de aire que interfieran en las lecturas experimentales.



Zona de carga



Zona de carga

Figura 2.1-1. Zona de carga del fluido en la sección de tubo A y B.

Zona de operación

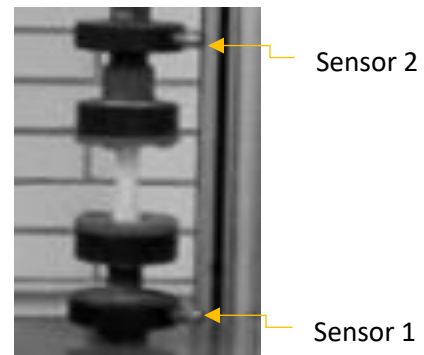
Esta zona, conectada a la carga y descarga del fluido, consta de dos secciones de tubería (PVC 3/4") con el objeto de facilitar el intercambio de las distintas contracciones modeladas, asegurándose por medio de un sello hermético; por lo que, al acoplar una contracción definida, se completa el circuito de flujo. El fluido llena un pistón de 3.2 cm de diámetro como se muestra en la Figura 2.1-2 (a), el cual suministrará el fluido a la zona de contracción durante la fase experimental como se muestra en la Figura 2.1-2 (b) y el cual puede ser intercambiable a un segundo pistón de 2 cm de diámetro, ampliando el intervalo de flujo a estudiar. A una distancia definida antes y después de la contracción acoplada, se encuentran los orificios para insertar los sensores de presión como se muestra en la Figura 2.1-2 (c), los cuales se conectan a la zona de control electrónico.



Zona de cambio de contracción. (a)



Pistón (b)



Sensores (c)

Figura 2.1-2. Zona de contracción (a), Zona de llenado de pistón (b), Zona de acoplamiento de sensores 1 y 2 (c) (Operación)

Control electrónico

Consta de cuatro partes interconectadas: un motor que transmitiendo su movimiento a un par de engranes y estos a su vez a un tubo con cuerda, desplaza el pistón de la zona de operación, el pistón es posible accionarlo desde los controles con los que cuenta el tablero de control del equipo como lo muestra la Figura 2.1-3 (a). La velocidad del pistón, así como la dirección de desplazamiento son establecidas por

un controlador. La segunda parte consiste en el equipo de procesamiento de datos midi logger GL240 de Graphtech como se muestra en la Figura 2.1-3 (b), que permite registrar el voltaje de los sensores. Debido a la disposición vertical del equipo, es necesario desprestigiar los efectos de la gravedad en el flujo, por lo que un compensador de voltaje permite ajustar los sensores a un voltaje nulo, con el fin de registrar una caída de presión asociada únicamente al flujo impuesto en la experimentación. La conversión de voltaje a un valor de presión se da por medio de una calibración previa, obteniendo valores de voltaje correspondientes a la presión ejercida por columna de mercurio; conociendo el valor de la pendiente de la recta presión vs voltaje, se puede obtener un valor de presión para un voltaje determinado y viceversa.



Figura 2.1-3 Sistema de control para operar el equipo; Tablero de control para accionar el pistón (a) y equipo de recopilación de datos (b).

2.2 OPERACIÓN DEL EQUIPO

Llenado del equipo.

Verificación de la calibración de sensores.

Antes de iniciar con el llenado del equipo se verificará que los sensores estén calibrados, estos son enroscados antes y después de la contracción y conectados al equipo de procesamiento de datos midi logger GL240 de Graphtech que recopila los datos a registrar; la verificación de la calibración de los sensores se realizará

haciendo que su señal marque exactamente cero, esta condición indicará que ambos sensores marcan una presión manométrica de cero. Esto es importante que se cumpla ya que de lo contrario no se podrá llenar el pistón ya que afectará los valores a obtener. Antes de comenzar el llenado del equipo y después de verificar la calibración de los sensores se procede a cerrar la válvula que permite el paso del fluido a la zona de descarga, dicha zona se encuentra señalada por la letra (E) así como las demás zonas en la Figura 2.2-1, se deberán retirar los tapones de los tubos (A, B, D y C) y se inspeccionará que el pistón a emplear este completamente abajo. El equipo comenzará a llenarse por la parte superior del tubo (A) una vez el voltaje en ambos sensores marquen cero, y recorrerá el sistema pasando a través de la sección señalada por la letra (F)

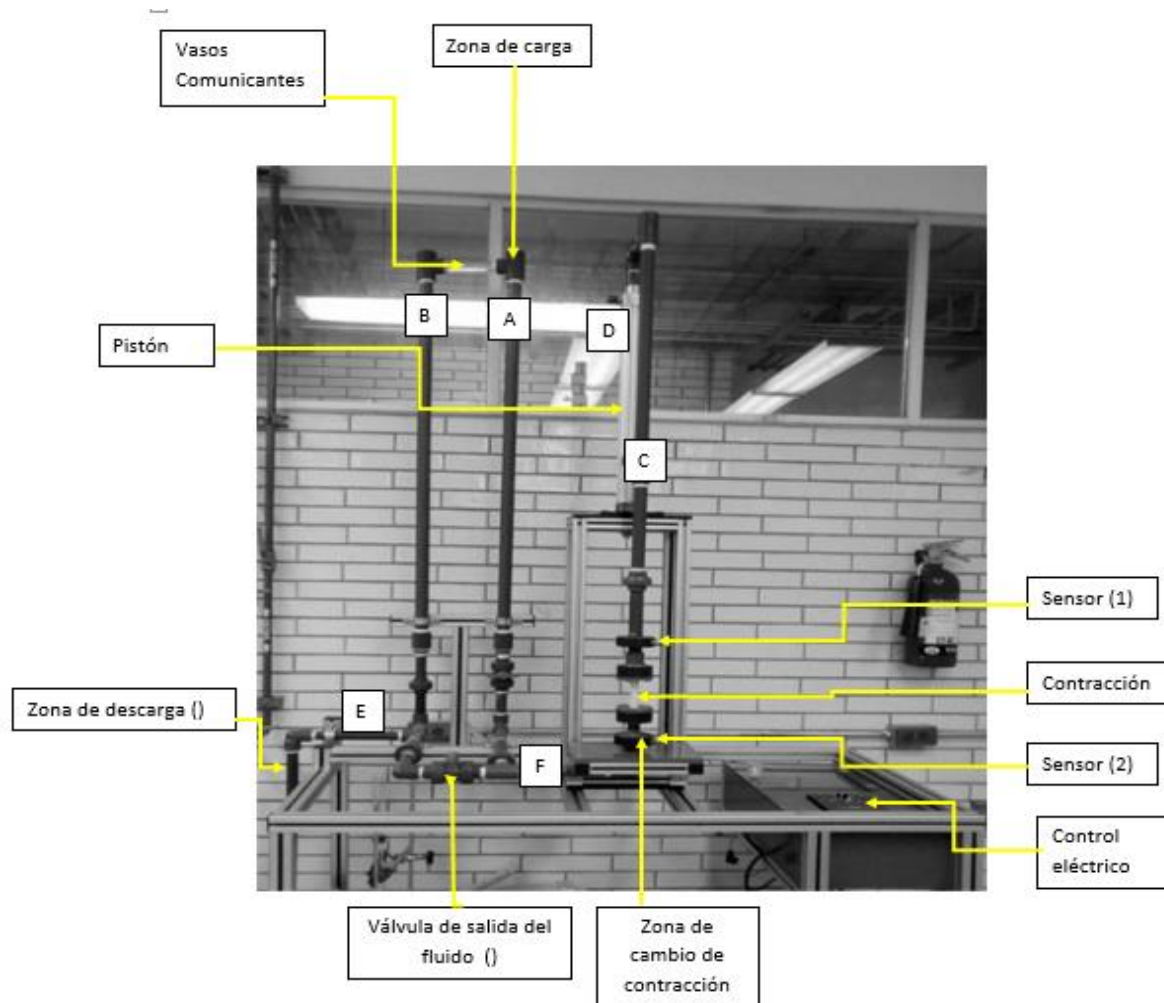


Figura 2.2-1. Descripción del equipo experimental.

entrando por la parte inferior de la contracción; entonces el sensor 2 comenzará a registrar valores de voltaje, mismos que irán creciendo según lo haga la columna del fluido dentro del sistema en la sección del tubo (C), y así el sensor 1 comenzara a registrar valores más bajos que el sensor dos debido a la misma columna de fluido que se forma dentro.

En el momento dado que el fluido ya no pueda pasar a través de la parte superior del tubo (A) y este comience a pasar a través de la sección de acrílico, entonces el sistema se seguirá llenando por la parte superior del tubo (C) de igual forma cuando el fluido ya no entre con facilidad en el tubo (C), se comenzará a llenar la sección de tubo (D) que contiene el pistón. Cuando el fluido se encuentre a tope de cada una de las secciones de tubo (A, B, C y D) entonces se colocan de nuevo los tapones en los mismos y se comienza a operar el equipo.

Se dará un rango de 5 cm de altura a cada cambio de velocidad, iniciando en 30 y terminando en 90 de los valores marcados en el controlador de velocidad y se hará un registro de los datos obtenidos.

Una vez terminado de operar el equipo la descarga del mismo consiste en accionar el pistón para que este suba hasta el límite marcado en la flecha del mismo; seguido de ello se retirarán los tapones de los tubos (A, B, C, D y E) y se abrirá la válvula para dar paso al fluido a través del sistema por la sección de tubo (F) que a su vez permite la circulación del fluido a la sección de tubo (E) misma que da paso al fluido a salir del sistema a un recipiente donde este se recibe.

2.3 GEOMETRÍAS EMPLEADAS

Tabla 1. Dimensiones de las diferentes geometrías (Axisimétrica, cuadrada e hiperbólica)

Geometría axisimétrica						
Relación Contracción/expansión	Diámetro del disco D_o (cm)	Diámetro de la contracción D_c (cm)	Espesor de la contracción L_c (cm)	Relación de Apariencia L_c/R_c	Área de sección transversal [cm²]	Superficie de contacto fluido/pared de contracción [cm²]
2:1:2	4.5	2.25	0.6	0.44	3.976	4.2411
4:1:4	4.5	1.125	0.6	0.88	0.994	2.1205
Geometría Cuadrada						
2:1:2	4.5	2.25	0.6	0.2222	5.0625	5.4
4:1:4	4.5	1.175	0.6	0.4255	1.2656	4.7
Geometría Hiperbólica						
Relación contracción/Expansión	Diámetro de la contracción D_o (cm)	Diámetro de la contracción D_c (cm)	Espesor de la contracción L_c (cm)	Relación de Apariencia L_c/R_c	Área de sección transversal [cm²]	Superficie de contacto fluido/pared de contracción [cm²]
2:1:2	2	1	15	1.38629	4.639	4.87
4:1:4	2	0.5	7.5	2.77259	1.587	3.69

La contracción que se va a analizar será la que se caracteriza por ser de una geometría hiperbólica de características axisimétrica, a diferencia de las dos geometrías cuadrada y cilíndrica, la geometría hiperbólica no cuenta con un diámetro definido si no que este va de un Diámetro máximo fijo y disminuye progresivamente hasta un diámetro mínimo el cual es 2 o 4 veces menor que el diámetro máximo según la relación de contracción empleada 2:1:2 o 4:1:4

respectivamente y se vuelve a un diámetro máximo posterior a la contracción dando así a la contracción su geometría y la características axisimétricas como se muestra en la Figura 2.3-1.

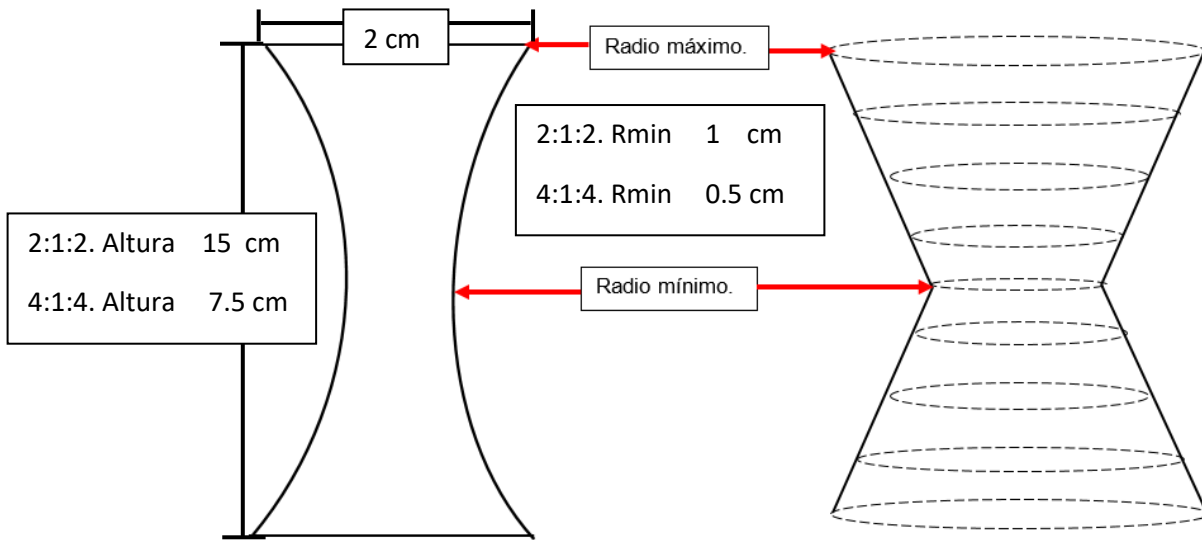


Figura 2.3-1. Estructura de la geometría hiperbólica a analizar.

3 CAPITULO 3 DESCRIPCIÓN DE FLUIDO.

3.1 Polímero asociativo (HASE)

Los polímeros asociativos son una clase de macromoléculas con grupos atractivos o adhesivos adheridos a los extremos (sistema telequérico) o distribuidos a lo largo del esqueleto (sistema peinado). Esta clase incluye polímeros cargados (ionómeros, polielectrolitos y poliamifolitos) en disolventes fuertemente selectivos y polímeros con enlaces de hidrógeno.

Estos polímeros asociativos generalmente contienen una cadena principal hidrofílica soluble en agua y grupos hidrófobos insolubles ubicados en los extremos de la cadena de polímero o distribuidos a lo largo del polímero.

El polímero HASE consiste en una columna vertebral con una cadena hidrofílica de ácido metacrílico soluble en agua, unida por un extremo a una molécula de acrilato de etilo mientras que por el otro lado se encuentra una molécula con grupos hidrofóbicos insolubles en agua como se muestra en la Figura 3.1-1.

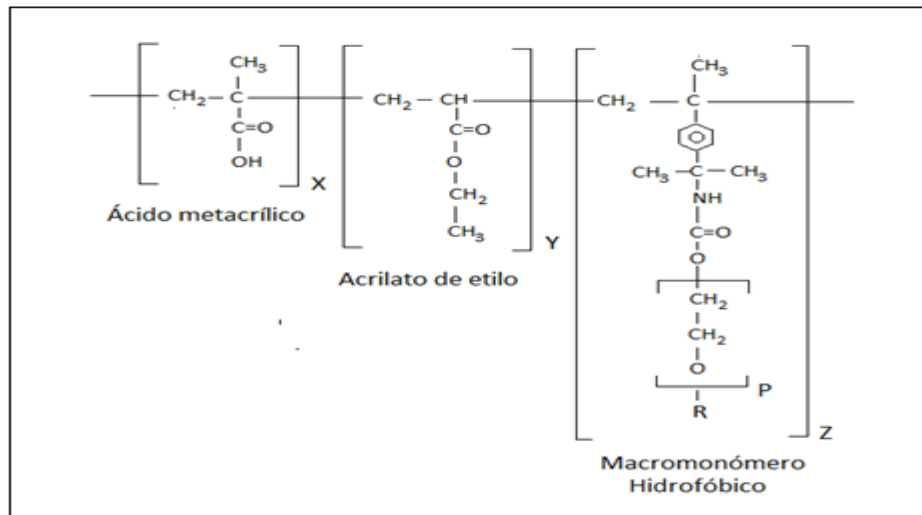


Figura 3.1-1 Estructura química del polímero asociativo empleado.

Las propiedades reológicas de los polímeros asociativos solubles en agua dependen de factores tales como las concentraciones de polímeros, el peso molecular, el grado de modificación hidrofóbica, las características de los grupos hidrofóbicos y la flexibilidad del esqueleto del polímero. Tras el estudio exhaustivo realizado por Jenkins [2], han aparecido una gran cantidad de publicaciones sobre polímeros asociativos no iónicos, particularmente los sistemas bien definidos de óxido de etileno y uretano modificados hidrofóbicamente (HEUR). Sin embargo, solo se han informado pocos estudios sobre polímeros asociativos aniónicos como los sistemas asociativos solubles en álcali hidrofóbicamente modificados (HASE).

Tras la neutralización del polímero elevando su PH usando una base (La base utilizada en el presente trabajo de investigación es AMP (2 amino-2metil-1 propanol)), el polímero sufre una expansión del conglomerado de moléculas ya formadas debido a la repulsión electrostática de las cargas negativas en la cadena principal del mismo, volviéndose soluble en agua y sus grupos hidrofobos se asocian con los de otras cadenas de polímeros para formar uniones intermoleculares, estas uniones producen una red de polímeros que mejora la viscosidad de la solución. Las concentraciones de cargas a lo largo de la columna

vertebral y la fuerza iónica de las soluciones alteran significativamente el comportamiento reológico.

Interacciones moleculares.

El polímero asociativo HASE tiende a formar micelas, las cuales se mencionan para poder comprender si las formaciones de estas alteran de alguna manera el comportamiento reológico del polímero. Walker y sus colaboradores y Prud'homme y Warr [1] han investigado las propiedades de las micelas de gusano sometidas a flujo extensional. Los autores anteriores examinaron la respuesta macroscópica de las micelas parecidas a gusanos sometidas a un campo de flujo elongacional concluyeron a partir del análisis de escala, que el engrosamiento extensional observado en la región de solución semi-diluida no fue causado por el crecimiento micelar. Sin embargo, Prud'homme [1] (H.Tan, 1999) y sus colegas concluyeron de sus estudios, que el aumento de la viscosidad extensional es el resultado de una fuerte alineación de las micelas en la dirección del flujo.

Debido a la naturaleza de estas moléculas, propiedades como la viscosidad varían significativamente según la concentración del polímero, pues a valores de rapidez de corte bajos la viscosidad se mantiene constante, pero una vez se aumenta la rapidez de corte la viscosidad del fluido comenzara a disminuir, identificando al mismo como un fluido adelgazante. Para un polímero soluble en álcali modificados hidrofóbicamente, las propiedades extensionales están correlacionadas con las concentraciones de polímero y la resistencia de la unión de red. Las interacciones que se pueden dar dentro de la red que se ha formado por dicho polímero asociativo son; como se muestra en la Figura 3.1-2 debido a componentes hidrófobos los cuales pueden interactuar con hidrófobos de la misma cadena polimérica (**asociación intramolecular**) o con hidrófobos de diferentes cadenas poliméricas (**asociación intermolecular**) para producir grupos que consisten en varias cadenas poliméricas.

Estos grupos están conectados a otro caché a través de las uniones asociativas para producir una red de polímeros. En sistemas con grupos hidrófobos más fuertes, las uniones son más fuertes y la red es más resistente a la deformación.

La fuerza general de la red depende en gran medida de las uniones activas formadas por asociaciones intermoleculares.

Debido a estas interacciones una hipótesis descrita por Seng W.P., Tam K.C., Jenkins R.D y Bassett R.D [1] que explica el comportamiento del fluido adelgazante consiste en que durante el corte se presenta un reacomodo de dichas moléculas que forman la cadena del polímero empleado en dirección del flujo, dichas cadenas comienzan con una interacción molecular del tipo hidrofóbica intramolecular pasando a estructuras de orden intermolecular debido a la extensión del fluido.

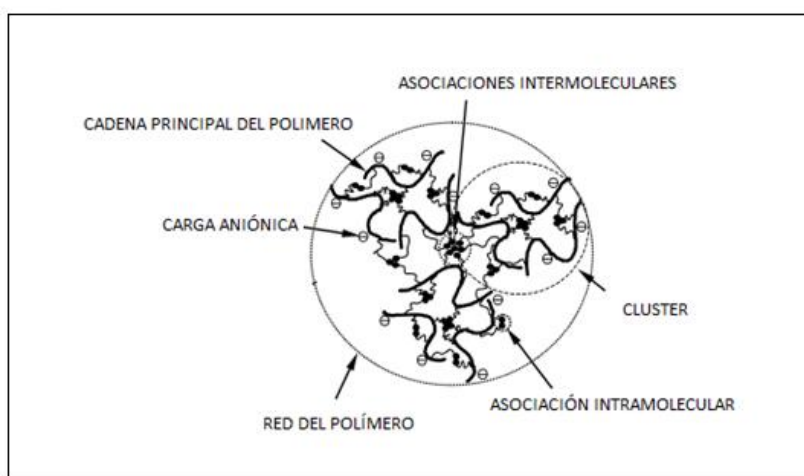


Figura 3.1-2 Tipos de asociación molecular del fluido HASE.

3.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

Para la preparación de este fluido se utilizó 500 ml de una solución 0.1 M de agente neutralizante y 2-amino-2-metil-1-propanol, dejándose reposar a temperatura ambiente durante 24 horas.

Se prepararon 10 litros de solución de Hase al 2.5%, para cubrir todas las corridas experimentales, para ello se empleó Acrisol TT-935, correspondiente a una suspensión de Hase disuelta en agua al 30% en peso, adicionando lentamente 833.33 ml de suspensión a 9.166 litros de agua destilada, la cual recibió agitación mecánica por 30 minutos para posteriormente dejar en reposo por 72 horas.

Debido a las variaciones de la viscosidad de este fluido, para garantizar un valor fijo, se dejó reposar por 2 semanas, después de las cuales, se procedió a su almacenamiento en recipientes sellados.

3.3 REOLOGÍA CORTANTE DE LA SOLUCIÓN EMPLEADA.

Para conocer la relación entre la rapidez de corte y la viscosidad, se empleó la ecuación constitutiva del modelo BMP Pérez Mariano [17].

Las Figuras 3.3-1 y 3.1-2 muestran la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido empleado a estudio, HASE obteniendo parámetros como viscosidad cortante y la elasticidad del fluido.

El comportamiento en la Figura 3.3-2 de la solución HASE, presenta una viscosidad de corte constante hasta un valor de 15 Pa s y 1.25 s^{-1} rapidez de corte, a partir del mismo comienza a disminuir la viscosidad cortante; aunado a ello y siguiendo con la observación de la Figura 3.1-2, a valores de 1.58 s^{-1} y una viscosidad de 10.8 Pa s el fluido comienza a presentar adelgazamiento progresivo de la viscosidad hasta un valor de 2.7 Pa s y la presencia de los efectos elásticos a un valor de 2.17 Pa s de viscosidad y 1.25 s^{-1} de rapidez de corte; esto significa que el fluido comienza a presentar elasticidad a valores pequeños de rapidez de corte pues los efectos de la viscosidad cortante fueron superados por la primer diferencia de esfuerzos normales.

El fluido alcanza valores altos de (N1) esfuerzos normales a pesar de que los valores de viscosidad disminuyen a un valor de casi 1 Pa s a una rapidez de corte de 405 s^{-1} , mostrando así el adelgazamiento del fluido, por lo tanto, la viscosidad cortante sigue disminuyendo, pues esta disminuye a mayor rapidez de corte con un valor de 200 s^{-1} y una viscosidad de 1.1 Pa s.

Los tiempos de relajamiento del fluido Hase fueron determinados mediante el modelo Bautista-Manero-Puig, procedimientos que se describe a detalle en los trabajos previos realizados por Mariano Pérez [16].

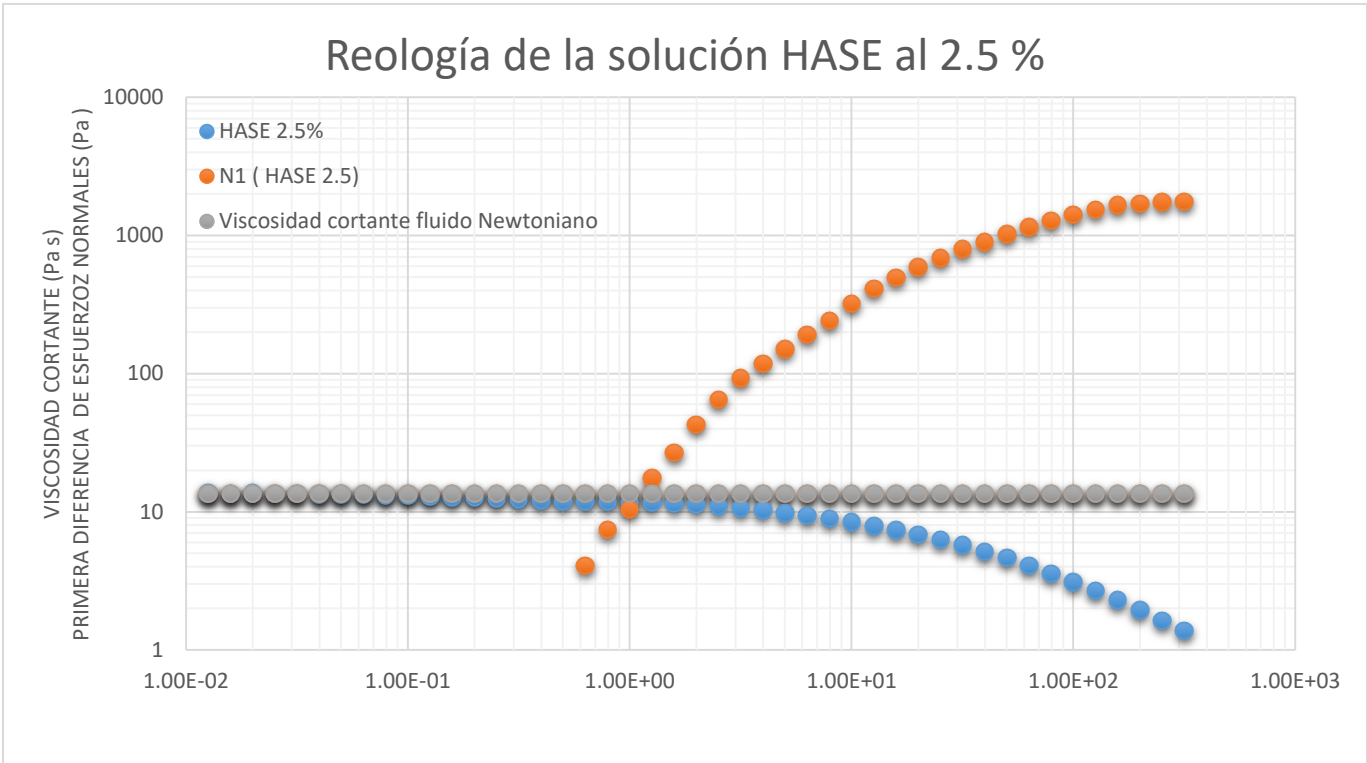


Figura 3.3-1. Reología de la solución HASE, que indica los intervalos de rapidez de corte evaluados, mostrando la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido empleado a estudio HASE, obteniendo parámetros como viscosidad y la elasticidad del fluido. Pérez Mariano [17]

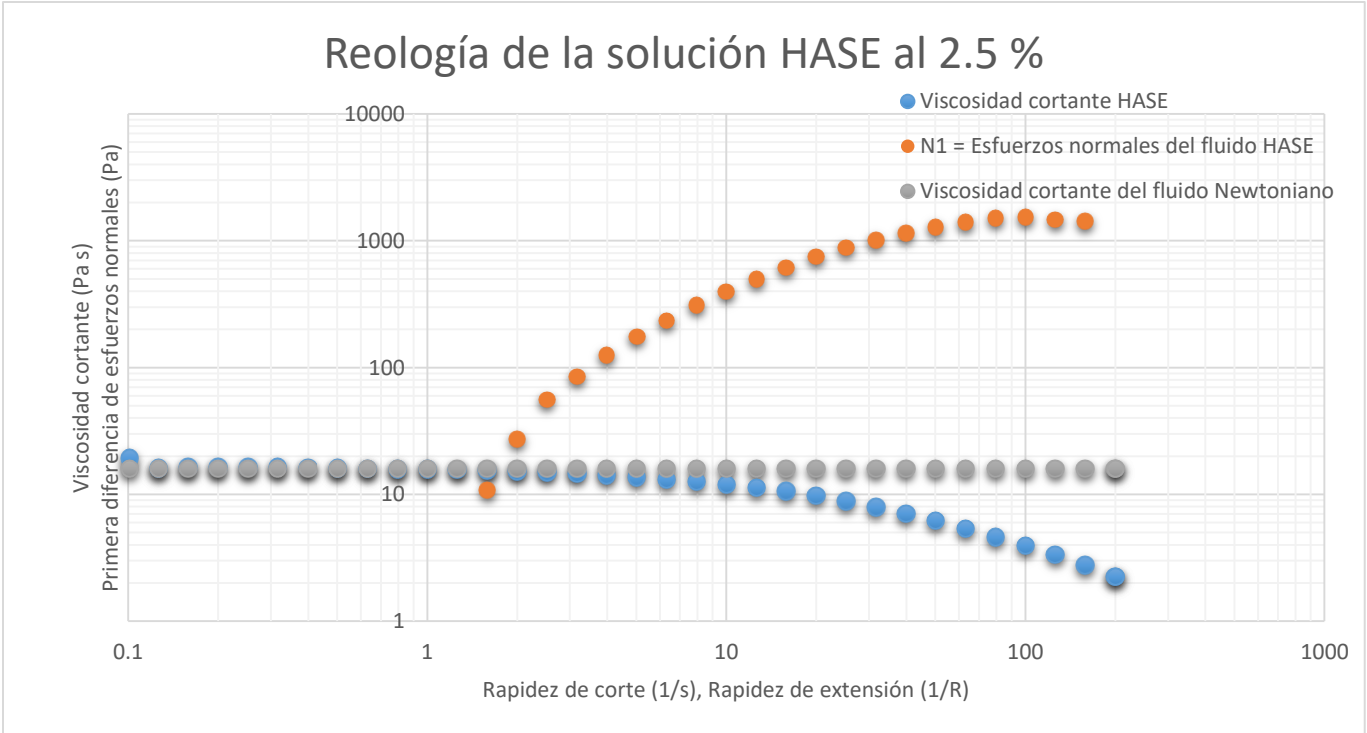


Figura 3.3-2. Reología de la solución HASE, que indica los intervalos de rapidez de corte evaluados, mostrando la relación entre el esfuerzo y la deformación del fluido empleado a estudio HASE, obteniendo parámetros como viscosidad y la elasticidad del fluido.

CAPITULO 4, RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Calibración de los sensores.

La calibración de los sensores se realizó utilizando un equipo que fue utilizado en los trabajos anteriores realizados por Pérez 2016 y Muñoz 2018, dicho dispositivo se muestra en la Figura 4.1-1.

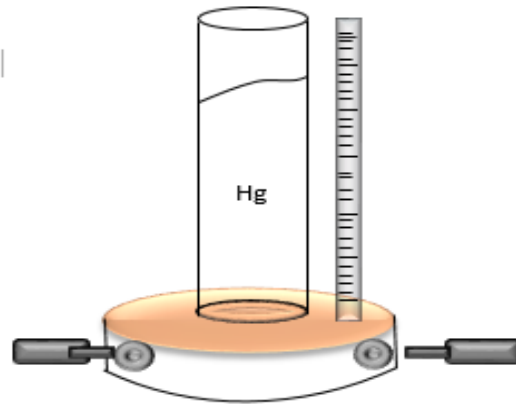


Figura 4.1-1 Equipo empleado para la calibración de sensores.

La calibración de los sensores consiste en un tubo de vidrio de 1 cm de diámetro y 40 cm de longitud, en su parte lateral se ha colocado una regla milimétrica, colocados ambos sobre una base que es utilizada como soporte, en el cual pueden enroscarse ambos sensores como lo muestra la Figura 4.1-1.

La calibración se inicia agregando mercurio con una jeringa, poco a poco hasta alcanzar una altura medible en la regleta, con el fin de que dentro de la misma el mercurio ejerza una presión hidrostática dada por la siguiente relación.

$$P = \rho gh \quad (4.1)$$

La relación (3.1) será directamente proporcional al voltaje producido por cada uno de los dos sensores, la pendiente de la línea de voltaje contra presión aplicada dará la calibración del sensor.

Tabla 2 Calibración de sensores.

Altura (cm)	Altura (m)	Presion[Pa]	Voltaje (sensor 1)[v]	Voltaje (sensor 2)[v]
0	0	0	0.0055	0.0098
3	0.03	4002.48	0.341	0.356
4	0.04	5336.64	0.458	0.473
6	0.06	8004.96	0.681	0.696
7	0.07	9339.12	0.805	0.82
8	0.08	10673.28	0.901	0.915
9	0.09	12007.44	1.023	1.04
10	0.1	13341.6	1.128	1.143
11	0.11	14675.76	1.239	1.253
12	0.12	16009.92	1.344	1.358
13	0.13	17344.08	1.473	1.487
14	0.14	18678.24	1.583	1.598

La tabla anterior muestra los resultados obtenidos comprobando así, que los mismos se mantuvieron constantes y por ende ambos sensores están calibrados, así como lo muestra el Grafico 3.1-1 con las siguientes ecuaciones de ajuste:

$$\text{Sensor 1 } P_1 = 11874 E_1 = PA$$

$$\text{Sensor 2 } P_2 = 11833 E_2 = PA$$

Donde:

P_1 = Presión del sensor 1

P_2 = Presión del sensor 2

E_1 y E_2 = Volts

PA= Caída de presión en pascales.

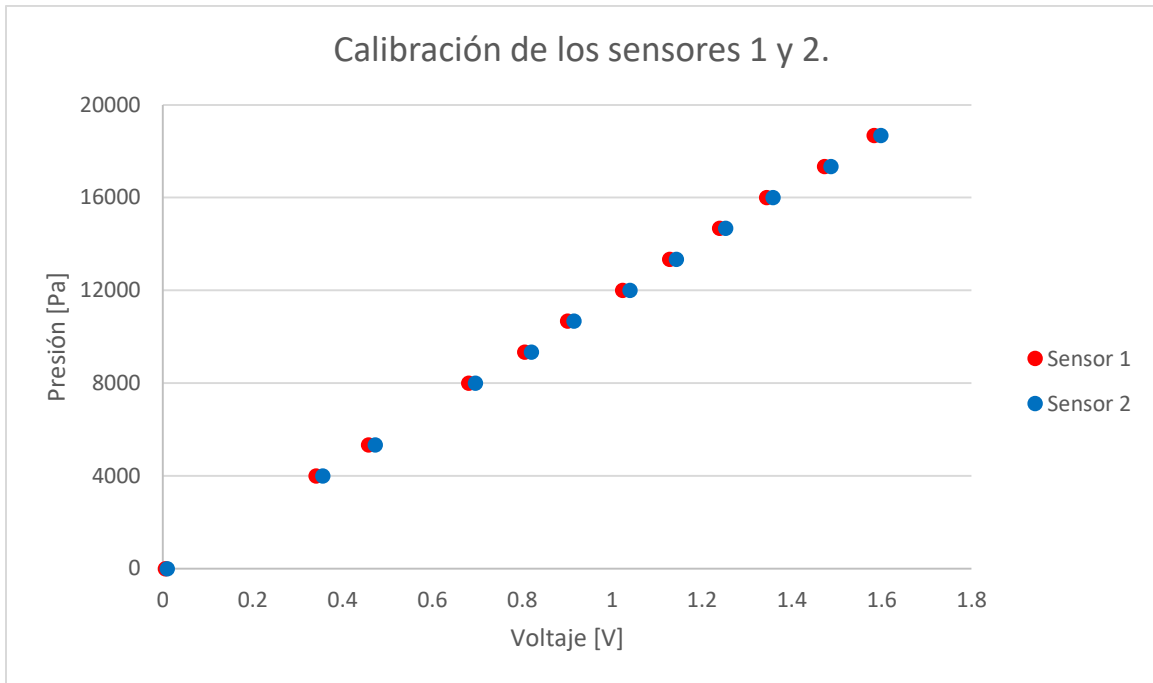


Gráfico 4.1-1 Tendencia de los resultados de la calibración de los sensores 1 y 2.

Tabla 3 Resultados obtenidos de caída de presión dentro de las contracciones

CAÍDA DE PRESIÓN TOTAL				CAÍDA DE PRESIÓN EN EXCESO.			
Relación de contracción	Contracción CUADRADA [Pa]	Contracción AXISIMETRICA [Pa]	Contracción HIPERBÓLICA [KPa]	Contracción CUADRADA [Pa]	Contracción AXISIMETRICA [Pa]	Contracción HIPERBÓLICA [KPa]	
2:1:2	ΔP MAX	5.045	4.29715	938538.818	1.57723	2.017	3.77750
	ΔP MIN	187.975	90.09435	1206330.06	0.99550	1.612	1.61880
4:1:4	ΔP MAX	11.88880	16.713	5143533.31	1.16378	0.80017	5.83530
	ΔP MIN	268.72705	306.287	18099099.5	0.62451	0.56570	0.51721

CAPITULO 5 ANÁLISIS DE REULTADOS:

CONTRACCIÓN AXISIMÉTRICA

El objetivo principal del presente trabajo es, analizar la dinámica de flujo de un fluido viscoelástico y un fluido Newtoniano, comparando los resultados entre 3 geometrías de contracción; cuadrada, axisimétrica e hiperbólica.

Dentro de este estudio, se contemplan parámetros reológicos que ayudan a comprender la dinámica del fluido Newtoniano y el polímero asociativo empleados en este trabajo como son; la caída de presión total, la caída de presión en exceso, la caída de presión en exceso normalizada, la viscosidad cortante, y la viscosidad extensional contemplando como afecta en cada uno de ellos el adelgazamiento de fluido, la elasticidad del fluido y las características viscosas y viscoelásticas de cada uno, con el fin de poder vislumbrar el dominio de flujo dentro del sistema.

Como se mencionó en el capítulo uno, al paso de un fluido dentro de una contracción, se genera un flujo mixto, la pureza de cada uno de los diferentes tipos de flujos dependerá de la magnitud con que se presenten los parámetros reológicos antes mencionados, como consecuencia de la configuración de la contracción empleada, la composición y concentración del fluido viscoelástico y Newtoniano.

La caída de presión total es evaluada contra la rapidez de corte con el fin de comprender la influencia que tienen las propiedades viscosas y viscoelásticas de ambos flujos empleados, esta caída de presión total se entiende como un mecanismo de liberación de energía, misma que para un fluido viscoelástico surge de una tensión disipativa que elimina la energía del flujo, así los esfuerzos de este efecto disipativo serán reflejados en observaciones macroscópicas de cantidades dinámicas tales como caídas de presión; para un fluido Newtoniano la caída de presión se da de la misma forma que para el fluido viscoelástico, pues muestra un mecanismo de liberación de energía, a diferencia de este la caída de presión del fluido Newtoniano se da exclusivamente por efectos viscosos.

Se graficó la caída de presión en exceso contra la rapidez de corte, mostrando el efecto de la geometría en el desarrollo del flujo extensional; dicha caída de presión surge de los efectos viscoelástico. Como se mencionó en la sección 1.4 una caída de presión adimensional se da debido a la dificultad del fluido al pasar a través de una contracción pues el fluido no es capaz de entrar completamente en ella, dicho parámetro denota la presencia de un flujo extensional.

La caída de presión extra normalizada es aquella que proporciona un cociente entre la caída de presión en exceso del fluido viscoelástico y el fluido Newtoniano.

Para poder comprender cuál es el dominio de flujo que se está presentando en el sistema, ya sea cortante o extensional, se toma en cuenta la caída de presión en exceso que cada uno de los fluidos alcanza, con dichos valores obtenidos se hace una relación para poder con ello obtener la caída de presión normalizada y graficarla contra rapidez de corte, dicha relación nos ayudará a comprender, que si la trayectoria de la caída de presión del fluido viscoelástico se acerca a la trayectoria del fluido Newtoniano o de referencia, este estará teniendo características cortantes y/o extensionales si sucediera lo contrario. El fluido Newtoniano al no presentar elasticidad y por ende no desarrollar esfuerzos normales, representa el grado de dificultad que tiene el fluido al pasar a través de la contracción y con ello el dominio del flujo cortante sobre el sistema.

$$\Delta P_{Adimensional} = \frac{\Delta P \text{ Fluido no Newtoniano}}{\Delta P \text{ del fluido Newtoniano}}$$

Esta relación proporciona un cociente que da como referencia un punto de comparación entre la caída de presión asociada al desarrollo de un flujo extensional o un flujo de características cortantes; si la caída de presión en exceso del fluido viscoelástico es mayor que la del fluido Newtoniano, entonces el dominio de flujo será del desarrollo del flujo extensional y viceversa si sucediera lo mismo con el fluido Newtoniano entonces el dominio del flujo será cortante. La viscosidad extensional contra rapidez de corte es evaluada comparando la misma contra la viscosidad cortante del fluido viscoelástico ya que uno de los objetivos que se persigue en este trabajo es seguir el desarrollo del flujo extensional ya

sea homogéneo o no homogéneo a través de esta y cómo influye en ella el adelgazamiento y elasticidad del fluido.

Caída de presión Total vs Rapidez de corte
Contracción/Expansión 2:1:2
Axisimétrica

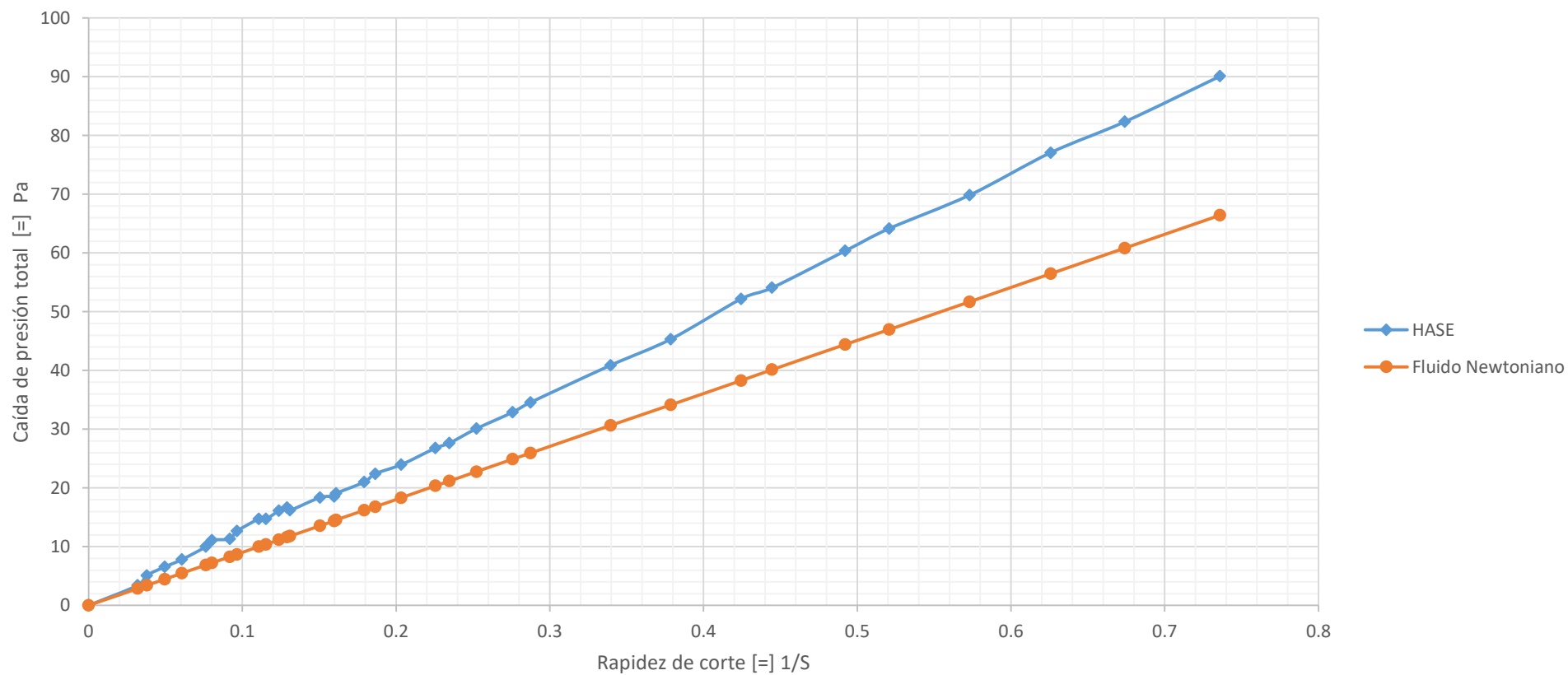


Figura 5.1-1 Caída de presión Total vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2)

Esta curva denota las diferencias entre la inherente manifestación de propiedades elásticas y viscosas que presentan los fluidos viscoelásticos al transitar a través del sistema de contracción.

A valores pequeños de rapidez de corte ambos fluidos se comportan de acuerdo a la ley de viscosidad de Newton para fluidos newtonianos, pues el esfuerzo cortante aplicado al fluido está relacionado linealmente con la deformación, sin embargo el fluido HASE comienza a alejarse y a tener una tendencia por encima de la línea del fluido Newtoniano, a pesar de que ambos son sometidos a las mismas condiciones y la misma viscosidad, esto se da ya que la caída de presión del fluido Newtoniano es solamente por efectos viscosos, mientras que el fluido HASE a los valores de rapidez de corte en la gráfica, si bien no presenta elasticidad la influencia de la misma si comienza a manifestarse en mínima proporción como se muestra en la reología del fluido en la figura 3.1-1, en consecuencia la razón por la cual la caída de presión del fluido HASE está por encima de la del fluido Newtoniano es debido a las características viscoelásticas que se desarrollan a medida que aumenta la rapidez de corte en el sistema de contracción.

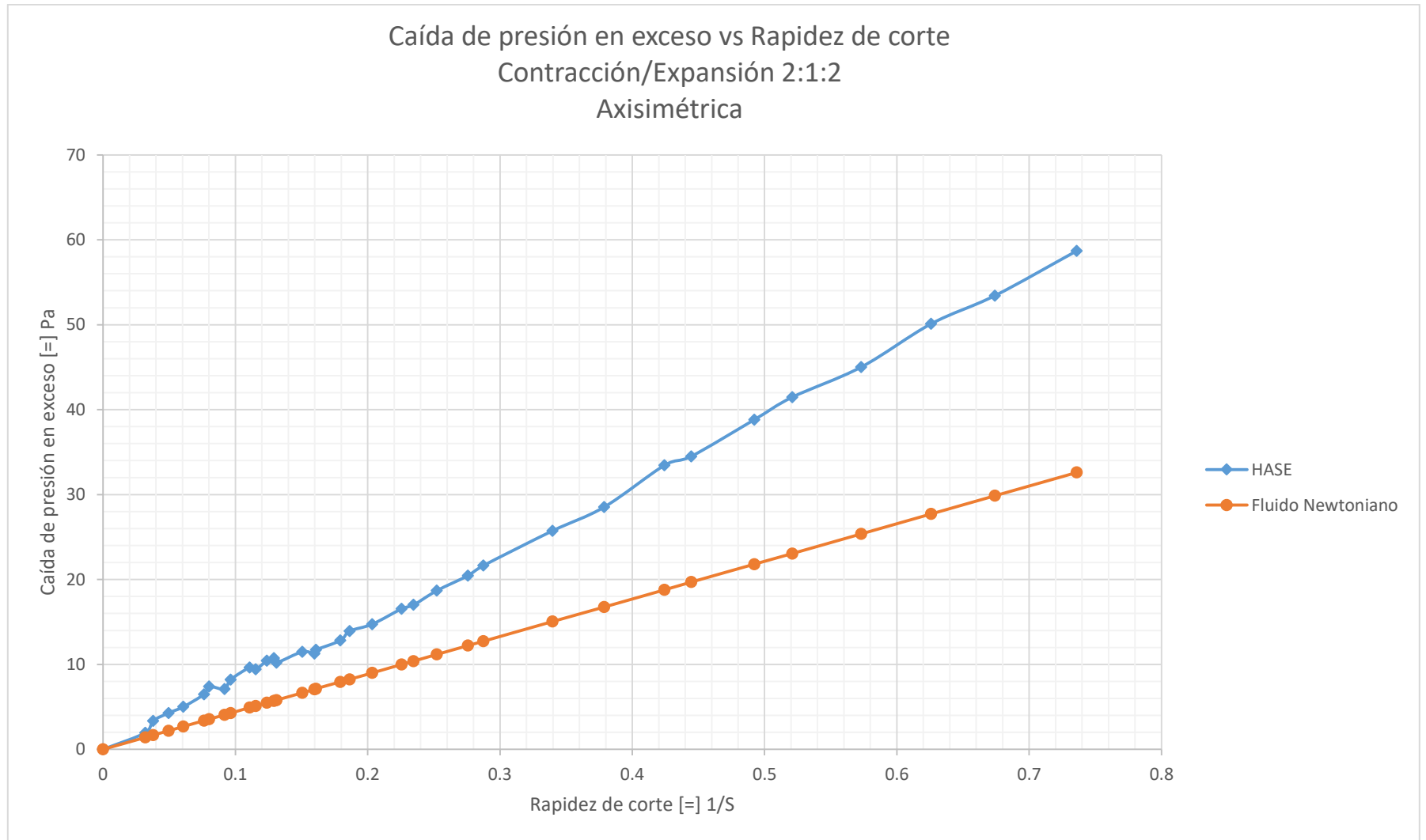


Figura 5.1-2 Caída de presión en exceso vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2) .

Este gráfico permite apreciar el desarrollo del flujo extensional sobre el sistema, siguiendo la línea de tendencia del fluido viscoelástico con respecto al desarrollo del flujo cortante que se desarrolla en la línea de tendencia del fluido Newtoniano ya que, para este flujo la caída de presión en exceso se refleja como la dificultad que presenta el fluido al ingresar en la contracción, más puesto que el fluido es Newtoniano y no presenta el desarrollo de flujo extensional, la dificultad que presente a la entrada de la contracción es proporcional al desarrollo del flujo cortante.

Al inicio de la experimentación el comportamiento de fluido Hase, al aumentar la rapidez de corte, la tendencia de la línea del fluido viscoelástico comienza a ascender, como consecuencia de dicho reacomodo de las líneas de corriente y debido a las características viscoelásticas del fluido, representando así la caída de presión en exceso para dicho fluido la tensión que sufre el fluido para poder ingresar en la contracción.

Tomando en cuenta que la caída de presión en exceso no tiene relación con los efectos viscosos, se asume que una de las razones por la cual la tendencia de la línea va en ascenso es debido a la presencia del desarrollo del flujo extensional en el sistema, alcanzando un punto máximo a un valor de caída de presión de 60 Pa a pequeños valores de rapidez de corte, por ende se considera a la contracción axisimétrica 2:1:2 figura 5.1-2 como aquella contracción que favorece el desarrollo del flujo extensional aun a valores bajos de rapidez de corte.

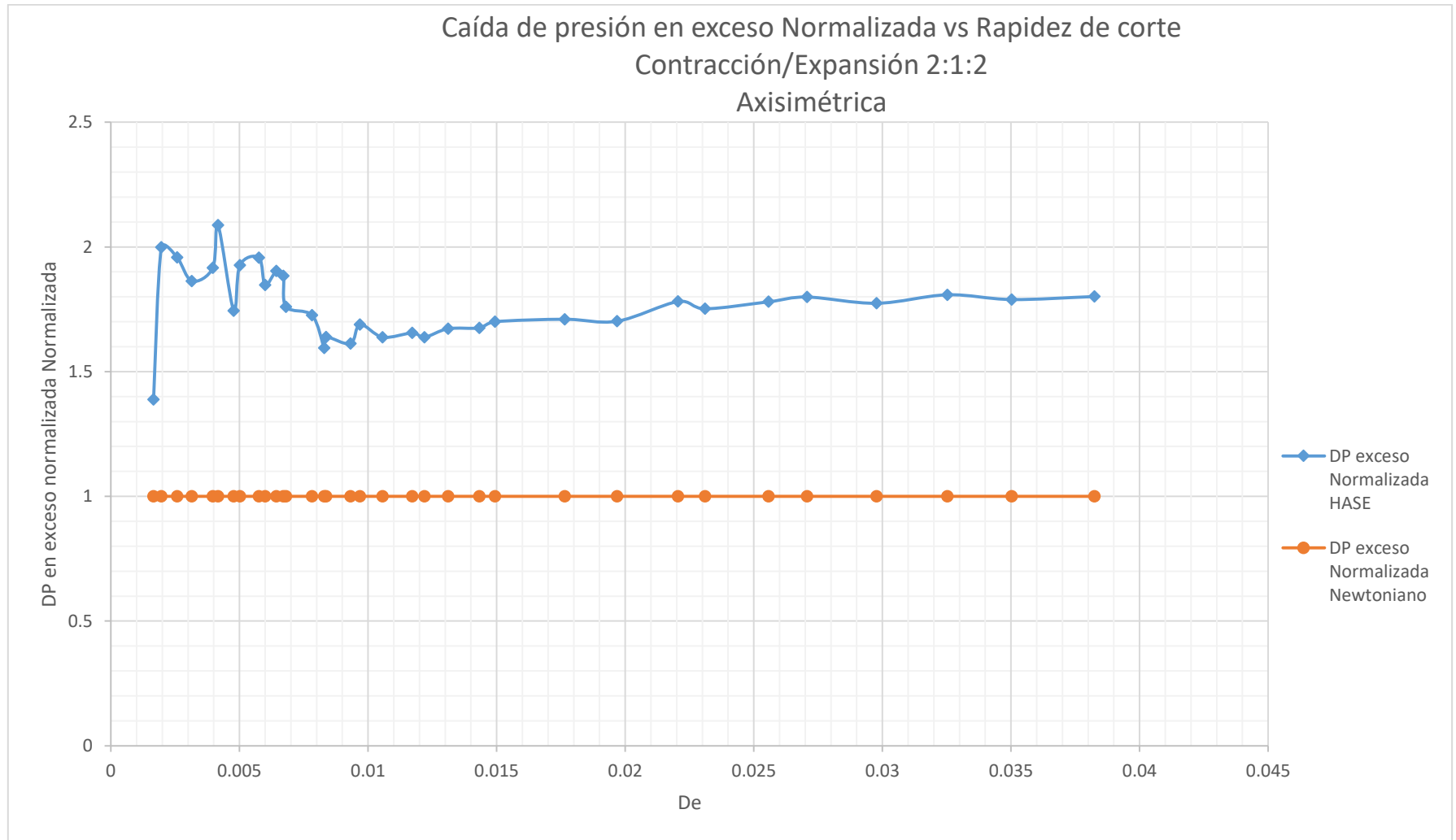


Figura 5.1-3 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2)

La presente gráfica denota la competencia del dominio del tipo de flujo desarrollado en el sistema. Como se mencionó anteriormente en la sección 3.1 el fluido empleado, mismo que se describe como un polímero asociativo está compuesto por macromoléculas micelares las cuales al entrar en la contracción forman una fuerte alineación hacia la misma, provocando que dichas micelas comiencen a tener fuertes asociaciones intramoleculares entre ellas y en caso contrario intermoleculares, dichas interacciones se presentan ya que cada micela está compuesta por componentes hidrófobo (interacciones intramoleculares componente hidrófobo con componente hidrófobo) y un componente hidrofílico (interacción intermolecular componente hidrofílico con componente hidrofílico); sin embargo a continuación se describe como el tipo de interacción afecta a los parámetros reológicos tratados en el presente estudio.

Al inicio de la línea de tendencia del fluido viscoelástico, se observa el desarrollo del flujo extensional alcanzando un punto máximo a un valor de caída de presión en exceso normalizada de 2.2, como consecuencia de la dificultad que presenta el fluido a la entrada de la contracción a bajos valores de rapidez de corte.

Observando la trayectoria de la línea a partir del punto 2.2 de caída de presión extra normalizada, la tendencia de la línea va en descenso en un intervalo de 0 a 0.0056 debido a la influencia del adelgazamiento del fluido por efecto de las interacciones intermoleculares que componen la red principal del polímero viscoelástico y la influencia del desarrollo del flujo cortante dentro de la contracción, crea la competencia entre ambos flujos, debido a que, a mayor valor de De el adelgazamiento del fluido y el desarrollo del flujo cortante dentro de la contracción crea este punto mínimo de 0.008 De ; las interacciones intramoleculares se presentan debido a la interacción de componentes hidrofílicos, las cuales permiten al fluido deformarse fácilmente, sin embargo en dicho punto es donde el desarrollo del flujo cortante termina y a partir este se comienza a desarrollar el flujo extensional por efectos de tensión del fluido y efectos elásticos que sufre el fluido al entrar en la contracción; estructuralmente el fluido al ser un polímero asociativo como se mencionó anteriormente, a mayor

de número de De, este comienza a desarrollar interacciones intramoleculares, dichas interacciones son tan fuertes que evitan que el fluido fluya con facilidad a través del sistema, favoreciendo con ello la presencia del flujo extensional.

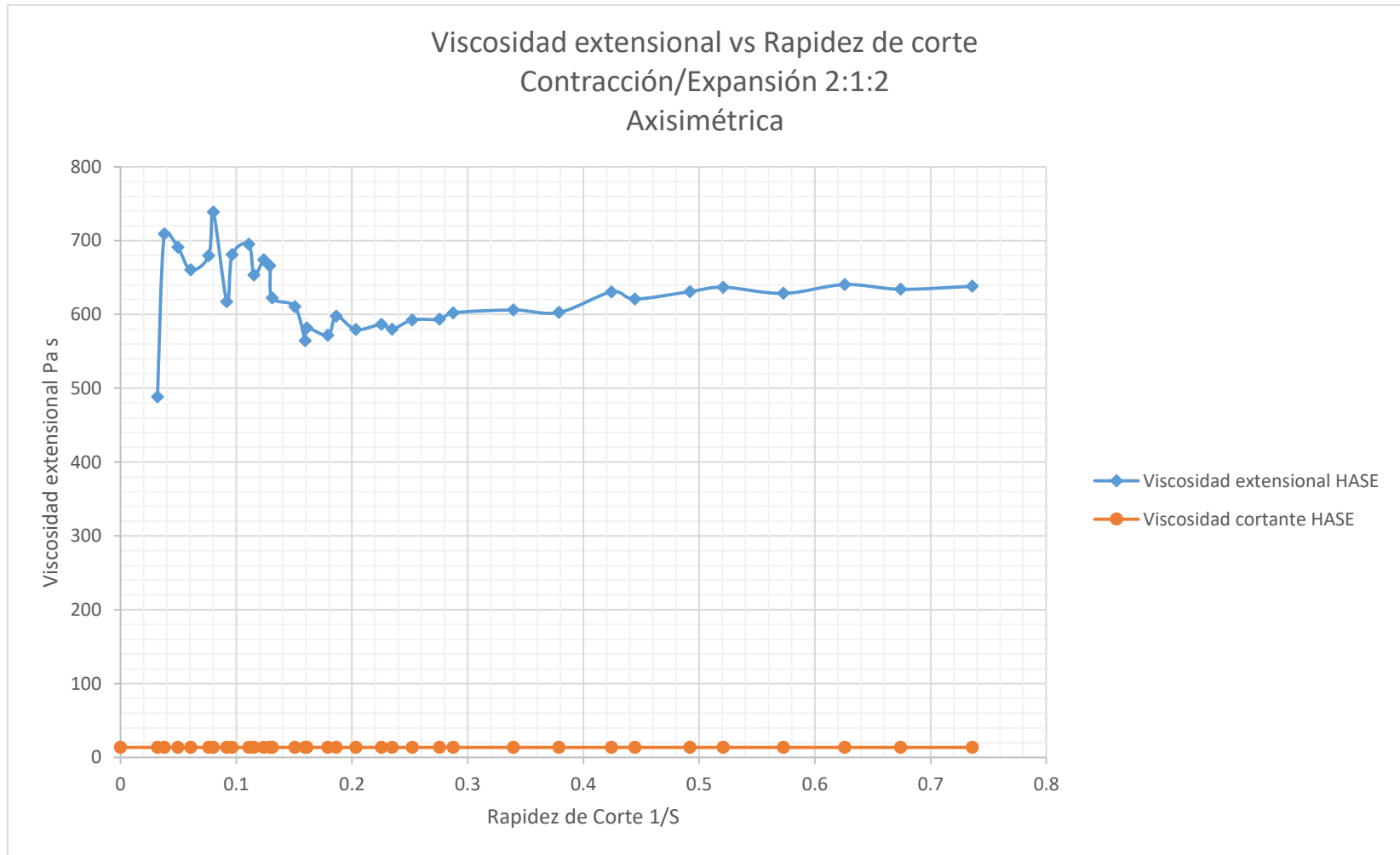


Figura 5.1-4 Viscosidad extensional vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 2:1:2).

La presente gráfica demuestra como varía la viscosidad en la línea central del desarrollo del flujo extensional.

Con estos gráficos se pretende alcanzar el objetivo del presente trabajo, el cual consta de seguir de una manera indirecta el crecimiento de la viscosidad extensional, ya que este dará al flujo las características que distinguirán cuál es su comportamiento dentro del sistema.

Como es posible observar la figura 5.1-4, revela el comportamiento de la viscosidad extensional del fluido viscoelástico y la viscosidad cortante del mismo; se ha desarrollado la comparación de esta forma, ya que la viscosidad cortante del fluido será utilizada con el fin de comprender que viscosidad es la que se está desarrollando con mayor intensidad dentro del sistema.

Observando la tendencia de la línea, esta inicia con una viscosidad extensional grande alcanzando valores de 704 Pa s a valores bajos de rapidez de corte, sin embargo la tendencia de la línea va en descenso debido a la influencia del adelgazamiento del fluido posterior a la entrada de la contracción hasta alcanzar un valor mínimo de caída de 506 Pa s denotando con ello la influencia del adelgazamiento del fluido al corte, basándonos en la estructura del polímero este tiende a sufrir un reacomodo de sus macromoléculas micelares creando con ello el desarrollo de interacciones intramoleculares entre componentes hidrófobos, este tipo de interacciones dificulta la deformación del fluido dentro del sistema pues estamos observando la interacción entre los componentes externos de la micela dando fuerza al desarrollo del flujo extensional, dichas interacciones cambian a intermoleculares una vez superado el punto máximo, siendo estas la causa del adelgazamiento del fluido debido a la interacción entre componentes hidrofílicos, mismos que hacen fácil el poder deformar el fluido, aunado a ello el adelgazamiento del fluido por efecto del desarrollo del flujo cortante dentro de la contracción. No obstante, el fluido a partir del valor mínimo comienza a recuperar su tendencia ascendente, esto es debido al crecimiento de la viscosidad extensional en la línea central del desarrollo del mismo, estructuralmente el fluido está mostrando el desarrollo de interacciones intramoleculares que aumentan en

magnitud proporcionalmente al aumento de la rapidez de corte mismas que no permiten que el fluido se deforme con facilidad, favoreciendo la viscosidad extensional en la línea central del flujo.

Por lo tanto, la relación de contracción empleada es altamente favorecedora en el desarrollo del flujo extensional, a pesar de la influencia del adelgazamiento que pudiera presentar el fluido.

CONTRACCIÓN AXSIMIMETRICA 4:1:4

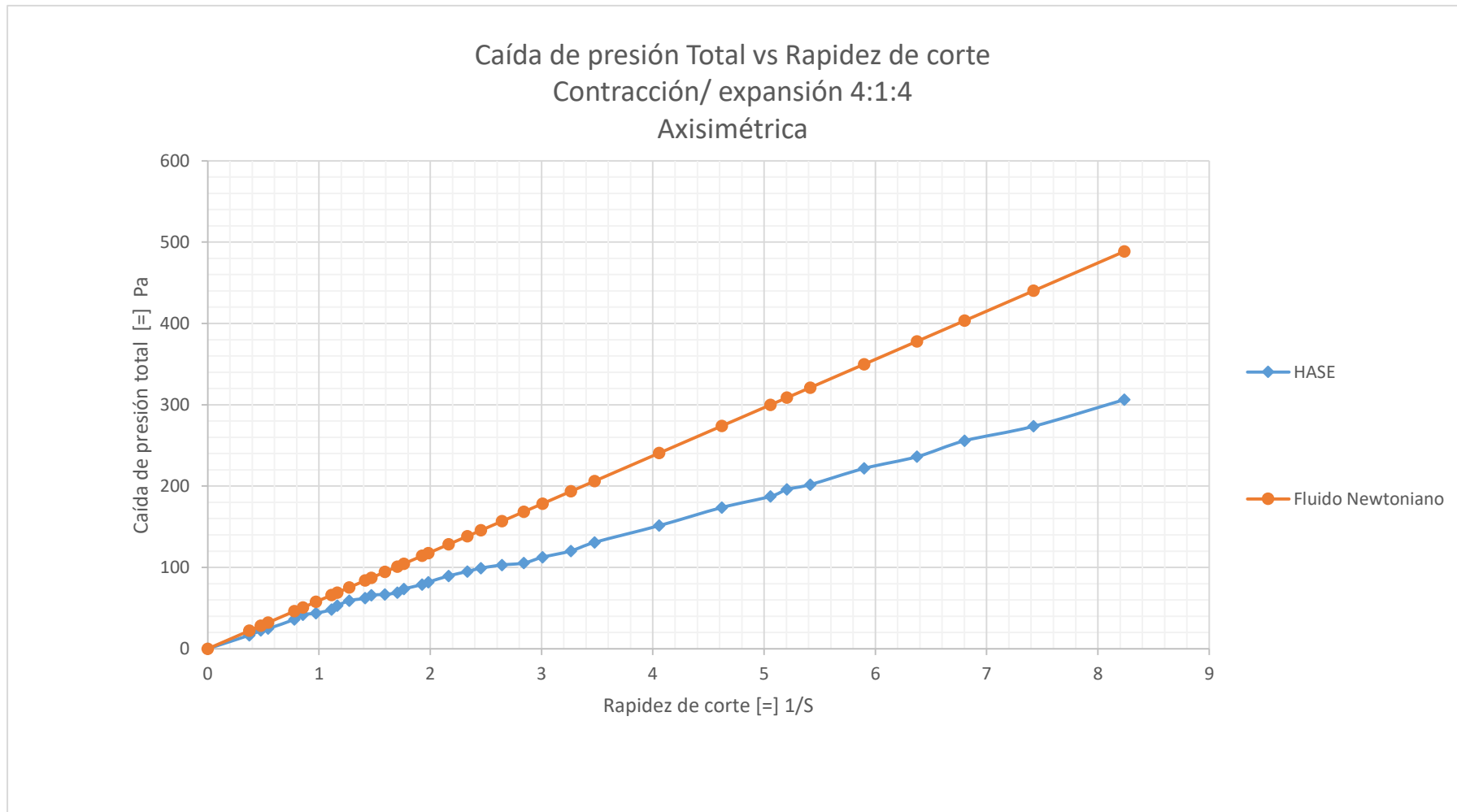


Figura 5.1-5 Caída de presión Total vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)

Dentro del estudio de la dinámica de flujo de los fluidos empleados en este trabajo, uno de los objetivos es poder vislumbrar el punto en el cual el dominio del flujo cambia de uno a otro, dependiendo de las características reológicas que cada fluido presente.

La grafica de caída de presión total, para la contracción 4:1:4 considera la caída de presión en función de la rapidez de corte al igual que en la contracción 2:1:2, en esta se observa que a valores de rapidez de corte bajos, en un rango de 0 a 0.8 s^{-1} el fluido HASE se comporta de igual forma que el fluido Newtoniano, no obstante a partir de un valor de casi 1 s^{-1} de rapidez de corte la tendencia de la línea tiende a ir por debajo de la línea del fluido Newtoniano, este comportamiento se debe al adelgazamiento del fluido, sin embargo debido a las propiedades elásticas del mismo este sigue ascendiendo, sin superar los valores de caídas de presión total del fluido Newtoniano, debido a que el fluido viscoelástico está liberando energía del sistema a costa de sus características elásticas por efecto de la tensión que experimenta el fluido al entrar en la contracción., resultando claro que dicha caída de presión se explica en términos de una menor disipación de energía en comparación con el fluido Newtoniano.

Continuando con la observación de la tendencia de la línea del fluido HASE a un valor de 2.4 s^{-1} se puede observar un ligero punto mínimo, este es importante ya que a partir de él, es que la tendencia de la misma línea del fluido HASE comienza a ascender poco a poco, asumiendo así que el punto exacto cuando el dominio de flujo cambia en el sistema es debido a la formación de un mínimo en la tendencia de la línea; la razón por la cual la tendencia de la línea del fluido HASE comienza a ascender poco a poco es debido a que a valores de rapidez de corte de 6 s^{-1} se comienzan a manifestar el desarrollo de los efectos elásticos del fluido.

En comparación de la figura 5.1-5 relación de contracción 4:1:4 con la figura 5.1-1 relación de contracción 2:1:2, la formación del dominio del flujo extensional es favorecido en la contracción axisimétrica 5.1-5, pues esta no presenta diferencia de esfuerzos normales, ni adelgazamiento del fluido.

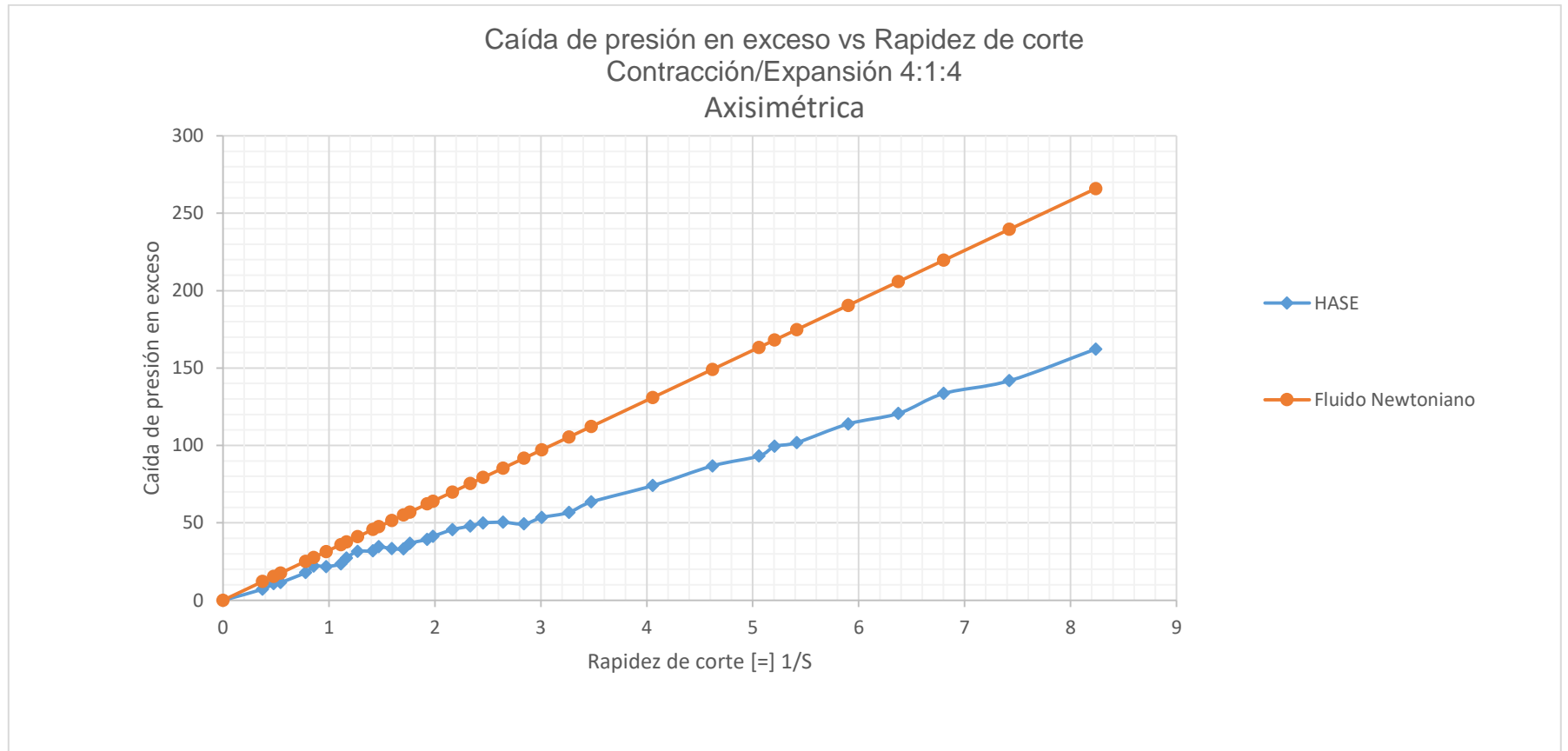


Figura 5.1-6 Caída de presión en exceso vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)

La presente gráfica, demuestra el desarrollo del flujo extensional dentro del sistema. Como se mencionó en el gráfico anterior el fluido Hase comienza a desarrollar desde un inicio el progreso de flujo cortante, incluso por debajo de la línea Newtoniana, debido a que el fluido Newtoniano libera energía únicamente por un mecanismo el cual es caída la presión de características viscosas; a diferencia del fluido viscoelástico Hase que a estos valores de rapidez de corte presenta esfuerzos normales los cuales denotan las características elásticas del fluido y por ende, la liberación de energía por medio del mecanismo de disipación viscoelástica al hacerlo por medio de dos mecanismos de liberación, es la causa por la cual la línea de tendencia del fluido viscoelástico queda por debajo de la línea del fluido Newtoniano. Dentro de esta relación de contracción y el presente gráfico, el comportamiento de la línea del fluido Hase se puede explicar en términos de la presencia de dos parámetros reológicos como son, el adelgazamiento del fluido y la presencia de esfuerzos normales.

A un intervalo de 0 a 2.6 s^{-1} el fluido presenta un dominio de flujo cortante sin embargo dentro de este intervalo también se aprecian una serie de máximos y mínimos debido a la presencia de los efectos elásticos del fluido; mientras que partir de un valor de 2.6 s^{-1} se aprecia un ligero cambio en la línea del fluido Hase donde, posterior a este cambio el fluido comienza a tener influencia de la elasticidad dando paso al desarrollo del flujo extensional, sin embargo la tendencia de la línea no supera a la línea del fluido Newtoniano, esto es debido a la liberación de energía del fluido al entrar en la contracción y la presencia del adelgazamiento del mismo, ambos parámetros reológicos se hacen cada vez más presentes a mayor rapidez de corte; por tal comportamiento es posible asumir que a partir del punto de cambio en la tendencia de la línea se puede considerar que la competencia del dominio de flujos pasa a segundo término, dando lugar a la competencia entre el adelgazamiento y la elasticidad del fluido. En comparación con la figura 5.1-2 en esta se observa la presencia del desarrollo del flujo extensional el cual difiere en gran proporción en la figura 5.1-6 quien como ya se explicó involucra dos parámetros reológicos que no permiten el desarrollo de este.

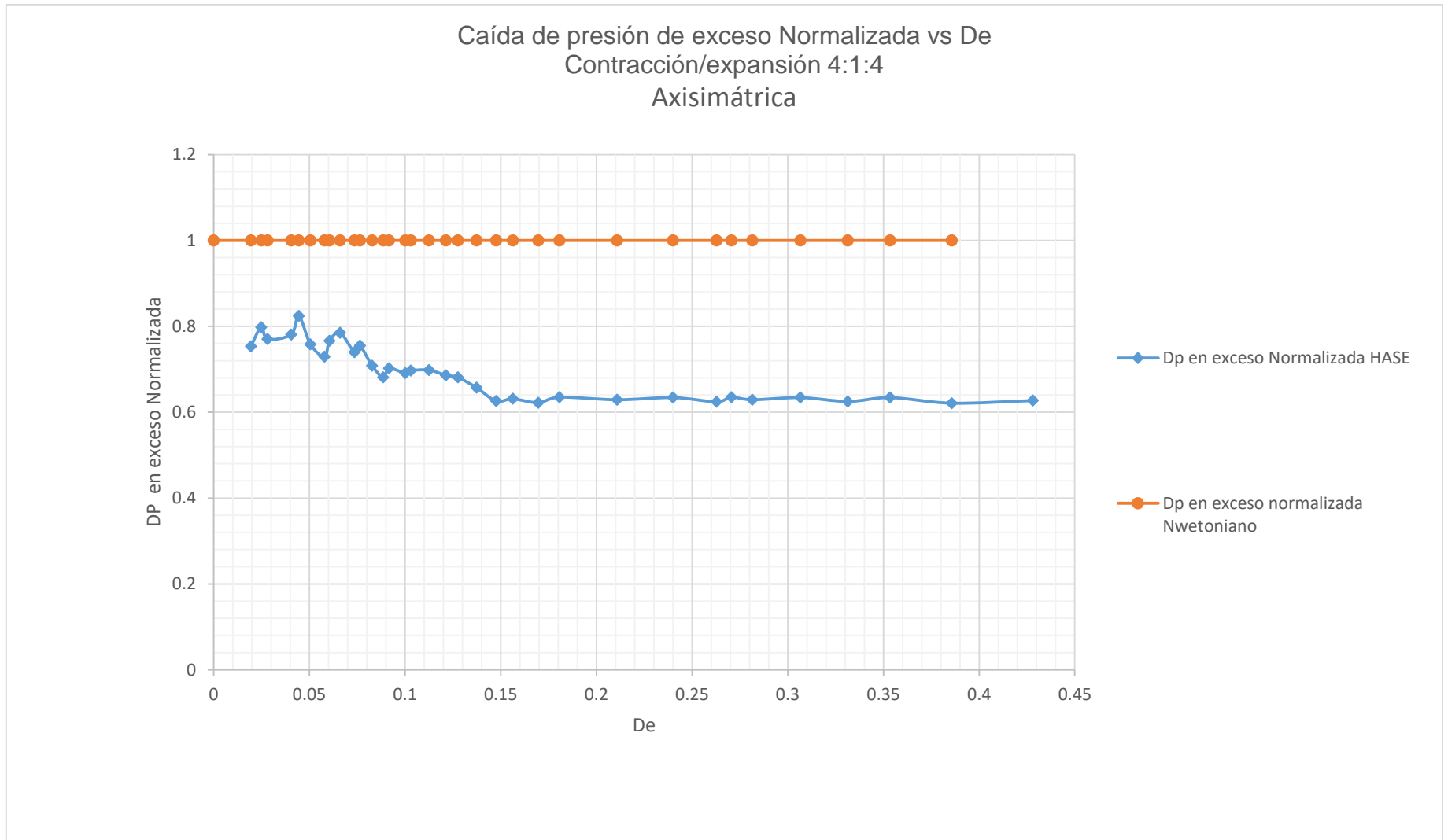


Figura 5.1-7 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)

El presente gráfico muestra el dominio de flujo cortante sobre el flujo extensional, como se puede observar la tendencia de la línea del fluido Hase está muy por debajo de la línea del fluido Newtoniano debido a la manifestación de adelgazamiento del fluido como se puede observar en la figura 3.1-1 y a la presencia de la diferencia de esfuerzos normales donde la componente radial σ_{rr} de la primera diferencia de esfuerzos normales en corte interactúa fuertemente con la componente del flujo extensional σ_{zz} que se desarrolla principalmente sobre la línea central, mismos que dificultan el desarrollo del flujo extensional, permitiendo así el desarrollo del flujo cortante dentro del sistema alcanzando caídas de presión en exceso normalizada bajas incluso más que las que presenta el fluido Newtoniano.

El fluido desarrolla un flujo extensional entre un intervalo de 0 a 0.04 De , la razón del aumento por debajo de la línea Newtoniana de la caída de presión extra normalizada es debido al desarrollo del flujo extensional como consecuencia de la presencia de los efectos elásticos y la tensión que sufre el fluido a la entrada de la contracción.

A partir del punto máximo en la tendencia de la línea del fluido Hase en un intervalo de 0.4 a 0.15, tiende a bajar debido a la influencia del desarrollo de interacciones intermoleculares las cuales se favorecen con el desarrollo del flujo cortante dentro de la contracción y debido al adelgazamiento del fluido, tomando mayor injerencia el flujo cortante y por ende impide el desarrollo del flujo extensional, sin embargo a partir del punto mínimo a un valor de 0.014 estructuralmente el fluido comienza a desarrollar interacciones intramoleculares tan fuertes que impide el desarrollo del flujo extensional, por ende la línea de tendencia se queda en un valor de caída de presión en exceso normalizada constante.

En comparación con la figura 5.1-3 el desarrollo del flujo extensional se vislumbra en la misma, sin embargo, la razón por la cual en ambas figuras el desarrollo del flujo extensional se presenta por debajo de la línea del fluido Newtoniano es

debido a la presencia de parámetros reológicos como la influencia del adelgazamiento y la presencia de interacciones intermoleculares como se explica en la sección 2.5, que inhiben el desarrollo del flujo extensional.

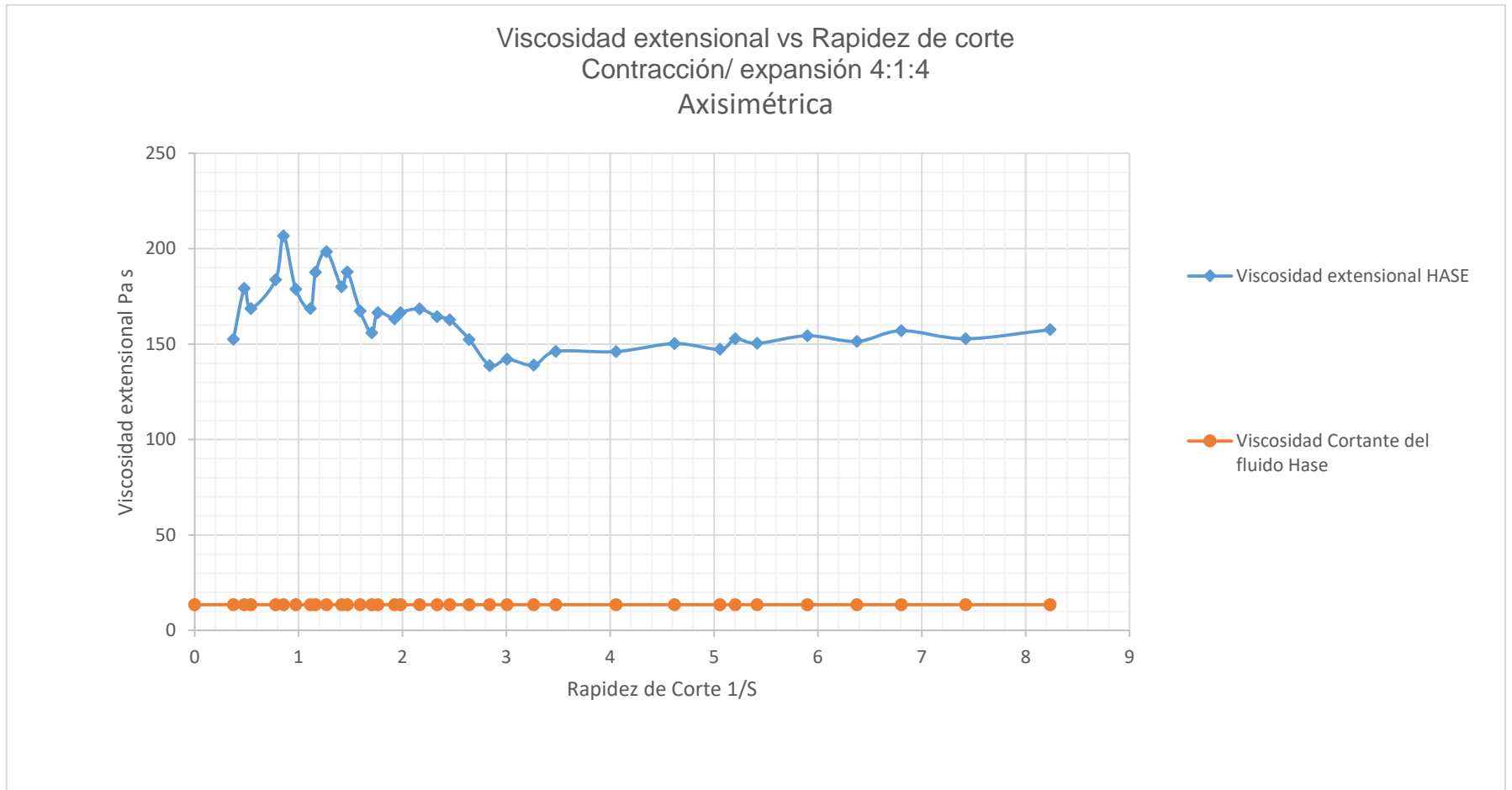


Figura 5.1-8 Caída de presión en exceso Normalizada vs rapidez de corte (Contracción axisimétrica Relación de contracción 4:1:4)

A valores bajos de rapidez de corte el fluido aumenta abruptamente su viscosidad en la línea central del desarrollo del flujo extensional alcanzando una viscosidad de 202 Pa s sin embargo como consecuencia de las propiedades viscoelásticas del mismo es posible observar variaciones en la tendencia de la línea, por efecto del adelgazamiento del fluido, dicho adelgazamiento se da como consecuencia del desarrollo del flujo cortante que favorece al desarrollo de interacciones intermoleculares mismas que se presentan por efecto del re direccionamiento de las micelas hacia la contracción, se presentó dentro de la contracción hasta alcanzar un punto mínimo a un valor de 138.98 Pa s.

A partir del valor mínimo la tendencia de la línea comienza a ascender débilmente debido al desarrollo del flujo extensional dentro del sistema y por ende se maximiza la intensidad de la viscosidad extensional, este comportamiento se entiende siguiendo la reología del fluido en la figura 3.1-1 pues a partir del valor mínimo, para esos valores de rapidez de corte la presencia del desarrollo de las propiedades elásticas del fluido comienzan a desarrollarse favoreciendo la viscosidad extensional del mismo; sin embargo esta línea de tendencia en un intervalo de 3.2 a 8 de valores de rapidez de corte la línea de tendencia se mueve en valores constantes de viscosidad extensional, estructuralmente como se mencionó en la sección 3.1 del presente trabajo, el fluido pasa de interacciones intermoleculares a intramoleculares, estas interacciones se dan debido a que los componentes hidrófobos interactúan con más componentes hidrófobos de la misma cadena, dicho tipo de interacción es tan fuerte que, es difícil deformar el fluido incluso aumentando el valor de rapidez de corte lo cual solo hace que dicha interacción tome fuerza y por ende la viscosidad extensional lo haga del mismo modo quedándose en valores casi constantes.

En comparación con la figura 5.1-4 relación de contracción 2:1:2, la presente figura 5.1-8 muestra valores de rapidez de corte más altos pero valores de viscosidad extensional más bajos debido al cambio de diámetro en cada relación y a la influencia del adelgazamiento del fluido y tipo de interacciones desarrolladas en el mismo, ya que los valores de rapidez de corte en esta son

más altos lo que provoca que no se alcancen valores de viscosidad extensional tan altos como los alcanzados en la figura 5.1-4, lo que permite dictaminar que la relación de contracción 2:1:2 favorece el desarrollo de la viscosidad extensional pues en ella los valores de rapidez de corte son pequeños y por ende el fluido no se deforma tanto como en la figura 5.1-8.

CONTRACCION CUADRADA

Experimentos con flujos en contracciones cuadrado-cuadrado son escasos, en parte porque son más complejos. En el trabajo descrito por Alves [10] menciona una diferencia entre la contracción cuadrada y la contracción axisimétrica, es la primera está definida por tres dimensiones (2D), mientras que la segunda está definida por dos dimensiones (3D); la mayoría de las simulaciones de flujo viscoelástico tridimensional (3D) existentes en las contracciones, básicamente consideran contracción plana en 2-D que se extiende a lo largo de la dirección transversal y entonces los efectos tridimensionales se atribuyen solo a la presencia de vórtices, por ello la interpretación de los gráficos presentados para esta contracción se basan en especulaciones de lo que le sucederá a la dinámica de flujo dentro del sistema.

Como se mencionó en la sección 3 él autor se basa en su propuesta de la dinámica del desarrollo del flujo en una contracción cuadrada definiendo que, dentro de una geometría cuadrada el perfil de velocidad se presenta en 4 direcciones es decir, hacia las 4 paredes de la contracción; por ende, la velocidad de la línea central del mismo es menor que la velocidad que se presenta en la línea central del perfil de velocidades de una geometría cilíndrica, como consecuencia del contacto del fluido con las 4 paredes de la contracción.

Al igual que en una contracción cilíndrica, en una contracción cuadrada el contacto del fluido con las paredes de la geometría, crean el flujo cortante con mayor presencia cerca de estas y con efectos mínimos de este en la línea central del flujo. En dicha línea central, es donde se desarrolla el flujo extensional, es de esperarse que los efectos cortantes, así como viscosos y extensionales, así como viscoelásticos sean mayores en la contracción cuadrada, que en el caso de una geometría cilíndrica axisimétrica.

Uno de los parámetros importantes que influyen en los resultados esperados es la presencia de la primer diferencia de esfuerzos normales, que tiene alto impacto en el desarrollo de la dinámica de flujo, debido a las diferencias geométricas de las contracciones; la primer diferencia de esfuerzos normales en una contracción cilíndrica es la que esta se da en una sola dirección, mientras que en una

contracción cuadrada esta se da en dos direcciones por lo tanto el dominio de las propiedades viscosas y viscoelásticas serán, dependiendo de la relación de contracción mayores o menores, así como las caídas de presión total y en exceso, tomando en cuenta que dentro de una contracción cuadrada dichos parámetros tienen que interactuar con una diferencia de esfuerzos normales que se presenta como una respuesta elástica en corte en las cuatro paredes de la contracción.

En cuanto a la viscosidad extensional no existe literatura abierta que evalúe la misma en una geometría que genera un flujo extremadamente complejo como lo es en tres dimensiones, sin embargo, como se mencionó anteriormente los estudios más cercanos fueron realizados en geometrías planares haciendo estimaciones indirectas a partir de formación de vórtices.

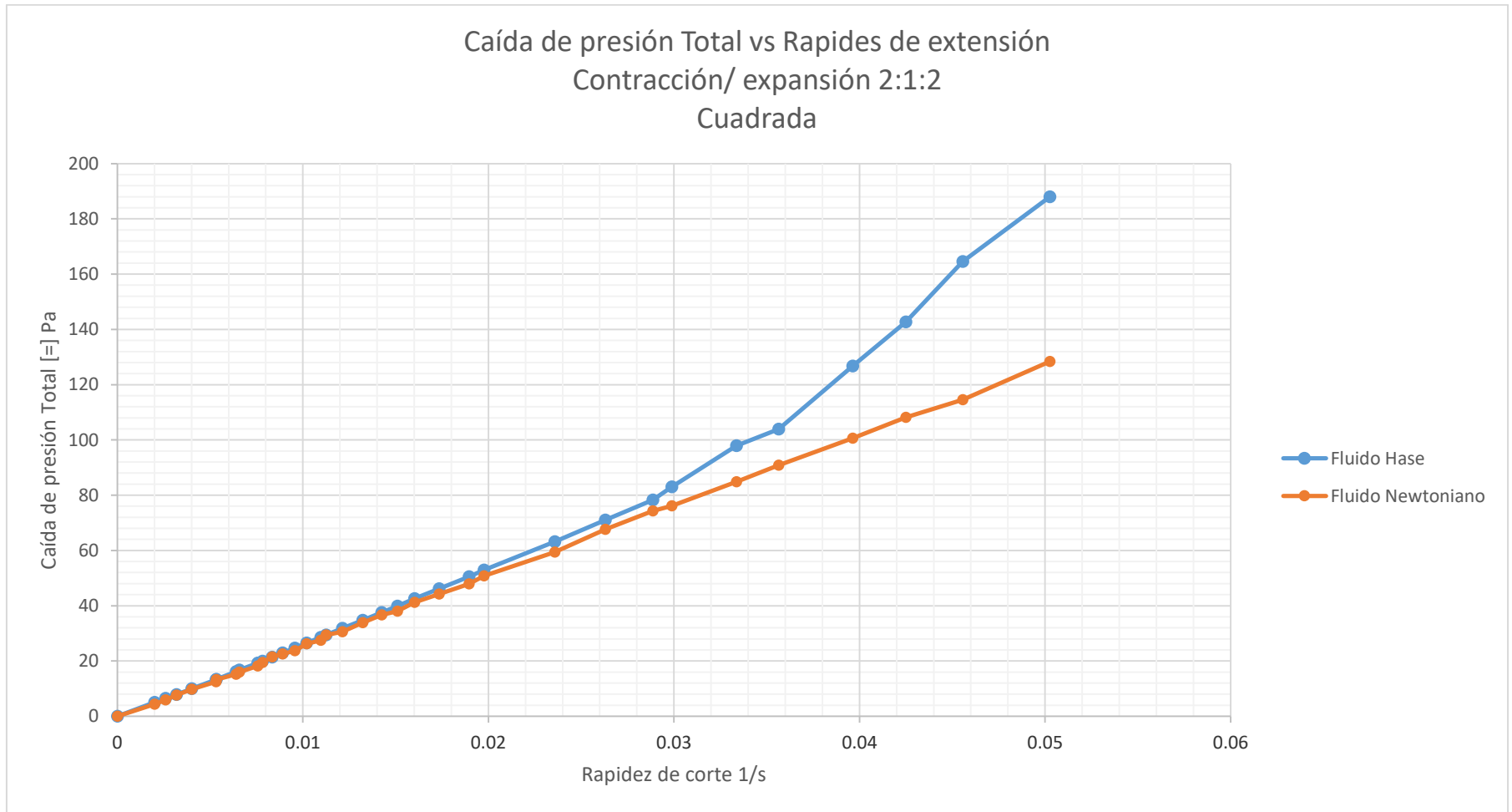


Figura 5.1-9 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)

En la Figura 1.5-9 es posible observar, al igual que en la figura 1.5-1 la injerencia que tienen las propiedades viscosas y viscoelásticas de cada uno de los fluidos empleados en la dinámica que cada uno presenta donde el fluido Newtoniano representa las características viscosas ya que este no presenta elasticidad y por ende el desarrollo del flujo cortante, sin embargo y a diferencia de este el fluido viscoelástico Hase si presenta elasticidad y viscosidad. La dinámica de ambos fluidos dentro de la contracción se explica de la siguiente manera; el fluido Newtoniano crece de una manera proporcional a la rapidez de corte aplicada al fluido, como consecuencia de los efectos viscosos que se presentan al paso de este en la contracción, representando con ello la trayectoria que sigue el fluido considerando solamente efectos viscosos. El fluido HASE a valores de rapidez de corte pequeños, sigue la trayectoria de la línea del fluido Newtoniano, como consecuencia de la manifestación de efectos viscosos, sin embargo, a un valor de rapidez de corte de 0.2 s^{-1} el fluido comienza a desarrollar efectos elásticos, razón por la cual la caída de presión total dentro del sistema va en aumento, debido a la tensión que presenta el fluido al tratar de ingresar a la contracción.

En comparación con la figura 5.1-1 dentro de la contracción cuadrada, una diferencia notable es el aumento en el área de sección transversal y el aumento en la superficie de contacto, lo que conlleva a favorecer los efectos viscoelásticos máxima de 184 Pa; en la contracción cuadrada mientras que en la contracción axisimétrica, el fluido Hase alcanza un valor máximo de caída de presión total de 90 Pa, por ende la geometría que favorece el desarrollo de efectos elásticos es la geometría cuadrada pues estos se hacen presentes a mayores valores de caída de presión total.

Caída de presión en exceso vs Rapides de extensión
Contracción/expansión 2:1:2
Cuadrada

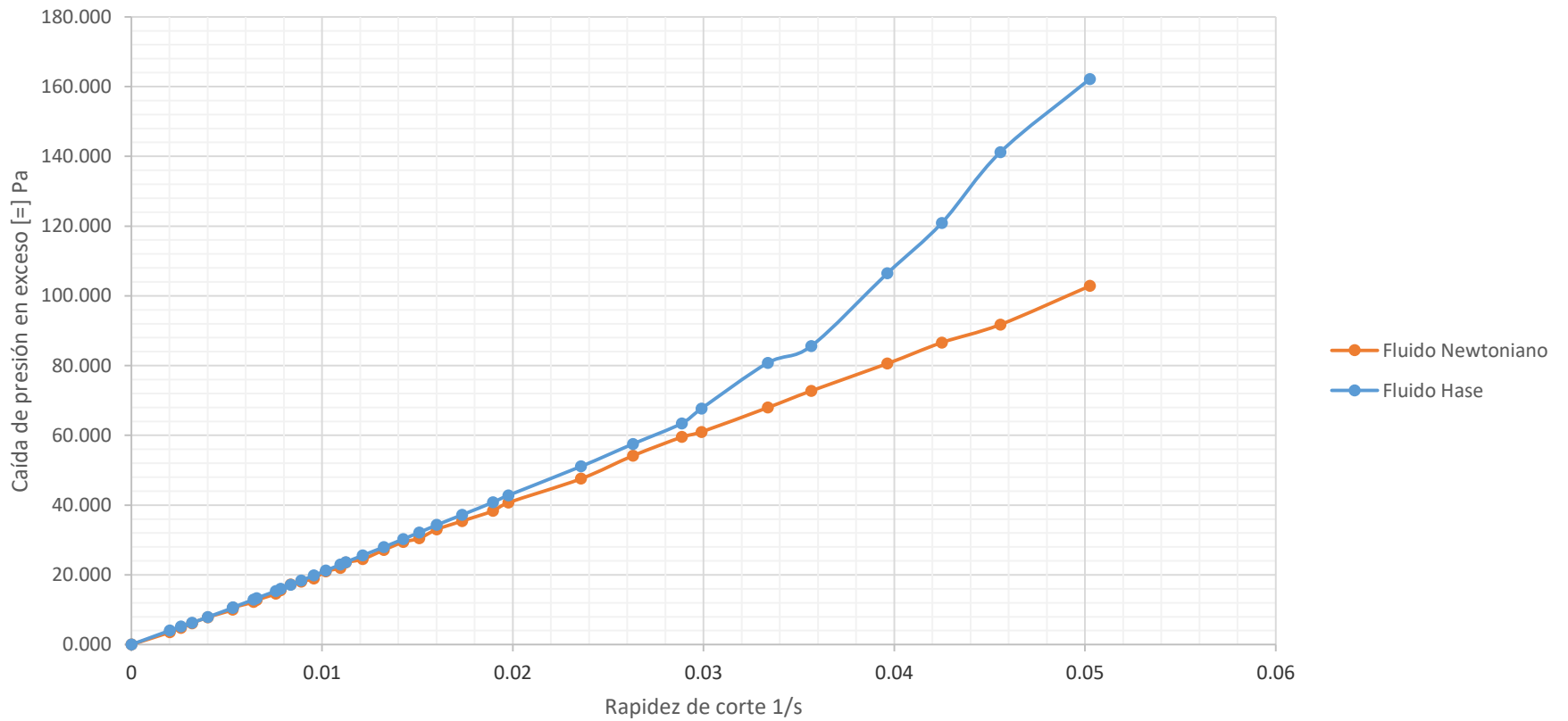


Figura 5.1-10 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)

La presente gráfica denota el efecto de la geometría en el desarrollo del flujo extensional así como la dificultad que el fluido presenta al ingresar en la contracción debido a efectos de entrada como consecuencia de la geometría empleada y el direccionamiento de las líneas de corriente del fluido hacia la contracción lo cual se muestra en un intervalo de 0 a 0.02 s^{-1} ; posterior al valor de rapidez de corte de 0.02 s^{-1} se puede apreciar el lento desarrollo del flujo extensional debido a la tensión que sufre el fluido al entrar en la contracción, denotando con ello la presencia de elasticidad del fluido.

En comparación con la figura 5.1-2 los valores que se alcanzan en la presente gráfica, figura 5.1-10 son superiores con base en el desarrollo del dominio del flujo extensional y su crecimiento es constante a pequeños valores de rapidez de corte, al contrario de lo que sucede en la figura 5.1-2 en la cual si bien se aprecia un notable desarrollo del flujo extensional a valores pequeños de rapidez de corte desde un inicio de la experimentación, la magnitud de estos no supera a los valores de caída de presión en exceso alcanzados en la figura 5.1-10.

Concluyendo así que la geometría axisimétrica es en la cual se desarrolla de mejor forma el flujo extensional uniaxial no homogéneo, la razón de ello es debido a que posterior a la entrada de la contracción cuadrada el fluido tiene contacto con las paredes, donde al ser superior la superficie de contacto en esta geometría que en la axisimétrica, el desarrollo del flujo cortante es superior y por lo tanto la influencia de este sobre el parámetro a medir retrasa el desarrollo del flujo extensional dentro de dicha contracción, así se considera a la contracción axisimétrica altamente favorecedora del desarrollo del flujo extensional.

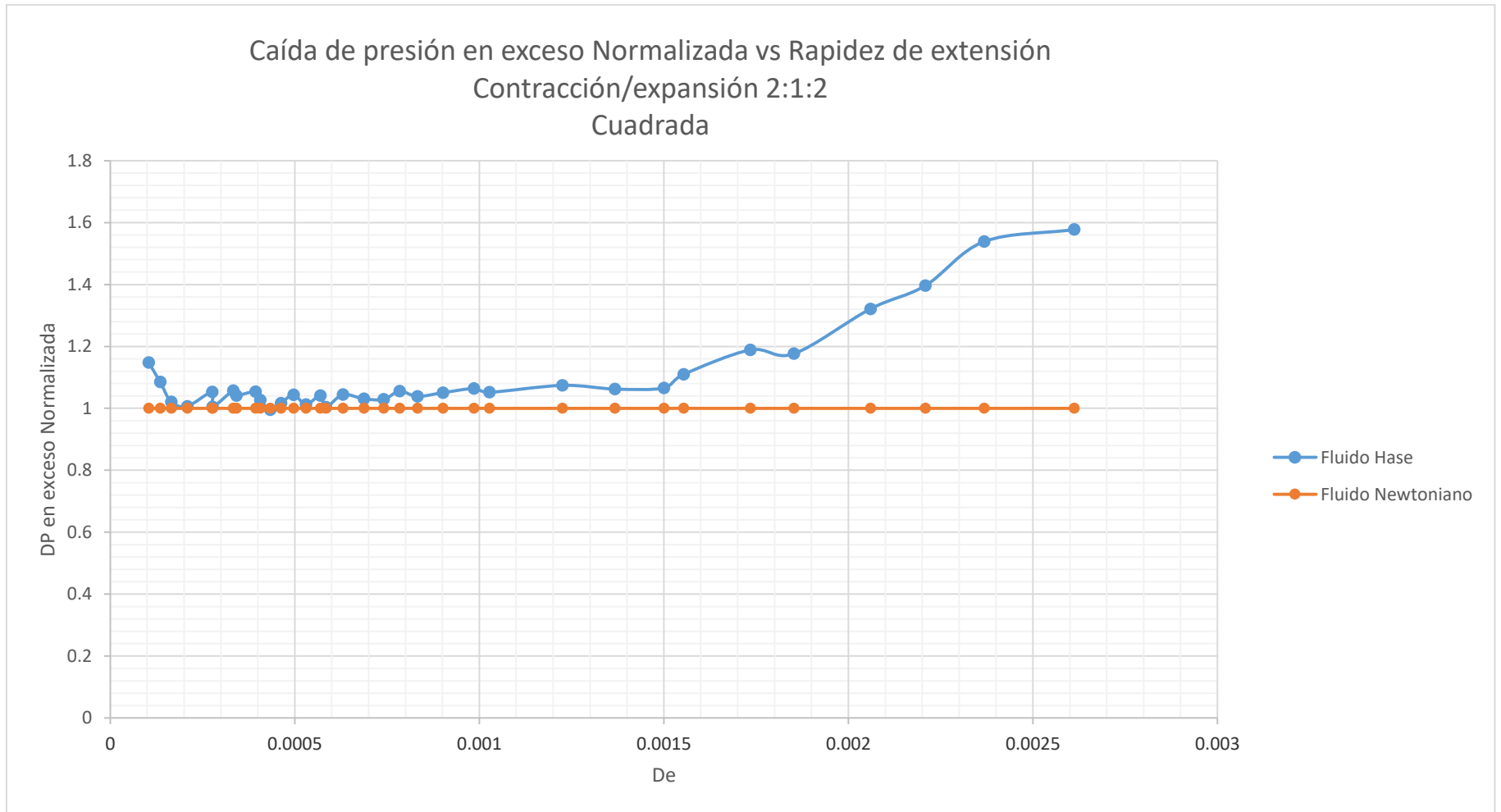


Figura 5.1-11 Caída de presión en Exceso Normalizada vs De (Contracción cuadrada Relación de contracción 2:1:2)

El presente gráfico, Figura 5.1-11 Muestra el dominio de flujo que se está desarrollando en el sistema de contracción; de los cuales en un inicio domina el desarrollo del flujo cortante, dicho comportamiento es la consecuencia del direccionamiento que sufren las moléculas del fluido, desarrollando con ello interacciones intermoleculares tan fuertes que el fluido Hase se mueve sobre la línea del fluido Newtoniano y como se mencionó con anterioridad en la figura 5.1-3, la línea del fluido Newtoniano sirve como referencia para poder vislumbrar cuando el fluido viscoelástico esté siendo dominado por los efectos viscosos y por ende el desarrollo del flujo cortante, ya que la caída de presión del fluido Newtoniano solo se lleva a cabo por dichos efectos mientras que si el fluido viscoelástico se aleja de la línea de referencia se asume que por efectos elásticos este comienza a desarrollar flujo extensional.

La causa de las interacciones intermoleculares del fluido es debido a que este en su estructura molecular tiene componentes hidrófobos los cuales interactúan fuertemente con componentes hidrófobos de diferentes cadenas poliméricas permitiendo que el fluido sea fácil de deformar incluso a valores de rapidez de corte pequeños.

En un intervalo de 0.0005 a 0.0015 De , el crecimiento del flujo extensional comienza a presentarse sin embargo su crecimiento comienza a ser notable a partir de un valor de 0.0015 De . En comparación con la figura 5.1-3, en la figura 5.1-11 sí se desarrolla en ella el dominio del flujo cortante y los valores de caídas de presión en exceso normalizada son menores que en la figura 5.1-3 debido a la influencia del desarrollo del flujo cortante posterior a la entrada de la contracción que favorece las interacciones intermoleculares y por ende se hace presente el adelgazamiento del fluido.

En contraste con desarrollo del flujo cortante, una vez que el fluido y sus moléculas se direccionan a la entrada de la contracción las interacciones intramoleculares permiten el desarrollo del flujo extensional con la misma intensidad que se presentó el flujo cortante. En comparación con la figura 5.1-3 en la figura 5.1-11 sí se desarrolla el dominio del flujo cortante, y los valores de caídas de presión en exceso

normalizada son menores que en la figura 5.1-3 debido a la influencia del desarrollo del flujo cortante.

A pesar de que en la contracción cuadrada el fluido desarrolla el dominio del flujo extensional, en la geometría axisimétrica se desarrolla en un 20% más con respecto al valor mayor de caída de presión en exceso normalizada alcanzado, si bien en la figura 5.1-3 el desarrollo del flujo extensional a partir del punto mínimo se desarrolla a valores más bajos alcanza un valor de 1.8 en caída de presión en exceso normalizada en comparación con el valor alcanzado en la figura 5.1-11 que fue de 1.6, aun cuando este crecimiento del desarrollo del flujo extensional en la contracción axisimétrica es débil va en ascenso y no se presenta el desarrollo del dominio del flujo cortante en ningún punto de la línea de tendencia, por ello la contracción que favorece el desarrollo del flujo extensional es la contracción axisimétrica mostrada en la figura 5.1-3, pues en ella el desarrollo del flujo extensional alcanza mayores valores de caída de presión en exceso normalizada denotando con ello la presencia del desarrollo del flujo extensional.

Caída de presión Total vs Rapidez de extensión
Contracción/expansión 4:1:4
Cuadrada

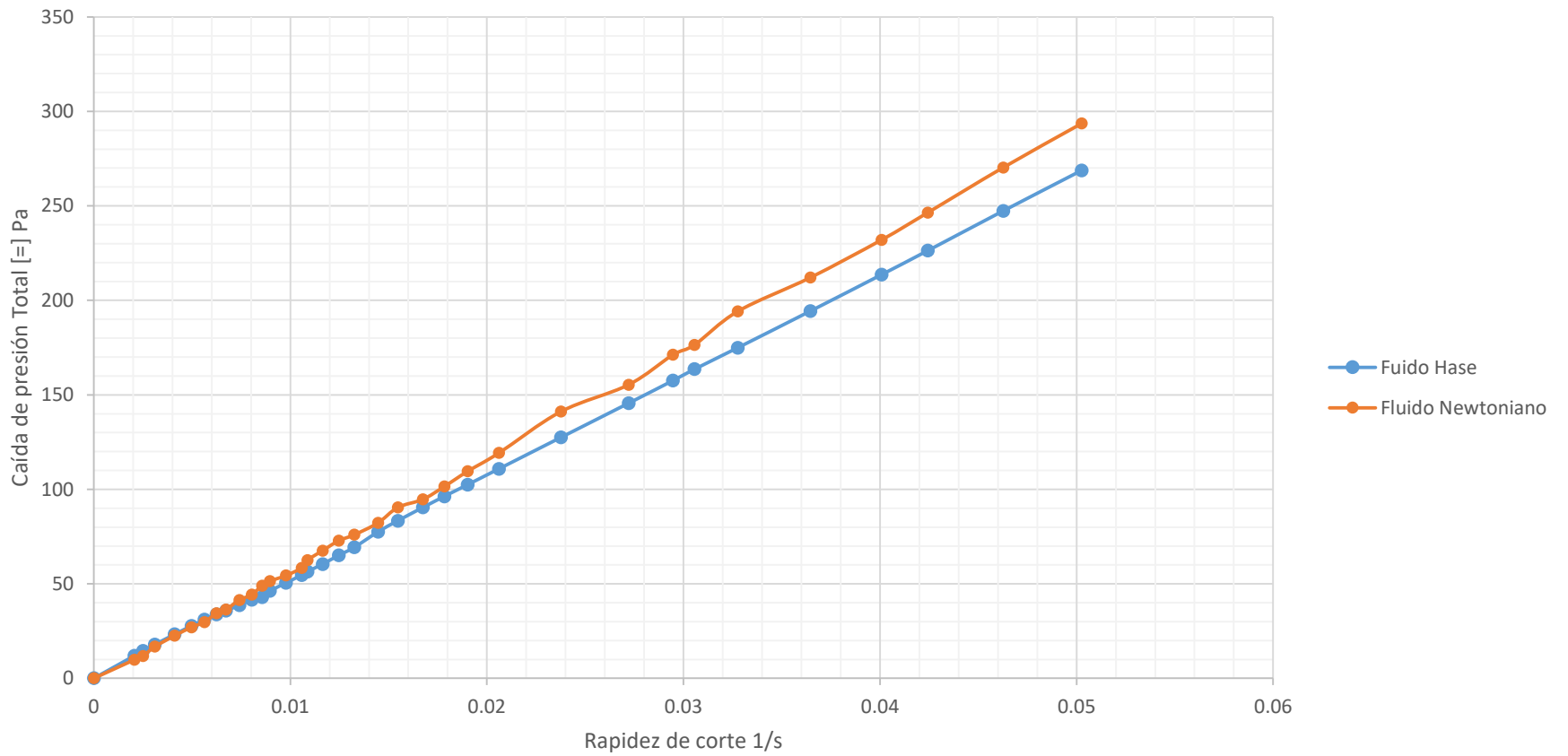


Figura 5.1-13 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)

La tendencia de la línea del fluido viscoelástico de la figura 5.1-13 contracción cuadrada al igual que la figura 5.1-5 contracción axisimétrica queda por debajo de la línea del fluido Newtoniano debido a que, siguiendo la reología del fluido descrita en la figura 2.6-1; del presente trabajo la influencia del adelgazamiento del fluido comienza a hacerse presente, como consecuencia de ello y debido a sus propiedades viscoelásticas el fluido comienza a liberar energía a través de dichas propiedades por medio de efectos Viscosos y elásticos, mientras que el fluido Newtoniano solo lo hace a través de sus propiedades viscosas lo que demuestra una menor disipación de energía por parte del mismo, quedando así por debajo de la línea del fluido Newtoniano.

Cabe mencionar que a pesar de que el fluido viscoelástico está por debajo de la línea de fluido Newtoniano este sigue ascendiendo, debido a la presencia de sus propiedades elásticas, como consecuencia de la tensión que sufre el fluido al entrar en la contracción.

Ambas geometrías de contracción tienen dinámicas parecidas sin embargo la elasticidad del fluido se favorece en la figura 5.1-13 ya que ambas se mueven por debajo de la línea del fluido Newtoniano a valores de rapidez de corte similares sin embargo el fluido HASE toma valores de caídas de presión más altos aun por debajo de la línea del fluido Newtoniano que los que se presentan en la figura 5.1-5 axisimétrica, pues esta alcanza valores de caídas de presión similares a los alcanzados en la contracción cuadrada a mayores valores de rapidez de corte, por ende se concluye que los efectos elásticos se aprecian mejor en la contracción cuadrada pes no es necesario que el fluido se deforme en gran cantidad para alcanzar valores altos de caídas de presión total aun por debajo de la línea del fluido Newtoniano denotando con ello el favorecimiento de efectos viscoelásticos en el fluido.

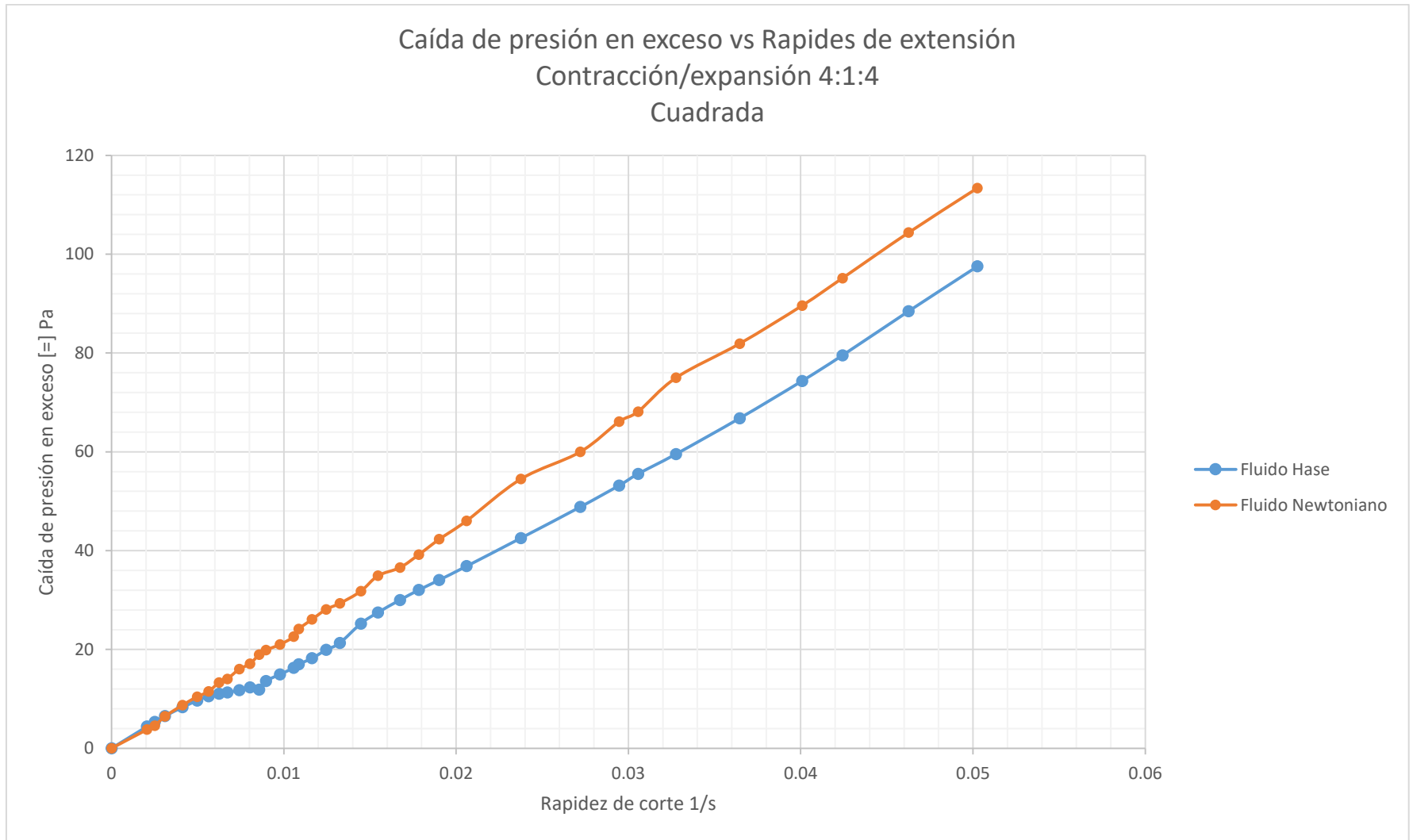


Figura 5.1-14 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte(Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)

La tendencia de la línea del fluido viscoelástico tiende a estar por debajo de la línea de fluido Newtoniano debido a la presencia de dos mecanismos de liberación de energía.

En la figura 5.1-14 la dificultad que presenta el fluido viscoelástico al entrar a través de la contracción en un intervalo de 0 a 0.0006S^{-1} , denota la liberación de energía por medio de efectos viscoelásticos y por lo tanto el dominio del flujo cortante pues la línea de tendencia del fluido viscoelástico se mueve sobre la línea del fluido Newtoniano. Una diferencia notable entre las figuras 5.1-14 y 5.1-6 son los valores de caídas de presión en exceso, pues en la figura 5.1-14 para el fluido Hase son menores que los que presenta el mismo fluido, pero en la figura 5.1-6, debido a la reducción de diámetro y área transversal de la relación de contracción en ambas figuras. En la contracción cuadrada el área de superficie de contacto es mayor que la que presenta la contracción axisimétrica, por ende en esta el fluido tiene mayor interacción con las paredes de la contracción cuadrada, así la caída de presión en exceso es afectada en ambas contracciones, en primer lugar debido a la primera diferencia de esfuerzos normales que se presenta con mayor intensidad en la contracción cuadrada ya que en ella la primer diferencia de esfuerzos normales en corte se presenta en las 4 paredes de la contracción.

En la figura 5.1-14 a partir del valor de rapidez de corte de 0.0006 s^{-1} , el fluido aún por debajo de la línea Newtoniana, sigue ascendiendo mostrando el desarrollo del flujo extensional, la causa de este efecto es debido a que para este punto el fluido ya presenta elasticidad como se muestra en la figura 3.1-1; en comparación con la figura 5.1-6 contracción axisimétrica en ella el desarrollo de los efectos elásticos se da a mayores valores de rapidez de corte sin embargo estos son más grandes favoreciendo el desarrollo del flujo extensional.

Por lo tanto, el desarrollo del flujo extensional se vislumbra con mayor magnitud en la relación de contracción 4:1:4 Figura 5.1-14 pues en esta los efectos elásticos superan los valores de caídas de presión en exceso que se presentan en la figura 5.1-6 a valores de rapidez de corte más bajos.

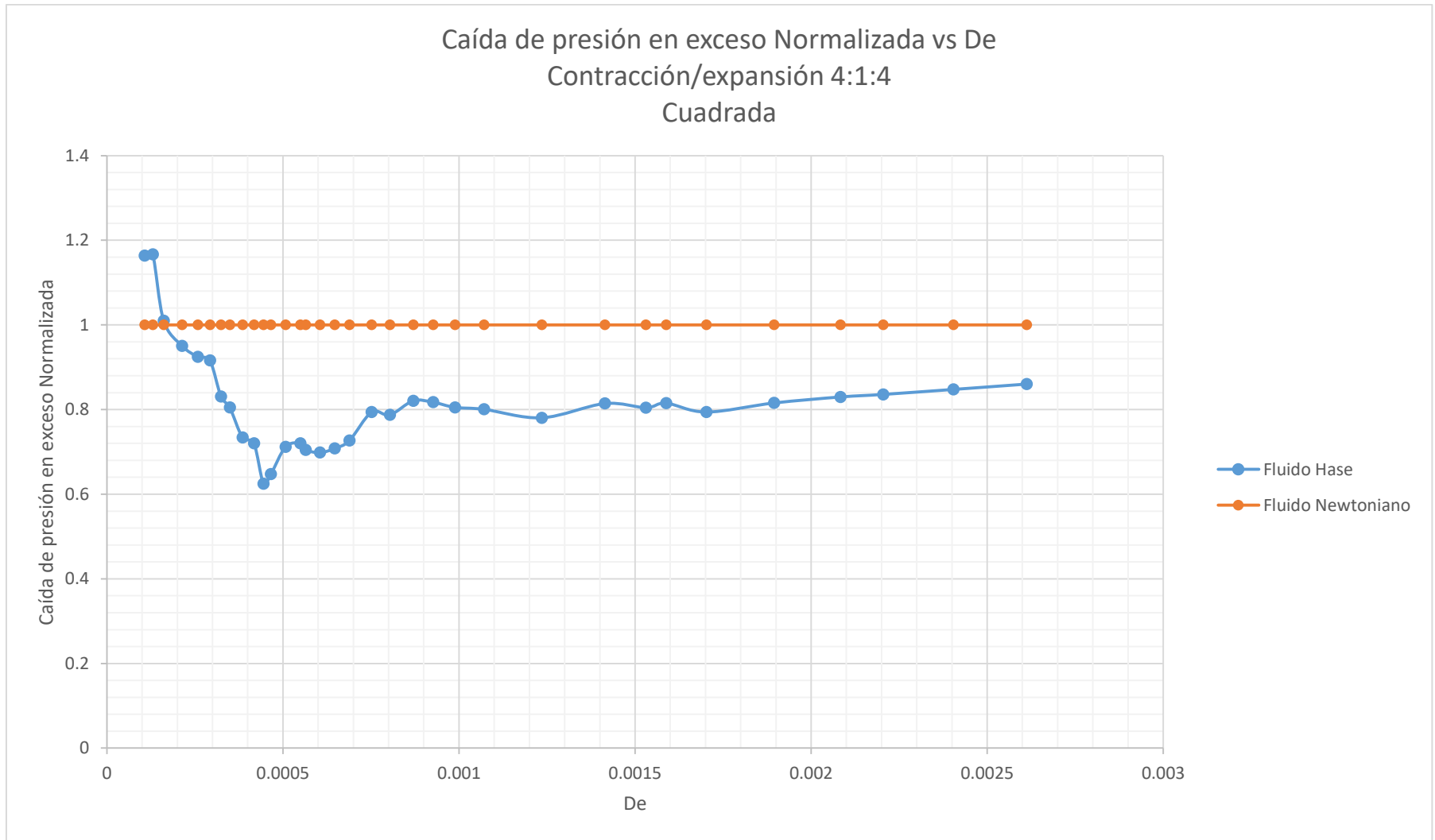


Figura 5.1-15 Caída de presión en exceso Normalizada vs De (Contracción cuadrada Relación de contracción 4:1:4)

El presente gráfico muestra la competencia de ambos flujos tanto extensional como cortante, en la figura 5.1-15 el fluido Hase en un inicio de su trayectoria comienza desarrollando un flujo extensional debido a la fuerte tensión que sufre el fluido al entrar en la contracción y por ende la caída de presión en exceso del mismo es más alta que la del fluido Newtoniano, esto por efecto de la reducción en la relación de contracción y el área transversal de la misma, no obstante el desarrollo del flujo extensional comienza a ser inhibido hasta alcanzar la línea de referencia del fluido Newtoniano denotando así el desarrollo de interacciones intermoleculares, mismas que propician el adelgazamiento del fluido y por ende el desarrollo del flujo cortante incluso más que el que pudiera desarrollar el fluido Newtoniano a pequeños valores de Número de De. Siguiendo con el desarrollo del flujo en el sistema, a pesar de que el fluido se re direcciona sus moléculas a la entrada de la contracción y de acuerdo a tal re direccionamiento el fluido debería presentar el desarrollo de interacciones intramoleculares favoreciendo el desarrollo del flujo extensional este no se presenta así debido a que el gasto es insuficiente, no obstante la causa de que la línea de tendencia este por debajo de la línea del fluido Newtoniano es debido a la primer diferencia de esfuerzos normales, la cual inhibe el crecimiento del flujo extensional ocasionando así valores de caídas de presión en exceso bajos hasta alcanzar un valor mínimo de 0.0004 De y una caída de presión en exceso normalizada de 0.62.

Seguido del punto 0.0049 De, se observa un mínimo a partir del cual hay un cambio en la línea de tendencia del fluido viscoelástico, dando paso a la competencia entre el adelgazamiento del fluido y las propiedades elásticas del mismo, pues este aún por debajo de la línea Newtoniana comienza a ascender, como consecuencia del desarrollo del flujo extensional sobre el sistema mismo que se desarrolla por la formación de interacciones intramoleculares las cuales al estar sometidas a valores de rapidez de corte altos, permiten el desarrollo del flujo extensional posterior al punto mínimo. En comparación con la figura 5.1-7 si bien ambas líneas de tendencia quedan por debajo de la línea de referencia, el desarrollo del flujo extensional se presenta 85% mejor en la figura 5.1-15 que en la figura 5.1-7 debido a que en la

contracción cuadrada la primer diferencia de esfuerzos normales se presenta en las 4 paredes de la misma por lo cual es más intensa que en la contracción axisimétrica, así cuando el fluido supera dicha diferencia de esfuerzos en la contracción cuadrada el desarrollo del flujo extensional será por lo tanto mayor en la figura 5.1-15 que en la figura 5.1-7, pues dicho dominio se desarrolla con la misma intensidad.

CONTRACCIÓN HIPERBÓLICA

Con base en la dinámica estudiada en las contracciones anteriores (Axisimétrica y Cuadrada, ambas con relaciones de contracción 2:1:2 y 4:1:4) se pretende analizar la variación de los parámetros reológicos como son; la caída de presión total, la caída de presión en exceso, la caída de presión en exceso normalizada y la viscosidad extensional al paso de un fluido viscoelástico HASE el cual se considera como un polímero asociativo que se compone como una estructura micelar; el objetivo de ello es comparar sus resultados obtenidos contra los obtenidos en las contracciones con geometrías axisimétrica y cuadrada.

Las geometrías que se analizaron previo a la presente geometría hiperbólica se describen como contracciones/expansiones de características axisimétricas, sin embargo existe una diferencia notable con la geometría hiperbólica, la diferencia consta del cambio de área por donde transita el fluido hasta llegar a la zona máxima de contracción, donde dicho cambio es abrupto en las contracciones con geometría axisimétrica y cuadrada pues el área de la contracción es 50% más pequeña que el área previa a está con base en la relación de contracción 2:1:2 y 75% más pequeña en el caso de la relación de contracción 4:1:4. La presente geometría se clasifica como una contracción gradual, donde el cambio de área transversal es diferencial hacia la zona de contracción máxima, por ende la intensidad de los parámetros reológicos que se presentan en este tipo de contracciones es diferente a la geometría axisimétrica y cuadrada.

Una de las diferencias notables comparando la dinámica de flujo dentro de una contracción abrupta y una contracción gradual, es que en la contracción abrupta el flujo es repentinamente interrumpido debido al cambio de área transversal en el sistema de contracción, mientras que en la contracción gradual, la reducción diferencial del área transversal permite al fluido orientar sus líneas de corriente dentro de la contracción haciendo variar notablemente los parámetros reológicos a analizar como se explica a continuación:

Dentro de la contracción gradual como se mencionó anteriormente la geometría empleada permite al fluido orientar sus líneas de corriente de forma convergente

hacia la contracción, favoreciendo en un inicio el desarrollo del flujo cortante dentro de la misma, la causa de ello es que el cambio gradual de diámetro permite al fluido una mayor interacción con las paredes del sistema y por lo tanto la rapidez de corte es menor, sin embargo el fluido al ir adentrándose al diámetro más pequeño de la contracción, la rapidez de corte aumenta debido a que la reducción de área transversal disminuye la interacción del fluido con las paredes del sistema lo que provoca una aceleración diferencial hacia la zona de contracción y por ende favorece el desarrollo de esfuerzos extensionales. A medida que se desarrolla el dominio de flujo dentro del sistema, sobre la línea central también se desarrolla un flujo extensional, cabe mencionar que en este tipo de geometrías coexisten este tipo de flujos cortante y extensional, más resulta interesante observar como el desarrollo del flujo cortante favorece el desarrollo del flujo extensional; sin embargo, al igual que en las geometrías axisimétrica y cuadrada se hace presente la competencia de flujo cortante y extensional, no obstante dentro de la geometría hiperbólica el desarrollo del flujo cortante favorece la magnitud del flujo extensional ya que debido a la interacción del fluido con el área superficial de la contracción y a la geometría de la misma el flujo tiene la oportunidad de orientar sus líneas de corriente hacia la zona de contracción máxima.

La dinámica antes descrita afecta a la caída de presión detectada, en un fluido viscoelástico se describe de la siguiente forma, a valores bajos de rapidez de corte la interacción del fluido con el área superficial de la contracción hace presentes los efectos viscosos, aunado a ello los efectos elásticos del fluido Viscoelástico son tan bajos, que el fluido Viscoelástico sigue una trayectoria con respuesta similar a la que la que tendría un fluido Newtoniano dentro del sistema.

Una vez el flujo cortante direcciona las líneas de corriente dentro de la contracción, favorece la presencia de esfuerzos extensionales del fluido al pasar a través de la zona máxima de contracción, dicha extensión se da debido a que el gradiente de presión que se genera al incrementar el flujo en el sistema permite detectar la presencia de esfuerzos extensionales y cortantes

Entendiéndose así que la caída de presión en el sistema indica que el fluido se estira al ingresar en la contracción y contrae al salir de esta; en relación a la rapidez de corte, esta al inicio es pequeña, ya que como se mencionó la rapidez de corte es la variación de la velocidad con respecto de la posición que va de menos a más desde su ingreso a la contracción hasta la zona máxima de contracción, en dicha zona de contracción máxima es donde el fluido sufre una mayor intensidad de la extensión del fluido lo que denota una rapidez de corte alta, sin embargo una vez el fluido pasa de la zona de contracción máxima la rapidez de corte disminuye y la aceleración del fluido pasa a ser de una mayor velocidad a una menor.

Para comprender el desarrollo del flujo es necesario observar cómo se presenta el desarrollo del flujo cortante y la primera diferencia de esfuerzos normales, así como la presencia del adelgazamiento del fluido y las interacciones moleculares que se presentan en el para poder determinar la dinámica del fluido dentro del sistema de contracción.

La viscosidad extensional se determinó con base en la ecuación propuesta en el trabajo realizado por Ober T.J [20], sin embargo es de importancia mencionar que tanto el esfuerzo como la viscosidad extensional que se desarrollan al paso del fluido dentro de la contracción son generalmente dependientes del tiempo; ya que los esfuerzos se consideran como transitorios, dentro de la geometría es necesario contemplar que dicho esfuerzo extensional se lleva a cabo en un intervalo de tiempo, desde el tiempo de la entrada del fluido a la contracción, como el tiempo que le toma al fluido salir de la contracción, por lo tanto la ecuación de Colver desarrollada en el trabajo de Ober T.J [20] fue corregida utilizando la extensión de Hencky[20] la cual permite determinar la extensión que experimenta el fluido al transitar a través de la contracción, obteniendo así la ecuación 1.8-15 de la sección 1.8 del presente trabajo.

La viscosidad es graficada contra la rapidez de corte con el fin de comprenderla variación tanto de la viscosidad cortante como la viscosidad extensional que presenta el fluido viscoelástico ya que el aumento o disminución de la viscosidad

extensional es el resultado de la fuerte alineación de las micelas del fluido hacia la contracción, como se mencionó en la sección 3.

Desde el punto de vista reológico la rapidez de corte es grande cuando la viscosidad cortante del fluido Viscoelástico se desarrolla con mayor intensidad; la causa de este aumento en la rapidez de corte se debe a la presencia de interacciones intermoleculares mismas que permiten una mayor deformación del fluido, sin embargo, al desarrollarse la viscosidad extensional con mayor intensidad, quiere decir que el fluido está presentando interacciones intramoleculares, lo que denota que dichas interacciones intramoleculares no permiten la deformación del fluido.

De igual forma la diferencia con las geometrías analizadas anteriormente, es debido a la geometría de la contracción hiperbólica, ya que al hacer convergentes las líneas de corriente hacia la contracción, la viscosidad extensional es favorecida sobre la viscosidad cortante sin embargo al ser un fluido de características adelgazantes a valores altos de rapidez de corte, la viscosidad del fluido comenzará a disminuir favoreciendo así el desarrollo de la viscosidad cortante.

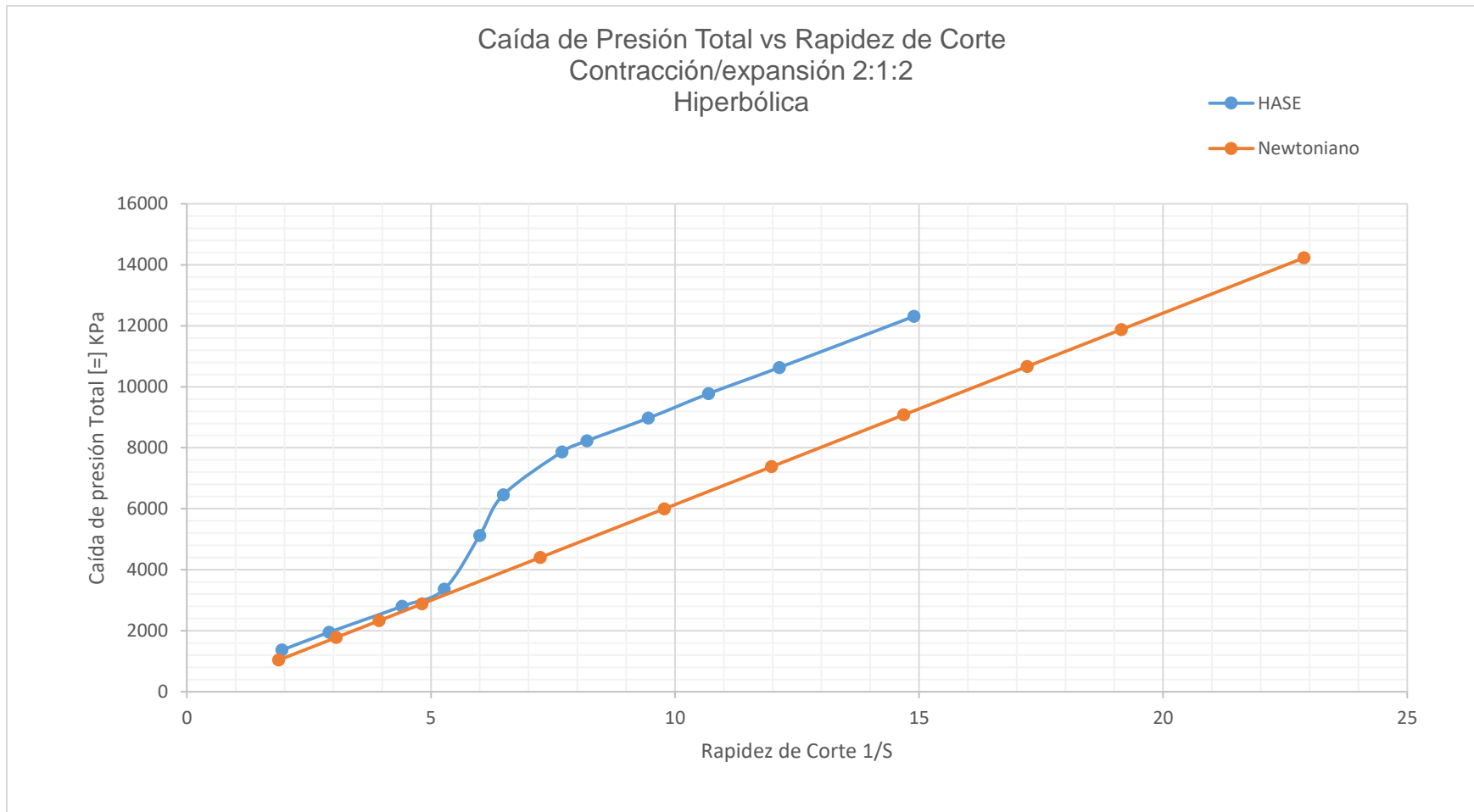


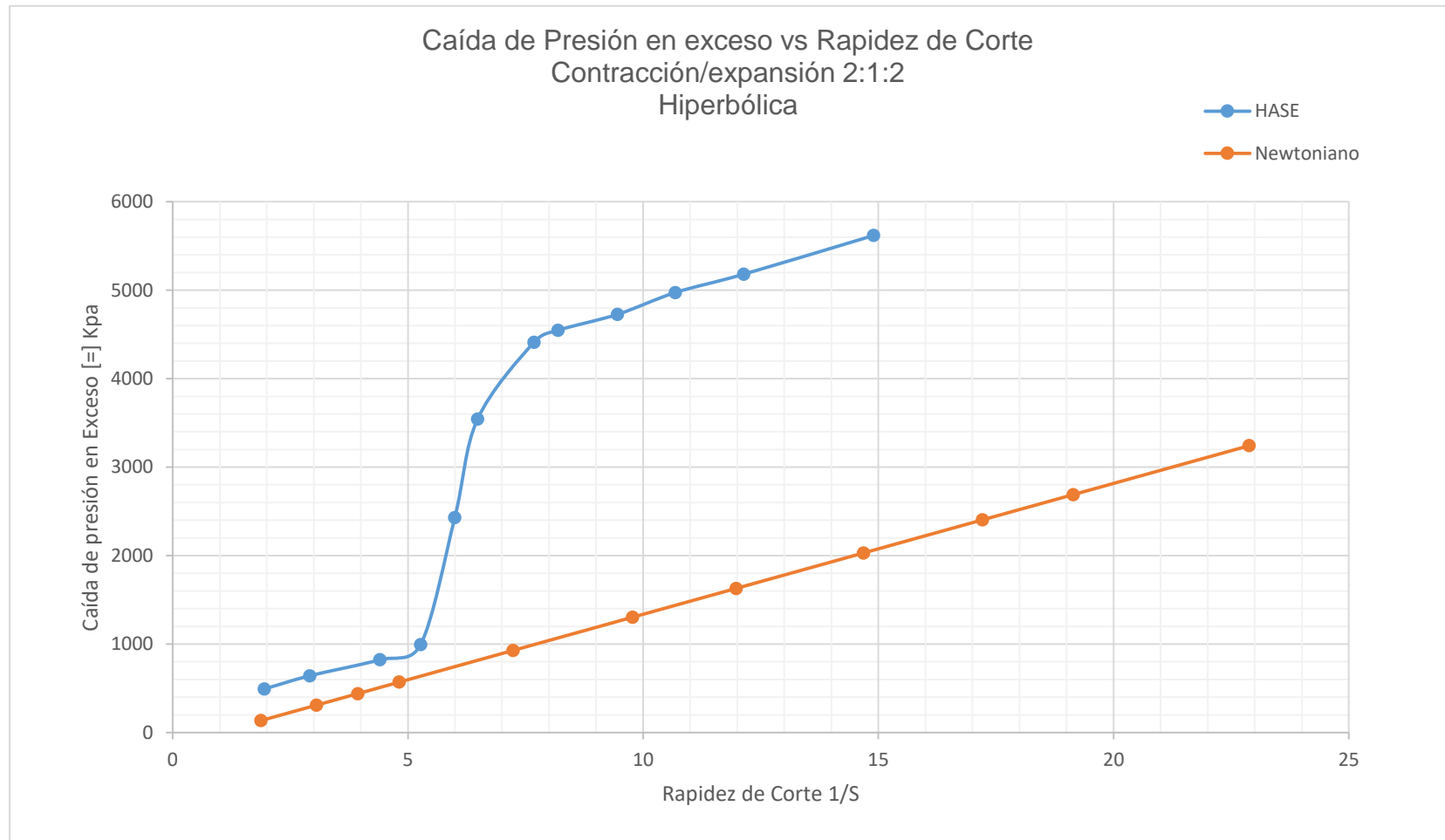
Figura5.1-16 Caída de presión total vs rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)

El presente gráfico permite visualizar los efectos viscoelásticos y viscosos que presentan los fluidos al ingresar al sistema de contracción.

Como podemos observar al inicio de la experimentación a valores de rapidez de corte pequeños el fluido viscoelástico se mueve sobre la línea del fluido Newtoniano la causa de ello es que a tales valores de rapidez de corte sobre el fluido los efectos viscosos son más intensos como consecuencia de la interacción del fluido con las paredes de la contracción posterior a la entrada de la misma, dichos efectos viscosos van disminuyendo hasta alcanzar el diámetro más pequeño de la contracción, debido a la disminución de área superficial y al aumento progresivo en la rapidez de corte, dando paso a las propiedades viscoelásticas del fluido, ya que a partir de un valor de rapidez de corte de 5 s^{-1} se hacen presentes los efectos viscoelásticos como consecuencia de la extensión diferencial que experimenta el fluido desde que entra hasta que llega a la zona máxima de contracción

Un fluido Newtoniano no presenta propiedades elásticas, por lo tanto dicho fluido simboliza una caída de presión basada en efectos viscosos, por ende cuando el fluido viscoelástico se mueve sobre la línea de tendencia del fluido Newtoniano es debido a que presenta el desarrollo de propiedades viscosas sobre las propiedades elásticas; la razón de tales valores de rapidez de corte y efectos viscosos alcanzados antes de presentar elasticidad en la contracción hiperbólica es debido al cambio diferencial del diámetro de la contracción, lo que genera este cambio es una condición de extensión en la línea central del flujo que se mantiene hasta llegar al diámetro más pequeño de la contracción, donde una vez el fluido ha sido direccionado hacia la contracción se intensifican los efectos elásticos favoreciéndose los mismos en el sistema. Un punto que vale la pena resaltar dentro de este análisis es que debido al redireccionamiento de las líneas de corriente hacia la contracción el desarrollo de los efectos elásticos se hacen más presente, esto se debe a la fuerte interacción del fluido con las paredes del sistema que intensifica el desarrollo de efectos viscosos muy agudos, lo cual favorece el direccionamiento de las líneas de corriente hacia la contracción beneficiando con ello los efectos elásticos en la zona de contracción al inicio, medio y fin de esta.

Observando el desarrollo de propiedades elásticas en el fluido HASE, se puede observar en el intervalo de rapidez de corte de 5 a 6.2 s^{-1} una zona de transición, la cual va de propiedades viscosas a propiedades viscoelásticas, donde la tendencia de la línea comienza a ascender y alejarse de las propiedades viscosas dejando ver el desarrollo de propiedades viscoelásticas, hasta alcanzar un punto máximo a un valor de rapidez de corte de 6 s^{-1} , donde a partir de este el desarrollo de propiedades elásticas se presenta de forma lineal como consecuencia de la dificultad que presenta el fluido a deformarse a medida que aumenta la rapidez de corte.



5.1-17 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)

El presente gráfico permite vislumbrar el desarrollo del flujo extensional y los efectos de entrada sobre el mismo con respecto al flujo cortante desarrollado por el fluido newtoniano.

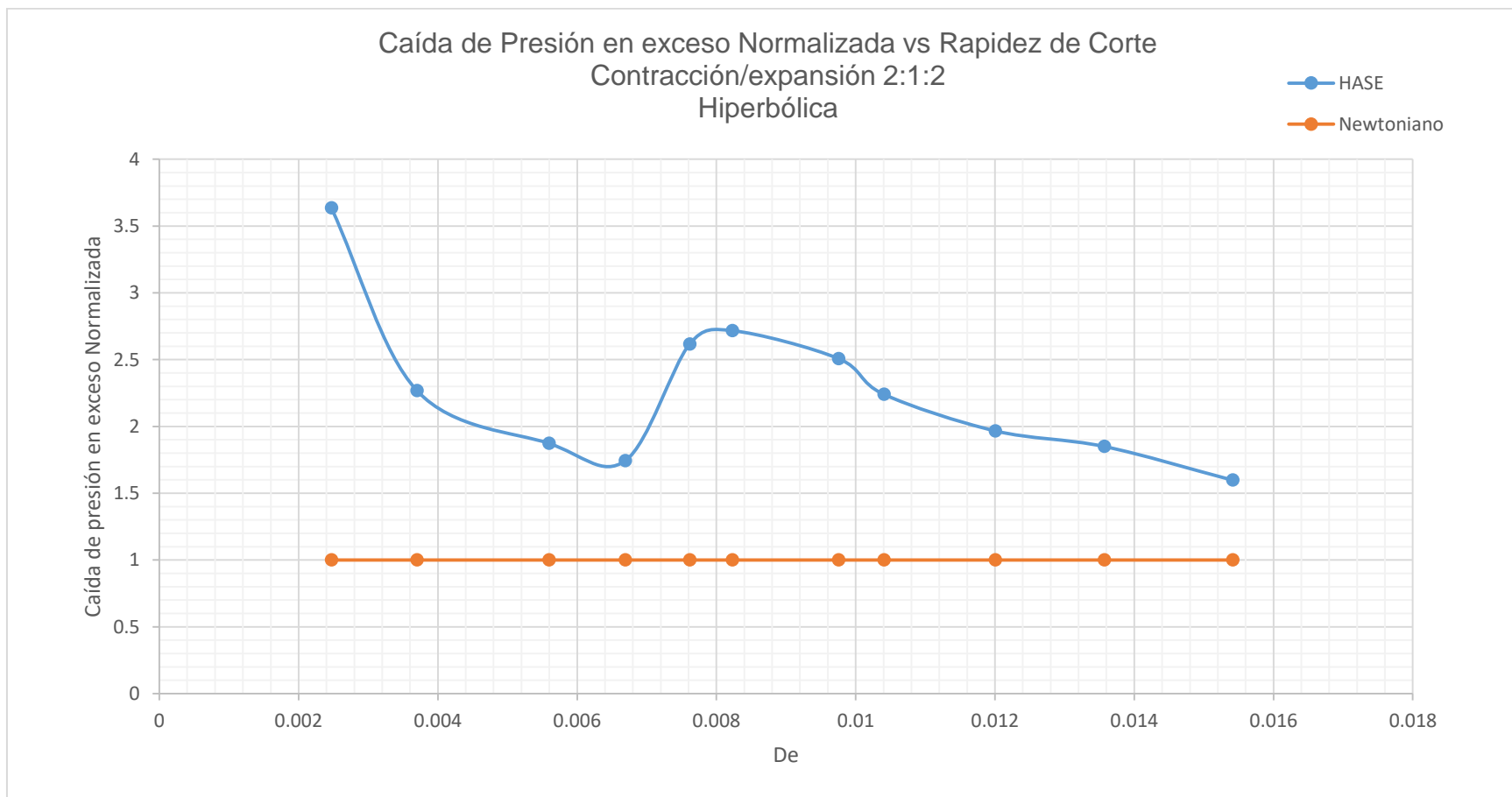
Es posible observar que el fluido manifiesta a valores iniciales de rapidez de corte el favorecimiento en la intensidad del flujo extensional, debido a la tensión que presenta el fluido dentro y a la entrada del sistema de contracción y como se mencionó con anterioridad en contracciones pasadas debido a la dificultad que presenta el fluido a la entrada de la contracción por efectos de la geometría empleada.

A partir del valor de rapidez de corte de 5.26 s^{-1} el fluido comienza a manifestar con mayor intensidad el flujo extensional, esta zona de transición se debe a la manifestación de un flujo predominantemente cortante a uno predominantemente extensional pues, siguiendo la reología del fluido en la sección 2.6 figura 2.6-2 del presente trabajo, a tal valor de rapidez de corte el fluido ya presenta elasticidad, misma que aumenta al tiempo que lo hace la rapidez de corte, como consecuencia de la dificultad que presenta el fluido a deformarse proporcional al aumento en la rapidez de corte. A un valor de rapidez de corte de 7.68 s^{-1} la presencia del desarrollo del flujo extensional se presenta de una forma lineal, sin embargo, en comparación con los valores alcanzados en el análisis de caídas de presión en exceso, estos son menores en la presente figura analizada, como consecuencia de la alta influencia que tiene el desarrollo del flujo cortante en el cuerpo de la contracción.

Como ya se mencionó la causa de que el desarrollo del flujo extensional se favorezca en la contracción hiperbólica figura 5.1-17 es debido a la geometría empleada; la explicación de ello es que en dicha geometría el flujo extensional a lo largo de la línea central es altamente favorecido a mayores valores de rapidez de corte debido a que, como se mencionó en la sección 1.7 del presente trabajo, esta geometría orienta las líneas de corriente del flujo hacia un área menor en relación al área por la que ingresa, generando un flujo con líneas de corriente convergentes

hacia la línea central lo que Intensifica los esfuerzos extensionales y con ello el desarrollo del flujo extensional en la línea central.

Lo que permite el desarrollo de líneas de corriente convergentes dentro de la contracción es que a diferencia de las contracciones axisimétrica y cuadrada el cambio de área por la cual transita el fluido de una mayor a una de menor tamaño no es abrupto como en las geometrías ya mencionadas axisimétrica y cuadrada, sino que en la contracción hiperbólica este cambio es gradual y diferencial permitiendo que el fluido dirija sus líneas de corriente hacia la contracción favoreciendo así el desarrollo del flujo extensional en la misma.



5.1-18 Caída de presión en exceso Normalizada vs Número de Deborah (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)

Como se mencionó en las geometrías anteriores axisimétrica y cuadrada el presente gráfico denota la presencia de la competencia del flujo cortante y extensional en el sistema, empleando como referencia las propiedades viscosas del fluido Newtoniano que genera el desarrollo del flujo cortante al transitar el mismo a través del sistema, así cuando la tendencia del fluido viscoelástico HASE se mueva sobre la línea del fluido Newtoniano este estará desarrollando la presencia del flujo cortante.

Como puede observarse la presente contracción figura 5.1-18 es altamente favorecedora del desarrollo del flujo extensional pues en ningún momento se aprecia que la línea de tendencia del fluido viscoelástico se mueva sobre la línea del fluido Newtoniano, sin embargo, la tendencia de la línea tiene un peculiar comportamiento, en cuanto a los valores de caída de presión en exceso Normalizada que presenta, dicho comportamiento se atribuye a la composición y estructura del polímero asociativo empleado HASE.

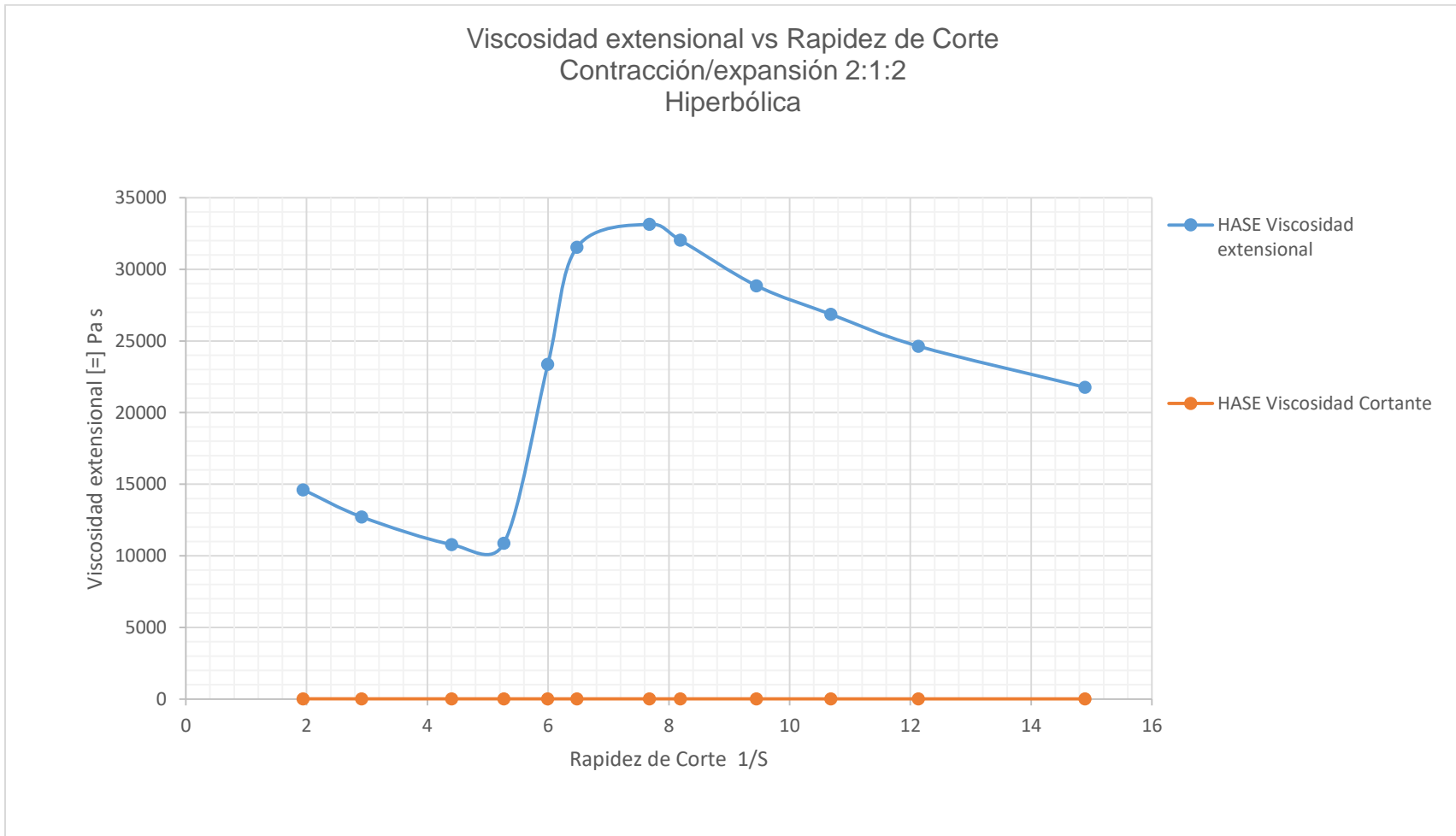
La explicación de dicho comportamiento del fluido desde el punto de vista estructural es que en un principio el fluido a valores bajos de rapidez de corte desarrolla un comportamiento extensional con bastante intensidad alcanzando un valor de caída de presión en exceso Normalizada de 3.6 debido principalmente al intenso desarrollo del flujo cortante a la entrada del fluido en la contracción, por ello a pesar de que se presenta el desarrollo del flujo extensional este no es tan intenso ya que a valores de rapidez de corte bajos la influencia del desarrollo del flujo cortante es grande lo que provoca que la línea de tendencia vaya en descenso, a pesar de ello el flujo cortante favorece el desarrollo del flujo extensional. La razón por la cual el desarrollo del flujo cortante favorece en un alto porcentaje el desarrollo del flujo extensional, es debido al redireccionamiento de las líneas de corriente hacia la línea central del desarrollo de flujo en la contracción, aunado a ello la estructura micelar del fluido tiene alta injerencia en el desarrollo del dominio de flujo, ya que a esta se atribuye la alta intrusión del flujo cortante sobre el sistema, debido a la formación de interacciones intermoleculares las cuales permiten una fácil deformación del fluido.

A partir del primer punto mínimo, es posible observar una zona de transición pues la competencia entre flujos va del dominio de flujo cortante a un flujo extensional dicha transición se explica de la siguiente forma, la estructura micelar del fluido va de interacciones intermoleculares a interacciones intramoleculares, lo cual favorece el desarrollo del flujo extensional pues las interacciones intramoleculares dificultan la deformación del fluido dentro del sistema, favoreciendo así el desarrollo del flujo extensional con respecto al cortante hasta alcanzar un punto máximo con valor de 2.71 en valores de caída de presión en exceso normalizada.

Posterior al punto máximo los valores de caídas de presión en exceso Normalizada comienzan a descender debido al adelgazamiento que se da como consecuencia de la formación de interacciones intramoleculares pasando a interacciones intermoleculares debido a la extensión que presenta el fluido y a la interacción del fluido viscoelástico con las paredes del sistema alcanzando un mínimo con un valor de 1.7 en caída de presión en exceso Normalizada.

A partir del punto máximo la línea de tendencia del fluido comienza a descender, la causa de ello es que a pesar de que el flujo extensional se desarrolla con intensidad, el flujo cortante también va en ascenso como se muestra en la figura 1.5-17 lo que genera que la línea de tendencia vaya hacia abajo, pues tomando en cuenta el consiente que representa la caída de presión en exceso Normalizada el cual es la caída de presión en exceso del fluido viscoelástico entre la caída de presión en exceso del fluido Newtoniano, el crecimiento ascendente del denominador provoca que los valores alcanzados en dicho consiente sean menores.

de nuevo debido a que se ha pasado de interacciones intramoleculares a interacciones intermoleculares, ya que la interacción que presenta el fluido con las paredes del sistema se hace más presente favoreciendo este tipo de interacciones intermoleculares lo que permite que el fluido se deforme con mayor facilidad, sumado a ello la tendencia de la línea no se recupera y sigue descendiendo debido a la fuerte injerencia del adelgazamiento del fluido hasta alcanzar un punto mínimo de 1.5 en caída de presión en exceso Normalizada.



5.1-19 Viscosidad extensional vs Viscosidad cortante del fluido HASE (Contracción hiperbólica Relación de contracción 2:1:2)

El presente gráfico nos permite vislumbrar el desarrollo del crecimiento de la viscosidad extensional del fluido sobre la viscosidad cortante del mismo donde la línea naranja representa el desarrollo de la viscosidad cortante del fluido y la línea azul la viscosidad extensional del fluido viscoelástico; con el fin de observar la disminución o crecimiento de la viscosidad extensional a diferentes valores de rapidez de corte, si la línea azul se mueve sobre la línea naranja estará denotando la disminución de la viscosidad extensional y el aumento en la viscosidad cortante del fluido.

Como podemos observar la geometría empleada favorece el desarrollo de la viscosidad extensional desde un inicio de la experimentación pues en ningún momento la línea azul se mueve sobre la línea naranja y por ende no se desarrolla el crecimiento de la viscosidad cortante.

A pesar del desarrollo de la viscosidad extensional, en ella se observan valores máximos y mínimos desarrollados en el sistema. El primer mínimo alcanzado se da a un valor de 10879.11 KPa s de viscosidad, debido a la interacción que sufre el fluido al aumentar la rapidez de corte lo que ocasiona dentro de la estructura micelar interacciones intermoleculares las cuales permiten que el fluido se deforme con facilidad, asociado a ello para tales valores de rapidez de corte, siguiendo la reología del fluido en la figura 3.1-2 este ya presenta adelgazamiento lo que propicia que los valores de viscosidad bajen hasta dicho valor mínimo.

A partir del valor mínimo alcanzado antes mencionado el fluido comienza a desarrollar una viscosidad extensional más grande alcanzando un valor máximo de 33148.63 KPa s de viscosidad extensional en dicha zona de transición al aumentar la rapidez de corte las interacciones intermoleculares pasan a segundo plano, pues la rápida convergencia de las líneas de corriente del fluido hacia la contracción propician el desarrollo de interacciones intramoleculares, mismas que dificultan la deformación del fluido y con ello favorecen el desarrollo de la viscosidad extensional debido a la fuerte alineación de las micelas en dirección a las líneas de corriente de flujo hacia la contracción. No obstante a partir del punto máximo ya mencionado el fluido comienza disminuir su viscosidad ya que, siguiendo la reología del fluido en

la figura 2.6-2 a este valor de rapidez de corte el fluido ya presenta una fuerte injerencia del adelgazamiento del mismo como consecuencia de la fuerte interacción del fluido con las paredes del sistema, favoreciendo el desarrollo de interacciones intermoleculares mismas que favorecen la deformación del fluido propiciando el adelgazamiento del mismo, hasta alcanzar un valor mínimo de 21163.97 KPa s de viscosidad extensional.

En comparación con la figura 5.1-4 (Axisimétrica, recordando que no es posible hacer una comparación con la geometría cuadrada ya que no hay estudios previos de dicho parámetro viscosidad extensional en investigaciones de la misma índole), debido a que los valores de rapidez de corte alcanzados las geometrías distan mucho entre ellos, ambas no son comparables, sin embargo, es posible mencionar que el desarrollo de la viscosidad extensional se favorece desde el inicio de la experimentación en ambas geometrías.

Es de importancia observar que en la geometría axisimétrica en un intervalo de 0.031 a 0.037 de valores de rapidez de corte existe un alto crecimiento de la viscosidad extensional sin variaciones significativas lo que supone el seguimiento del desarrollo del flujo extensional uniaxial homogéneo el cual se desarrolla en una pequeña proporción de la contracción, a diferencia de la contracción hiperbólica en la cual solo se puede seguir de manera indirecta el desarrollo del flujo extensional uniaxial no homogéneo.

Concluyendo así que la contracción hiperbólica favorece el desarrollo de la viscosidad extensional e indirectamente el desarrollo del flujo extensional no homogéneo y la contracción axisimétrica de igual forma favorece el desarrollo de la viscosidad extensional, sin embargo, en ella se puede seguir indirectamente el desarrollo del flujo extensional uniaxial homogéneo.

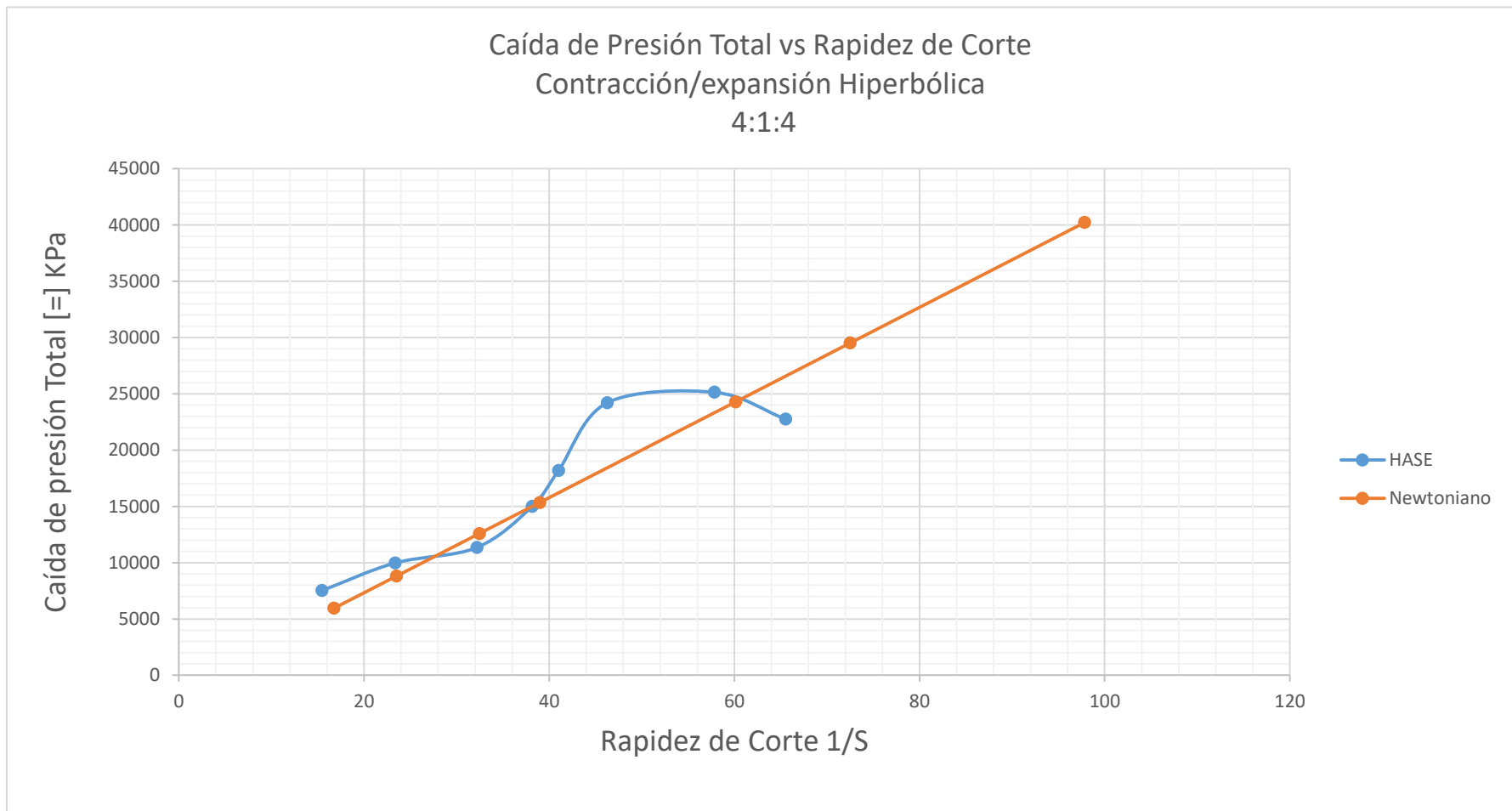


Figura 5.1-20 Caída de presión Total vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)

En el presente gráfico el fluido HASE, al inicio de la experimentación presenta caídas de presión totales por encima de las que se obtuvieron del fluido Newtoniano lo cual se entiende como una alta contribución de la elasticidad del fluido al inicio de la experimentación ya que observando la reología del fluido en la figura 2.6-2 a tales valores de rapidez de corte el fluido ya presenta elasticidad, no obstante, al aumentar los valores de rapidez de corte es posible observar una zona de transición en la cual el desarrollo de los efectos viscosos se hacen presentes, esto se debe a que el fluido al ingresar a la contracción, experimenta una aceleración gradual lo que obliga al fluido a tener una mayor interacción con las paredes del sistema lo que provoca la orientación de las líneas de corriente del fluido hacia la línea central de la contracción, dicha interacción provoca que el fluido a tales valores de rapidez de corte comience a adelgazar, y por ende los valores de caída de presión total pasen por debajo de la línea de tendencia del fluido Newtoniano lo que supone una fuerte contribución de los efectos viscosos del fluido como consecuencia de la fuerte interacción del fluido con las paredes antes mencionada, así el sistema alcanza un valor mínimo de 12186.95 KPa en caída de presión total, no obstante a partir de dicho valor mínimo alcanzado es posible observar una segunda zona de transición la cual va del desarrollo de propiedades viscosas a propiedades viscoelásticas lo cual se da una vez que las líneas de corriente fueron direccionadas hacia la contracción nuevamente lo que favorece el desarrollo de propiedades elásticas del fluido pues siguiendo la reología del mismo este ya presenta elasticidad, dichas propiedades elásticas del mismo tienen una contribución importante, pues a mayor rapidez de corte estas se intensifican haciendo que la tensión a la que se somete el fluido crezca, alcanzando valores de caídas de presión totales tan altas que alcanza un valor máximo de 24205.44 KPa.

A pesar del alto valor alcanzado la injerencia de las propiedades viscosas, el adelgazamiento y con ello el cambio de interacciones moleculares de estructura del fluido impiden el crecimiento del desarrollo de efectos viscoelásticos del mismo, pues los valores de caída de presión total del fluido vuelven a alcanzar un valor mínimo de 22754 KPa como consecuencia de la fuerte interacción del fluido con las paredes del sistema.

En comparación con la figura 5.1-16, en esta el diámetro de la zona de contracción máxima es mayor 2 veces en comparación con la figura 5.1-20, siendo así la zona de contracción de la figura 5.1-20, 4 veces más pequeña lo que provoca que en la figura 5.1-20 se necesiten valores de rapidez de corte muy altos para poder lograr la deformación del fluido y con ello hacer que esta ingrese al sistema.

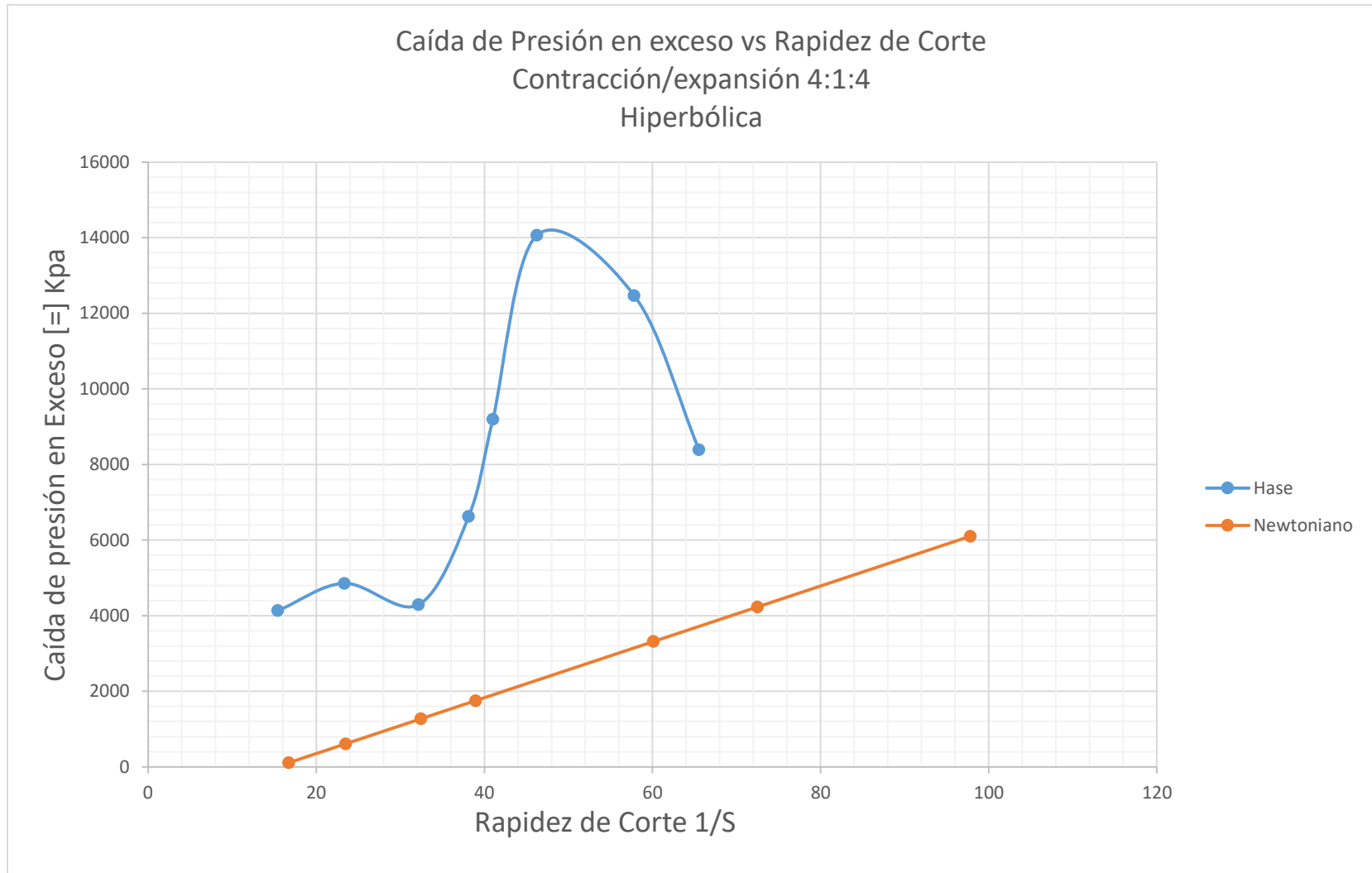


Figura 5.1-21 Caída de presión en exceso vs Rapidez de corte (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)

Siguiendo el desarrollo del flujo extensional la presente figura denota la presencia de este flujo desde un inicio de la experimentación denotando una importante contribución elástica al desarrollo del flujo pues, para tales valores de rapidez de corte el fluido ya presenta elasticidad, sin embargo, en la tendencia de la línea se muestran valores máximos y mínimos alcanzados.

La causa por la cual el fluido alcanza un valor mínimo de 4290.89 KPa mostrando una zona clara de transición es debido a la influencia del flujo cortante y el adelgazamiento del fluido dentro de la contracción, como consecuencia de la interacción del fluido con las paredes, donde este se hace presente aun cuando se desarrolla el flujo extensional, dicho comportamiento se atribuye al desarrollo del flujo cortante en el sistema que a valores pequeños de rapidez de corte favorece el desarrollo del flujo extensional. A partir de dicho punto mínimo el flujo extensional vuelve a tomar fuerza mostrando una segunda zona de transición alcanzando un máximo de 14065.50 KPa en valores de caída de presión en exceso debido a que siguiendo la reología del fluido viscoelástico, a mayores valores de rapidez de corte la elasticidad del fluido aumenta considerablemente, cabe mencionar que el direccionamiento de las líneas de corriente convergentes hacia la contracción disminuye la dificultad que presenta el fluido al ingresar en la contracción sin embargo, favorece el desarrollo de esfuerzos extensionales lo que propicia mayores valores de caída de presión en exceso, es importante mencionar que, siguiendo la reología del fluido en la figura 3.1-2 a pesar de que el fluido ya comienza a presentar adelgazamiento este alcanza valores altos de caídas de presión como consecuencia del desarrollo del flujo extensión, no obstante a partir del punto máximo la tendencia de la línea de fluido HASE desciende hasta alcanzar un valor de 8389.7 KPa mostrando una tercer zona de transición como consecuencia del adelgazamiento que presenta el fluido debido al desarrollo del flujo cortante posterior al diámetro más pequeño de la contracción. Cabe mencionar que el descenso en la figura 5.-21 es debido a los fuertes enlaces que presenta el desarrollo del flujo extensional en el fluido dando paso así al desarrollo del flujo cortante cambiando estructuralmente el tipo de interacción dentro de las micelas que va de interacciones intramoleculares a intermoleculares.

En comparación con la figura 5.1-16 el fluido alcanza mayores valores de caída de presión en exceso, no obstante, en la presente figura debido a la disminución del área transversal de la contracción lo que representa una mayor dificultad del fluido al entrar en la misma pudiéndose observar dicho efecto en valores de caídas de presión en exceso más altos.

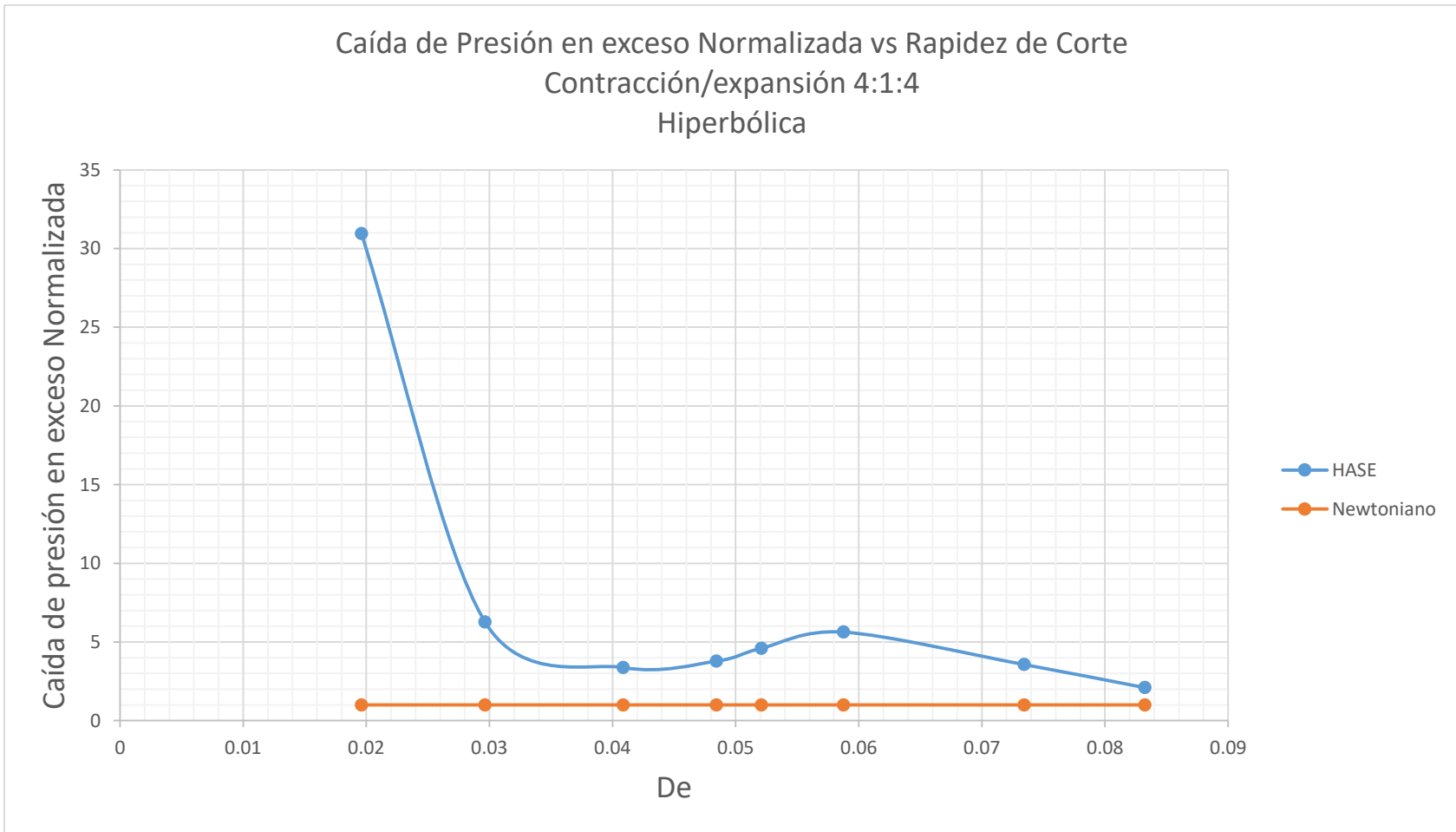


Figura 5.1-22 Caída de presión en exceso normalizada contra Número de Deborah (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)

En el presente gráfico muestra la competencia entre el flujo extensional con respecto al flujo cortante, analizando la trayectoria del fluido viscoelástico la tendencia de la línea inicia en valores altos de caídas de presión en exceso Normalizadas, dejando ver el desarrollo del flujo extensional en mayor proporción con respecto al flujo de la línea naranja que representa el flujo cortante que desarrolla el fluido Newtoniano, sin embargo los valores de caídas de presión en exceso Normalizadas comienzan a descender alcanzando valores sobre la línea del fluido Newtoniano denotando con ello que el desarrollo del dominio de flujo va, de un dominio extensional hasta un dominio cortante.

En el presente gráfico es notoria una zona de transición la cual va de el desarrollo de flujo predominantemente extensional a predominantemente cortante, la causa de dicho descenso se puede explicar desde la estructura micelar del fluido viscoelástico, pues debido a la presencia del desarrollo del flujo cortante a valores bajos de número de Deborah, es favorecido el direccionamiento de líneas de corriente convergentes hacia la contracción, dicho direccionamiento ayuda a alinear a las moléculas micelares formando y fortaleciendo el desarrollo de interacciones intramoleculares, dichas interacciones dificultan la deformación del fluido por ende, al inicio de la experimentación es posible observar valores altos de caídas de presión en exceso normalizada y con ello el desarrollo del flujo extensional, sin embargo, a mayor número de De , el fluido en dicha transición pasa de interacciones intramoleculares a interacciones intermoleculares lo que permite una fácil deformación del fluido denotando la presencia del dominio cortante sobre la dinámica del fluido como consecuencia de dichas interacciones alcanzadas, a partir de un valor de número de Deborah de 0.04 es posible observar que la línea de tendencia tiene valores ascendentes hasta alcanzar un valor máximo a un valor de número de De de 0.06, estos valores ascendentes se dan como consecuencia de la presencia del dominio del flujo extensional sobre el cortante del fluido Newtoniano debido a la elasticidad del fluido, estructuralmente se ha pasado de interacciones intermoleculares a intramoleculares mismas que dificultan la deformación del fluido lo que favorece el desarrollo del flujo extensional, a partir de dicho valor máximo la tendencia de la línea vuelve a disminuir debido a que siguiendo la reología del fluido

este comienza a presentar adelgazamiento debido al desarrollo del flujo cortante, haciendo que los valores de caídas de presión en exceso Normalizada del fluido viscoelástico sean tan bajos que alcancen una respuesta y valores similares de caídas de presión en exceso Normalizada que alcanzaría un fluido Newtoniano comprendiendo así que el adelgazamiento del fluido se presenta debido a la interacción con las paredes y por ende el desarrollo del flujo cortante inhibe el crecimiento del flujo extensional.

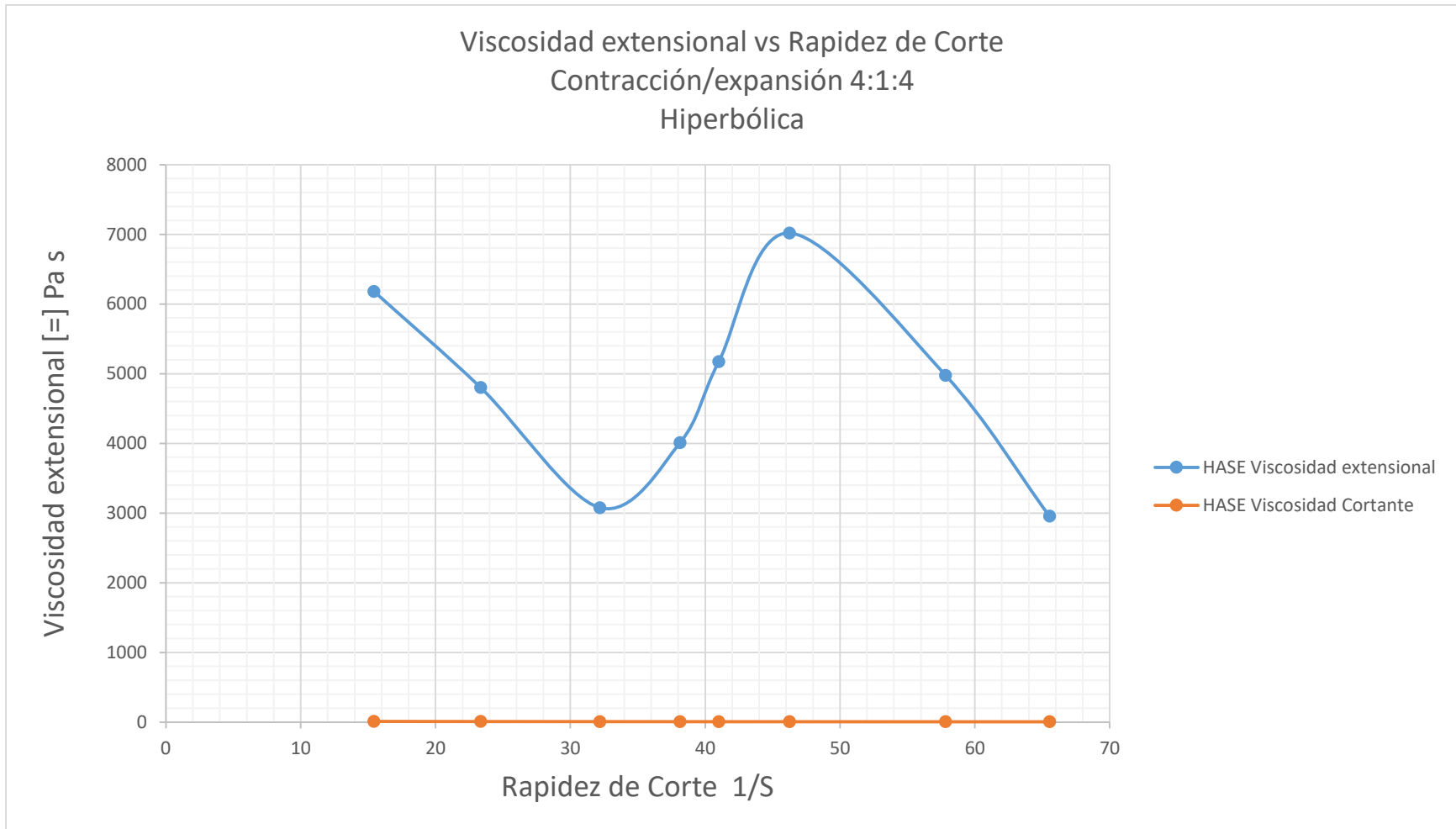


Figura 5.1-23 Viscosidad extensional contra viscosidad cortante del fluido viscoelástico HASE (Contracción hiperbólica Relación de contracción 4:1:4)

La dinámica que presenta el fluido Viscoelástico HASE, denota el favorecimiento del desarrollo del flujo extensional a causa de la geometría empleada.

El fluido viscoelástico inicia con un valor de viscosidad extensional alto sin embargo, al aumentar la rapidez de corte es posible observar una primera zona de transición donde el fluido presenta adelgazamiento mismo que propicia que los valores de viscosidad caigan hasta un valor mínimo de 3077.8 KPa s la causa de ello es que al aumentar el valor de rapidez de corte, el fluido comienza a ser sometido a mayor interacción del fluido con las paredes del sistema, esto se ve reflejado ya que la línea de tendencia va en descenso, la causa de ello es que se manifiesta la primer diferencia de esfuerzos normales en corte por lo cual la componente radial interactúa fuertemente con la componente extensional inhibiendo el crecimiento del flujo extensional y por ende el desarrollo de la viscosidad extensional en la línea central del flujo.

A partir de dicho punto mínimo la línea de tendencia del fluido viscoelástico vuelve a mostrar una segunda zona de transición en la cual alcanza un valor de viscosidad extensional máximo, hasta un valor de 7018.38 KPa s, la causa de ello es debido al fuerte direccionamiento de las moléculas micelares hacia la contracción al aumentar el valor de rapidez de corte, lo que favorece el desarrollo de las interacciones intramoleculares del fluido lo cual dificulta la deformación del mismo y beneficia el desarrollo de la viscosidad extensional, no obstante una vez alcanzado este punto máximo la línea de tendencia del fluido vuelve a descender mostrando una tercer zona de transición alcanzando un valor mínimo de 2954.8 KPa s, como consecuencia de la fuerte injerencia que tiene el adelgazamiento del fluido mismo que se puede observar en la reología del fluido en la figura 3.1-2 y a la presencia del dominio gradual de la viscosidad cortante.

En comparación con la figura 5.1-19 los valores de viscosidad extensional alcanzados en la figura 5.1-23 son mucho menores, la causa de ello es debido a la disminución del área transversal ya que al disminuir está el diámetro al que es sometido el flujo dentro del sistema disminuye 4 veces del tamaño del diámetro de la contracción 5.1-19 lo que provoca que la interacción del fluido con las paredes

sea menor así como el desarrollando en mayor porcentaje de la viscosidad extensional, ya que si la interacción del fluido con las paredes del sistema es baja no es posible alcanzar valores de viscosidad extensionales mayores a los alcanzados en la figura 5.1-19.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar mediante experimentación la dinámica de un fluido viscoelástico (Polímero asociativo Hase 2.5%) de propiedades adelgazantes al corte y un fluido Newtoniano hecho a base de glucosa, mismos que se hicieron transitar a través de dos relaciones de contracción (2:1:2 y 4:1:4), donde cada contracción fue creada para tres geometrías (Axisimétrica, Cuadrada e Hiperbólica) estas fueron empleadas con el fin de poder comprender como es que la geometría de cada una afectó la dinámica en el desarrollo del flujo y variación de parámetros reológicos que se estudiaron.

Una vez analizando el comportamiento del fluido viscoelástico se determinó que la geometría hiperbólica favorece el crecimiento de cada uno de los parámetros reológicos (Caída de presión total, Caída de presión en exceso, Caída de presión en exceso Normalizada y Viscosidad extensional) con respecto a los presentados en el fluido newtoniano empleado, de lo cual se observó la gran injerencia que tuvo la geometría, la estructura micelar del fluido y la dinámica ejercida; con respecto a la manifestación de propiedades viscosas y elásticas del fluido viscoelástico y con ello el desarrollo del flujo extensional uniaxial.

A continuación, se describe con detalle los resultados obtenidos y el porqué del favorecimiento del desarrollo del flujo extensional uniaxial en la contracción hiperbólica. En relación con la caída de presión total, que es el primer parámetro reológico que permitió vislumbrar la presencia de propiedades viscosas y viscoelásticas en las dinámicas presentadas en cada geometría, se obtuvo lo siguiente; se determinó que la geometría que desarrolla con mayor intensidad la presencia de propiedades viscoelásticas, es la contracción hiperbólica, ya que la geometría axisimétrica mostró propiedades viscoelásticas asociadas a la caída de presión total ascendentes de manera constante, pero de menor intensidad que en la contracción hiperbólica. Por otro lado, la contracción cuadrada desarrolla valores de caídas de presión más altos que en la contracción axisimétrica mientras que, en comparación con la geometría hiperbólica, la contracción cuadrada mostró propiedades viscoelásticas con menor intensidad, estos resultados se presentan tanto en relaciones de contracción altas y bajas.

Con relación a la caída de presión en exceso, parámetro reológico que permitió ver el desarrollo del flujo extensional en la línea central, las tres geometrías desarrollan flujo extensional a relaciones de contracción alta sin embargo, la geometría que presentó con mayor intensidad el desarrollo de flujo extensional fue la contracción hiperbólica, mientras que la contracción cuadrada presentó dicho flujo con menor intensidad que en la geometría hiperbólica y una mayor proporción del desarrollo de flujo cortante sobre su trayectoria, por otro lado la contracción axisimétrica presenta el desarrollo de flujo extensional con una intensidad menor que la que se mostró en las geometrías mencionadas anteriormente.

Con relación a la caída de presión en exceso normalizada, parámetro reológico que permite vislumbrar la competencia entre el desarrollo del flujo extensional del fluido viscoelástico con respecto del desarrollo del flujo cortante del fluido Newtoniano, es posible observar que la geometría que mostró primero el desarrollo de flujo extensional a relaciones bajas de contracción, fue la contracción cuadrada en comparación con las geometrías axisimétrica e hiperbólica; mientras que a relaciones altas de contracción la única geometría que presenta el desarrollo del flujo extensional es la geometría hiperbólica.

Con relación a la viscosidad extensional uno de los objetivos que se siguió en este trabajo, fue el de encontrar en cuál de las geometrías se mostró la presencia del desarrollo del flujo extensional uniaxial homogéneo, siguiendo este indirectamente con el crecimiento de la viscosidad extensional, lo cual permitió determinar que la geometría que desarrolló del flujo extensional uniaxial homogéneo fue la contracción axisimétrica, sin embargo, aun cuando la contracción hiperbólica alcanza valores más altos de viscosidad extensional, esta no desarrolló en ningún momento la presencia del flujo extensional uniaxial puro.

En cuanto a la estructura física en las tres geometrías que son de tipo abruptas (cuadrada y axisimétrica) y gradual (hiperbólica), fue posible observar el inherente desarrollo de flujo cortante y extensional dentro del sistema, sin embargo, la contracción axisimétrica fue altamente favorecedora de esfuerzos extensionales mismos que permitieron el desarrollo de interacciones intramoleculares lo que

generó esfuerzos extensionales intensos, tan fuertes que fueron capaces de desarrollar el flujo extensional uniaxial homogéneo.

En cuanto a la geometría cuadrada esta es altamente favorecedora del desarrollo del flujo cortante en la contracción, debido al desarrollo del perfil de velocidades en 4 direcciones (x,y), una por cada cara de la contracción, lo que denotó una alta interacción del fluido con las paredes favoreciendo el desarrollo de interacciones intermoleculares proporcionando una fácil deformación del fluido.

La razón por la cual la geometría hiperbólica favoreció el desarrollo del flujo extensional uniaxial es debido a que esta proporcionó las condiciones necesarias para que se desarrollen las interacciones intramoleculares, ya que siendo del tipo gradual, permitió el direccionamiento de las líneas de corriente hacia la contracción gracias al cambio paulatino en el área transversal que presenta la estructura de la misma, favoreciendo con ello el fuerte direccionamiento de las moléculas micelares hacia la zona máxima de contracción lo que generó la presencia de interacciones hidrofóbicas intramoleculares, mismas que dificultan la deformación del fluido y con ello el favorecimiento del desarrollo del flujo extensional y las propiedades elásticas en la contracción.

Concluyendo así que si bien en las tres geometrías se desarrolla el dominio del flujo extensional uniaxial a relaciones altas (2:1:2) de contracción, en la geometría hiperbólica por lo ya mencionado se favorece la intensidad de dicho flujo, sin embargo a relaciones bajas (4:1:4) de contracción, solo en la geometría hiperbólica se aprecia en mayor proporción el desarrollo del flujo extensional uniaxial, la diferencia entre esta y las dos geometrías restantes (cuadrada y axisimétrica) es debido a que en las geometrías axisimétrica y cuadrada se desarrolla la presencia de la primer diferencia de esfuerzos normales, misma que inhibe el desarrollo del flujo extensional.

Referencias bibliográficas.

- [1] H.Tan, K. V. (13 de 12 de 1999). *Journal of Non Newtonian Fluid Mchanics*.
Obtenido de www.elsevier.com/locate/jnnmf
- [2] S.Dai, K. T. (28 de 12 de 1999). *Microstructure of Dilute Hydrophobically Modified Alkali Soluble Emulsión in Aqueous Salt Solution*. Obtenido de 2000 American Chemical Society Published on web .
- [3] Jonathan P. Rothstein, G. H. (6 de Junio de 1999). *Extensional flow of a polystyrene Boger fluid through a 4 : 1 : 4*. Elsevier Science B.V. All rights reserved., 28.
- [4] Nguyen G.H. and Boger D.V., *The Kinematics and Stability of die entry flows*, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 5 (1979) 353-368.
- [5] Cable P.J. and Boger D.V., *A Comprehensive Experimental Investigation of Tubular Entry Flow of Viscoelastic Fluids, Part II. Vortex Characteristic in Stable Flow*, *AIChE Journal.* 24 (1978) 992.
- [6] P. Szabo 1, J. R. (1997). *Start-up of flow of a FENE-fluid through a 4:1:4 constriction in. J. Non-Newtonian Fluid Mech*, 14.
- [7] COGSWELL, F. N. (1972). *Measuring the Extensional Rheology*. *Transactions of the society of Rheology of Polymer Melts*, 21.
- [8] A. B. Metzner, F. B. (1980). *REHOLOGY. Proceedings of the Eighth International Congress of Rheology*, 785.
- [9] Macosko, C. W. (1994). *Rehology Principles measurements and applications* .
NEW YORK CHICHESTER * WEINHEIM * BRISEANE SINGAPORE TORONTO:
WILEY-VCH.
- [10] M. A. Alves, F. T. (2005). *Visualizations of Boger Fluid Flows in a 4:1*.
American Institute of Chemical Engineers, 15.
- [11] P.C. Sousaa, P. C. (2009). *Three-dimensional flow of Newtonian and Boger fluids in square–square*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 122.
- [12] Rawlinson, K. W. (1982). *On some contraction flows for Boger fluids*.
Rheologica Acta, 6.
- [13] Middleman, S. *Fundamentals of polymer processing*. McGraw-Hill, 1977.
- [14] Kevin M., *Estudio experimental comparativo de la dinámica de flujo en contracción/expansión en geometrías axisimétrica y cuadrada de fluidos complejos. Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México (2017)*.

- [15] *Flow of low viscosity Boger fluids through a microfluidic hyperbolic contraction.* (2011). *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 12.
- [16] Collyer, A. (1996). *Rheology and*. Chapman & Hall in: *Printed on permanent acid-free text paper, manufactured in*.
- [17] Pérez M., *Estudio experimental de fluidos complejos en flujo contracción/expansión. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México* (2016).
- [18] LIdTFOOT, R. B.-W.-E. (1987). *Fenomenos de transporte. Barcelona: Reverté, S.A., Barcelona, España.*
- [19] Cable P.J. and Boger D.V., *A Comprehensive Experimental Investigation of Tubular Entry Flow of Viscoelastic Fluids, Part II. Vortex Characteristic in Stable Flow, AIChE Journal.* 24 (1978) 992.
- [20] Ober T.J., Haward S.J., Pipe C.J., Soulages J., McKinley G.H., *microfluidic extensional rheometry using a hyperbolic contraction geometry. Rheol. Acta* 52 (2013) 529-546.
- [21] SOCHI T. *"THE FLOW OF NEWTONIAN FLUIDS IN AXISYMMETRIC CORRUGATED TUBES" UNIVERSITY COLLEGE LONDON* (2010)
- [22] TABATABAEI S., LÓPEZ AGUILAR J.E., TAMADDON-JAHROMI H.R., WEBSTER M.F., WILLIAMS R., (2015) *"MODIFIED BAUTISTA-MANERO (MBM) MODELING FOR HYPERBOLIC CONTRACTION-EXPANSION FLOWS" RHEOL. ACTA* 54 869-885