



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN
REÓMETRO CAPILAR A CONDICIONES DE ALTA
PRESIÓN Y TEMPERATURA**

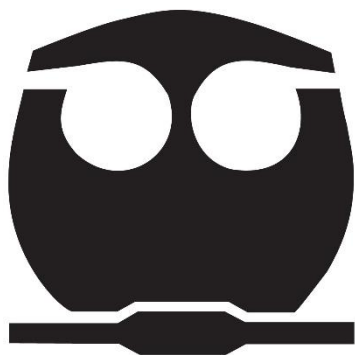
TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

MIGUEL ANGEL DORANTES PALOMARES



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: ANTONIO VALIENTE BARDERAS

VOCAL: EDUARDO VIVALDO LIMA

SECRETARIO: SIMÓN LÓPEZ RAMÍREZ

1er. SUPLENTE: BERNARDO CARREÓN CALDERÓN

2do. SUPLENTE: DANIEL BOBADILLA OCAMPO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO L-106 DEL CONJUNTO F, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

SIMÓN LÓPEZ RAMÍREZ _____

SUPERVISOR TÉCNICO:

CECILIA DE LOS ÁNGELES DURÁN VALENCIA _____

SUSTENTANTE:

MIGUEL ANGEL DORANTES PALOMARES _____

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto emprendido por la Facultad de Química de la UNAM, "Proceso de recuperación mejorada con la tecnología de inyección de químicos (ASP) con la aplicación mediante prueba piloto en el campo Poza Rica" con financiamiento por parte del Fondo Sectorial SENER-CONACYT-Hidrocarburos, por brindar la oportunidad de desarrollo profesional al facilitar las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

PREFACIO

El presente trabajo, así como la fabricación, validación y experimentación fueron obtenidos como uno de los entregables del proyecto de investigación emprendido por la Facultad de Química de la UNAM, "Proceso de recuperación mejorada con la tecnología de inyección de químicos (ASP) con la aplicación mediante prueba piloto en el campo Poza Rica", con financiamiento por parte del Fondo Sectorial SENER-CONACYT-Hidrocarburos, en el cual el autor participó realizando prácticas profesionales durante el periodo (abril 2014 – agosto 2015), servicio social (agosto 2015 – febrero 2016), estancia académica (febrero 2016 – junio 2016) y por último en la titulación por examen profesional en su modalidad de tesis.

La experiencia obtenida en la estadía en la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera, permitió al autor obtener los conocimientos y práctica necesaria (en diseño, ejecución de experimentos, adquisición de datos y análisis de resultados) para la construcción, desarrollo y validación de un reómetro capilar, el cual es un instrumento muy versátil y que tiene la particularidad de permitir el estudio reológico de los fluidos bajo diferentes condiciones de flujo, temperatura y presión.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	- 1 -
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	- 2 -
1.1 PREÁMBULO	- 2 -
1.2 OBJETIVO.....	- 3 -
1.3 JUSTIFICACIÓN	- 3 -
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	- 5 -
2.1 ANTECEDENTES DE REOLOGÍA	- 5 -
2.2 VISCOSIDAD	- 6 -
2.3 CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS FLUIDOS	- 7 -
2.3.1 FLUIDOS NEWTONIANOS.....	- 10 -
2.3.2 FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.....	- 11 -
2.4 REGIONES DEL FLUJO EN TUBERÍA	- 14 -
2.5 GENERALIDADES DE LA REOLOGÍA DE SISTEMAS POLIMÉRICOS	- 15 -
2.5.1 EFECTO DE LA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN.....	- 16 -
2.5.2 EFECTO DEL TAMAÑO DE LA CADENA	- 18 -
2.5.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA	- 19 -
2.5.4 EFECTO DE LA PRESIÓN	- 19 -
2.6 MODELADO DE LA VISCOSIDAD	- 20 -
2.6.1 MODELO DE BINGHAM.....	- 20 -
2.6.2 MODELO DE OSTWALD-DE WAELE	- 21 -
2.6.3 MODELO DE HERSHEY-BULKLEY.....	- 22 -
2.7 ECUACIONES GENERALES DE FLUJO LAMINAR	- 23 -
2.7.1 ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS NEWTONIANOS	- 27 -
2.7.2 ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	- 29 -
2.8 DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE RABINOWITSCH Y MOONEY	- 31 -
2.9 ESTUDIO DE FLUJO EN CAPILARES.....	- 34 -
2.10 PATRONES DE FLUJO MULTIFÁSICO AGUA-ACEITE	- 35 -
CAPÍTULO 3 DISEÑO	- 38 -
3.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	- 38 -
3.2 CILINDROS PORTA MUESTRA.....	- 45 -
3.3 SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO.....	- 47 -
3.4 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	- 48 -
3.5 SENSORES DE PRESIÓN	- 49 -
3.6 EQUIPO DE CÓMPUTO Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	- 50 -
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....	- 53 -
4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	- 53 -
4.1.1 DIAGRAMA GENERAL	- 55 -
4.1.2 (1)- ENCENDIDO DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES	- 56 -
4.1.3 (2)- CARGA DE MUESTRA, CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTO.....	- 57 -
4.1.4 (3)- ESTUDIO REOLÓGICO A FLUJO CONSTANTE	- 58 -
4.1.5 (4)- PURGA Y LIMPIEZA	- 59 -
4.1.6 (5)- APAGADO DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES	- 60 -
4.1.7 (6)- INTERCAMBIO DE CILINDROS PORTA MUESTRA.....	- 61 -
4.2 METODOLOGÍA ANALÍTICA.....	- 62 -
CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN	- 68 -
5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	- 68 -
5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN CFD	- 83 -
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	- 87 -
REFERENCIAS	- 89 -
ANEXO 1 EFECTO DE EXTREMOS.....	- 91 -
ANEXO 2 EFECTO DE DESLIZAMIENTO	- 93 -
ANEXO 3 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	- 94 -
ANEXO 4 IT10 ACONDICIONAMIENTO DE CILINDROS PORTA MUESTRA	- 99 -
ANEXO 5 HOJAS DE SEGURIDAD	- 105 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fotografía de vista superior del reómetro capilar.	- 3 -
Figura 2 Fotografía del tubo utilizado en el reómetro capilar.	- 4 -
Figura 3 Fluido entre placas paralelas (Bird et al., 2006).	- 8 -
Figura 4 Clasificación de los fluidos (León Loya et al., 1986).	- 9 -
Figura 5 Reograma general de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos (Bird et al., 2006).	- 13 -
Figura 6 Simulación computarizada de vectores de velocidad de un flujo en capilar.	- 14 -
Figura 7 Bloques de Mega Blocks © CC0 Uso libre Creative Commons pixabay.com	- 17 -
Figura 8 Diagrama de geometría de control para flujo en tubería.	- 25 -
Figura 9 Tubo doblado.	- 39 -
Figura 10 Vista superior (izquierda) y lateral del doblado (derecha).	- 39 -
Figura 11 Válvula de 3 vías.	- 40 -
Figura 12 Ferrules y tuercas de 3/8".	- 40 -
Figura 13 Lámina de acero inoxidable utilizada en el sistema de calentamiento.	- 41 -
Figura 14 Esquema general de la estructura principal del reómetro capilar.	- 44 -
Figura 15 Diagrama de cilindro porta muestra (proserv.com, s.f.) y fotografía.	- 45 -
Figura 16 Bomba Quizix modelo QX-6000®.	- 47 -
Figura 17 Conceptualización del diseño y trabajo final del recipiente.	- 48 -
Figura 18 Tablero de control de temperatura (izquierda) y resistencia eléctrica (derecha).	- 49 -
Figura 19 Sensor de presión Crystal Pressure® XP2i.	- 49 -
Figura 20 Equipo de cómputo y adaptador de puertos.	- 50 -
Figura 21 Software PumpWorks 7.07 ®.	- 52 -
Figura 22 Reómetro Capilar V3.	- 52 -
Figura 23 Emulsión Marcol 82 con agua destilada.	- 53 -
Figura 24 Ejemplo de organización de flujos en pestañas.	- 62 -
Figura 25 Ejemplo de columnas para organización de datos.	- 62 -
Figura 26 Ejemplo de curvas experimentales a flujo de 1mL/min.	- 63 -
Figura 27 Ejemplo de diferencia de presión entre manómetros.	- 63 -
Figura 28 Ejemplo de tabla-resumen de diferencial de presión.	- 64 -
Figura 29 Gráfica de pendiente entre cada punto con respecto a rapidez de corte(izquierda). Gráfica de esfuerzo de corte con respecto a rapidez de corte (derecha).	- 66 -
Figura 30 Ejemplo de gráfica $\ln \dot{\gamma}$ (1/s) en función de $\ln \tau$ (Pa).	- 66 -
Figura 31 Ejemplo de gráfica $\ln \mu_n$ en función de $\ln \dot{\gamma}$ (1/s).	- 67 -
Figura 32 Gráfica de τ (Pa) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1.	- 69 -
Figura 33 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1.	- 70 -
Figura 34 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1.	- 71 -
Figura 35 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.	- 72 -
Figura 36 Gráfica de τ (Pa) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2.	- 73 -
Figura 37 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2.	- 74 -
Figura 38 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2.	- 75 -
Figura 39 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.	- 76 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 40 Gráfica de τ (Pa) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 3.	- 77 -
Figura 41 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 3.	- 78 -
Figura 42 Gráfica de τ (Pa) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 4.	- 79 -
Figura 43 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 4.	- 80 -
Figura 44 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 4.	- 81 -
Figura 45 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte del Experimento 4 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.	- 82 -
Figura 46 Ejemplo de gráfica para la corrección de Bagley.	- 92 -
Figura 47 Ejemplo de malla en programa de CFD.	- 95 -
Figura 48 Ejemplo de condiciones de frontera.	- 95 -
Figura 49 Ejemplo de configuración de condiciones de la simulación.	- 96 -
Figura 50 Ejemplo de configuración de parámetros numéricos y algoritmos de solución.	- 96 -
Figura 51 Ejemplo de configuración de valores iniciales.	- 97 -
Figura 52 Gráfica de error en las ecuaciones de flujo en función del número de iteración (izquierda). Ejemplo de convergencia de la solución (derecha).	- 97 -
Figura 53 Ejemplo de simulación donde se muestra la velocidad local a lo largo de la geometría acotada por colores.	- 98 -
Figura 54 Cilindro porta muestra.	- 101 -
Figura 55 Barra de empuje, adaptador de back up ring y adaptador protector de cuerdas.	- 102 -
Figura 56 Adaptador protector de cuerdas.	- 102 -
Figura 57 Introducción del pistón al cilindro.	- 103 -
Figura 58 Empuje del pistón.	- 103 -

LISTA DE SIMBOLOS

o	Subíndice utilizado para indicar "inicial"
A	Área.
B	Ordenada al origen de la ecuación de una recta.
c	Constante.
d	Constante.
D	Diámetro total de una tubería.
F	Fuerza.
K	Índice de consistencia en los modelos de viscosidad.
k	Pendiente de la ecuación de una recta.
L	Longitud.
Le	Longitud extra de tubería en la Corrección de Bagley.
n	Índice de comportamiento en los modelos de viscosidad, en el método de Bagley indica la abscisa de una recta oblicua.
n'	Término para linealizar la ecuación de Rabinowitsch y Money.
n_N	Subíndice utilizado para indicar "de comportamiento no Newtoniano".
P	Presión.
Q	Flujo volumétrico total.
q	Flujo volumétrico diferencial.
R	Radio total de una tubería.
r	Radio diferencial de una tubería.
R^2	Coefficiente de determinación. En regresiones lineales coeficiente de Pearson.
Re	Número de Reynolds.
T	Temperatura absoluta.
V	Velocidad de un fluido.
u	Velocidad diferencial.
w	Subíndice utilizado para indicar "en la pared", en inglés, wall.
x	Coordenada x en un plano cartesiano.
y	Coordenada y en un plano cartesiano.
z	Coordenada z en un plano cartesiano.
γ	Rapidez de corte.
Δ	Delta de una variable.
η	Viscosidad aparente o variable.
μ	Viscosidad Newtoniana.
$\mu_{aparente}$	Viscosidad aparente o variable.
ρ	Densidad.
τ	Esfuerzo de corte.

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación reológica o constitutiva del fluido.	- 8 -
Ecuación 2. Proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte.	- 10 -
Ecuación 3. Variación de la viscosidad aparente en función del esfuerzo de corte y la rapidez de corte.....	- 11 -
Ecuación 4. Relación entre la viscosidad y la temperatura.	- 19 -
Ecuación 5. Modelo de Bingham.....	- 21 -
Ecuación 6. Modelo de Ostwald-De Waele.....	- 21 -
Ecuación 7. Modelo de Herschel- Bulkley.....	- 22 -
Ecuación 8. Ecuación constitutiva aplicada en flujo en tuberías.	- 24 -
Ecuación 9. Ecuación de esfuerzo de corte de flujo en tubería.	- 25 -
Ecuación 10. Ecuación de esfuerzo de corte en la pared.....	- 25 -
Ecuación 11. Ecuación de esfuerzo de corte en función de la distancia radial.	- 26 -
Ecuación 12. Perfil general de velocidades en el interior de la tubería.	- 26 -
Ecuación 13. Expresión general para el flujo laminar en una tubería.....	- 27 -
Ecuación 14. Ecuación de Hagen-Poiseuille para fluidos Newtonianos.....	- 28 -
Ecuación 15. Perfil de velocidad expresado en función de la velocidad promedio de fluidos Newtonianos.....	- 29 -
Ecuación 16. Rapidez de corte en la pared de tubería para fluidos Newtonianos.	- 29 -
Ecuación 17. Relación entre el flujo volumétrico y la caída de presión en términos de la velocidad promedio para fluidos no Newtonianos.....	- 30 -
Ecuación 18. Perfil de velocidad para fluidos no Newtonianos.	- 31 -
Ecuación 19. Rapidez de corte en la pared de la tubería para fluidos no Newtonianos.	- 31 -
Ecuación 20. Ecuación de Rabinowitsch y Mooney.....	- 32 -
Ecuación 21. Pendiente de la función lineal entre el esfuerzo y la rapidez de corte en la pared de la tubería en la Ecuación de Rabinowitsch y Mooney.	- 33 -
Ecuación 22. Rapidez de corte en la pared utilizando la Ecuación de Rabinowitsch y Mooney. .	- 33 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Rango de rapidez de corte característica de diversos procesos. (Carrasquero, 2004) Reproducción total o parcial autorizada para fines educativos.....	- 17 -
Tabla 2 Efecto de la masa molecular en las propiedades físicas de los materiales. (López Carrasquero, 2004) Reproducción total o parcial autorizada para fines educativos.	- 18 -
Tabla 3 Accesorios del reómetro capilar.....	- 42 -
Tabla 4 Accesorios del reómetro capilar.....	- 43 -
Tabla 5 Comparación de modelo del Experimento 1 con simulación en CFD.	- 84 -
Tabla 6 Comparación de modelo del Experimento 2 con simulación en CFD.	- 84 -
Tabla 7 Comparación de modelo del Experimento 3 con simulación en CFD.	- 85 -
Tabla 8 Comparación de modelo del Experimento 4 con simulación en CFD.	- 86 -

RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo la construcción de un reómetro capilar que consta de segmentos de diferente diámetro nominal (1/8", 1/4" y 3/8") colocados en serie, para la obtención del modelo reológico de 4 fluidos (2 disoluciones poliméricas de acrilamida y 2 emulsiones de Marcol 82 con agua destilada) a través de la determinación del esfuerzo de corte en función de la rapidez de corte.

Con la ayuda de la ecuación de Ostwald-De Waele, se generó un modelo reológico a partir de los datos experimentales de cada fluido y se comparó con una medición de referencia en un reómetro comercial marca TA Instruments® modelo DHR-3. Esta comparación arrojó desviaciones porcentuales máximas de 4.4%, 12%, 4% y 35% para los 4 modelos propuestos. Después se compararon con respecto a simulaciones de CFD¹ y las desviaciones porcentuales fueron menores de 13% en todos los casos. Las variaciones que se indican con respecto a las referencias (reómetro DHR-3 y simulaciones de CFD) se encuentran en el intervalo de rapidez de corte de 6 a 100 s⁻¹ que es donde se cuenta con datos experimentales para la validación.

El experimento con la mayor desviación (35%) destacó la ventaja del estudio de fluidos en capilares sobre los reómetros rotacionales como el DHR-3. Este resultado fue obtenido de una emulsión inestable, lo que provocó variaciones en el patrón de flujo y se observó una dependencia del comportamiento reológico de esta emulsión con respecto al aparato utilizado para su caracterización.

Se concluye que con este reómetro capilar es posible obtener el comportamiento reológico en procesos industriales o a escala de laboratorio, desde condiciones atmosféricas hasta 4,500 psi y de temperatura ambiente hasta 150 °C, en fluidos cuya viscosidad sea independiente del tiempo de deformación además de la capacidad de detectar la existencia de variaciones en patrones de flujo.

¹ Computational Fluid Dynamics o Mecánica de Fluidos Computacional.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 PREÁMBULO

La mecánica de fluidos se encuentra en actos tan cotidianos como respirar, o beber agua y donde se requiere necesariamente la circulación y el movimiento de fluidos. Si bien la mecánica de fluidos está siempre presente, hace falta conocer la forma en la cual se expresa esta información en términos cuantitativos para así diseñar y experimentar en sistemas controlados, para obtener información que pueda utilizarse para otros fines y facilitar la comprensión del medio natural, así como para mejorar los procesos de los cuales depende el mundo moderno.

Como menciona Martín Domingo (2011), la mecánica de fluidos es una ciencia especializada en el estudio del comportamiento de los fluidos en reposo y en movimiento. Proporciona fundamentos y herramientas para explicar o evaluar los procesos o mecanismos, así como para diseñar equipos y estructuras que trabajan con fluidos en diversas áreas tecnológicas.

Debido a la necesidad de estimar y predecir fenómenos de flujo, se han propuesto ecuaciones que rigen el movimiento de los fluidos y cómo interactúan con cuerpos sólidos. Estas ecuaciones, son una mezcla de teoría y experimentos que provienen por un lado de los trabajos fundamentalmente empíricos de los ingenieros, y por el otro, del trabajo de modelado por parte de matemáticos, que en el pasado abordaban el problema desde un enfoque analítico y principalmente ideal. Al integrar en una única disciplina las experiencias de ambos, se evita la falta de generalidad de las ecuaciones, derivada de un enfoque estrictamente empírico, válido únicamente para cada caso concreto, y al mismo tiempo se permite que los desarrollos analíticos matemáticos aprovechen adecuadamente la información experimental y eviten basarse en simplificaciones artificiales que en muchos casos, son alejadas de la realidad (León Loya et al., 1986).

1.2 OBJETIVO

Construir un reómetro capilar que permita identificar los cambios en el patrón de flujo de emulsiones a condiciones de alta presión y temperatura para determinar el comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Según Macosko (1994), un reómetro capilar es una excelente opción de bajo costo para obtener medidas de viscosidad en un proceso industrial o de laboratorio y con la instrumentación adecuada se pueden trabajar temperaturas y presiones elevadas.

Las mediciones se producen por el flujo del fluido en un canal cerrado que no tiene superficie libre en ningún momento del experimento, lo que elimina la posibilidad de evaporación de solventes, contaminación, reacciones de descomposición con el aire u otros problemas que existen habitualmente en los dispositivos con superficies libres. Además de que un reómetro capilar asemeja el proceso de flujo en tuberías y matrices de extrusión de polímeros por lo que es posible detectar cambios en los patrones de flujo.

En la **Figura 1** se muestra el reómetro capilar construido en este proyecto.

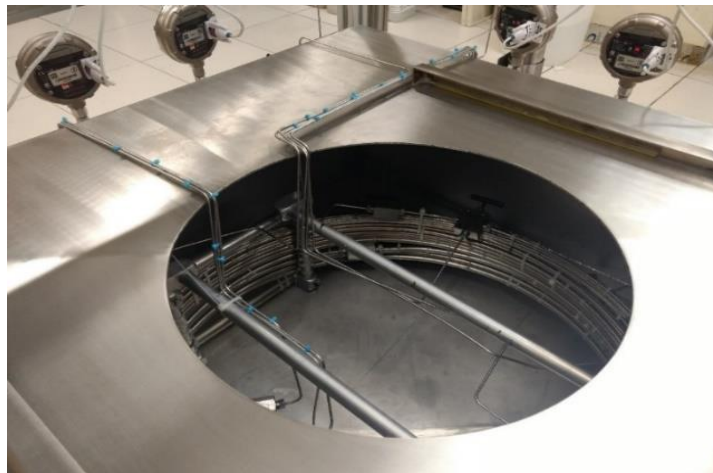


Figura 1 Fotografía de vista superior del reómetro capilar.

León Loya et al. (1986) afirman “Los reómetros capilares son relativamente baratos de construir y sencillos de operar. Y a pesar de su simplicidad, los datos más precisos de viscosidad disponibles son obtenidos de capilares muy largos.”

El diseño, desarrollo y validación del reómetro capilar se basa en los principios de los experimentos de Hagen y Poiseuille, que están fundamentados en el flujo de un fluido debido a una diferencia de presiones.

En la **Figura 2** se muestra el tubo del reómetro capilar.

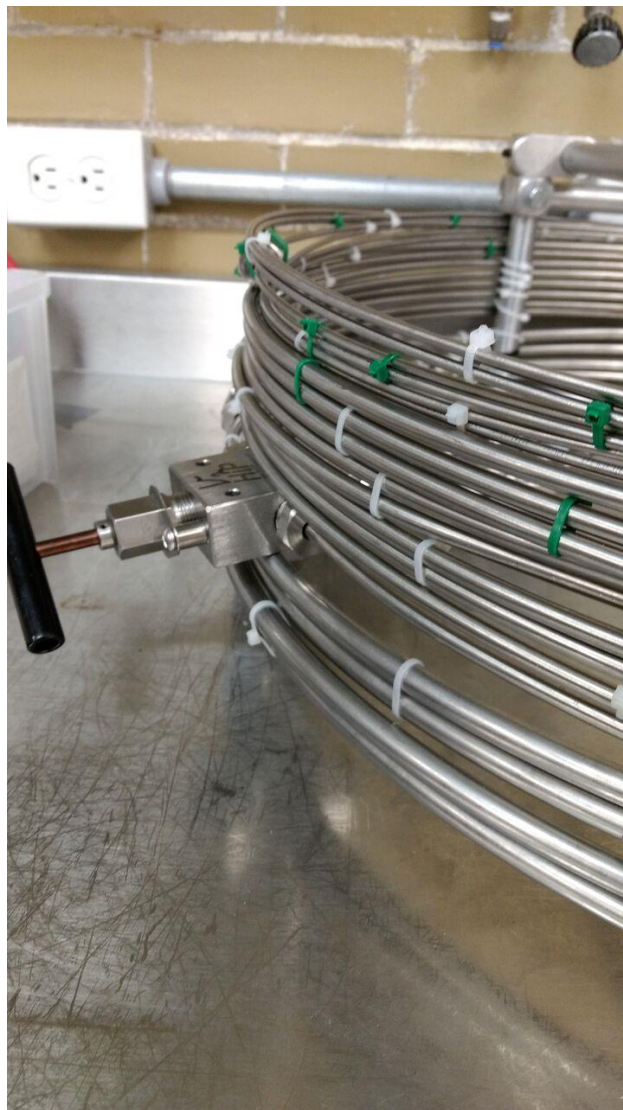


Figura 2 Fotografía del tubo utilizado en el reómetro capilar.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE REOLOGÍA

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de los materiales. Es la rama de la física que aborda la mecánica de los cuerpos deformables. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales.

El efecto de una deformación en un sistema puede ser dividida en dos tipos:

1. Una deformación espontáneamente reversible, que es llamada elasticidad.
2. Una deformación irreversible conocida como flujo.

El trabajo usado en deformar un cuerpo perfectamente elástico es recuperado cuando el cuerpo regresa a su forma original mientras que el trabajo usado para mantener un flujo es disipado como calor y no es mecánicamente recuperable. La elasticidad corresponde a una energía mecánicamente recuperable, en tanto que el flujo viscoso que provoca fricción corresponde a la conversión de energía mecánica en calor (León Loya et al., 1986).

El esfuerzo de corte es considerado un proceso en el cual se deslizan capas de fluido de espesor infinitesimal unas sobre otras como en un paquete de cartas. El movimiento entre planos es siempre referido como "corte" o "cizalla", en inglés "shear".

La deformación elástica es considerada como una función del esfuerzo, en tanto que el ritmo de deformación para el flujo es una función del corte.

Las ecuaciones diferenciales que describen los efectos viscoelásticos son expresadas generalmente con tres términos básicos:

1. Uno elástico que incluye la deformación.
2. Uno viscoso que incluye el ritmo de deformación.
3. Un término de inercia el cual incluye la aceleración.

Las propiedades mecánicas de todos los cuerpos pueden ser descritas en términos de las contribuciones elásticas, viscosas y de inercia.

Si la deformación es obtenida a un ritmo infinitamente lento no existirán los efectos viscosos o serán despreciables y solamente se manifestarán los efectos elásticos. Por otra parte, en un flujo continuo o estacionario a un ritmo uniforme no existirá la contribución elástica y el efecto total será viscoso (León Loya et al., 1986).

2.2 VISCOSIDAD

La viscosidad es una variable de gran influencia en las mediciones de flujo de fluidos. Es una propiedad de suma importancia en múltiples procesos industriales, ya que el valor de viscosidad se usa como punto de referencia en la formulación de nuevos productos, facilitando la reproducción de la consistencia de un lote a otro (Centro Nacional de Metrología, s.f.).

Batchelor (1980) menciona que las primeras mediciones de viscosidad se realizaron en 1839 y 1840 por Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen en Alemania y por Jean Léonard Marie Poiseuille en Francia usando tubos de diámetro capilar muy pequeño para medir la viscosidad del agua.

Con el desarrollo de la industria química, seguido por la aparición a gran escala de procesos de producción de polímeros, junto con otros materiales, como adhesivos, alimentos, cosméticos, plásticos, pinturas, fluidos biológicos, asfaltos, aceites, combustibles, etc., surgió un nuevo conjunto de materiales con un comportamiento de flujo fuera de lo normal, el cual no podía ser explicado únicamente por las leyes clásicas estudiadas hasta el momento.

En 1920 los estudios de tales materiales provocaron que Eugene Bingham acuñara el término 'Reología', del griego "ρεiv", fluir, que etimológicamente significa estudio del flujo y este fue aceptado en el año 1929, cuando se fundó la American Society of Rheology.

Algunos ejemplos de la importancia de la reología se dan en la industria petrolera, pues se utilizan aceites, mezclas o lodos de perforación cuyas propiedades reológicas permiten taladrar campos en busca de hidrocarburos. Se han hecho muchos estudios de reología de materiales textiles, pinturas, tintas de imprenta y materiales de recubrimiento. La industria del plástico emplea medidas reológicas en el control del tratamiento y en la evaluación de los productos terminados.

2.3 CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS FLUIDOS

Un fluido es una sustancia que tiende a fluir bajo la acción de un esfuerzo, no importa qué tan viscoso sea. Los esfuerzos entre las partículas vecinas o adyacentes son proporcionales a la rapidez de deformación. Este conjunto de partículas se mantiene unido por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente por lo que el término engloba a líquidos y gases.

Los fluidos son comúnmente clasificados de acuerdo con su comportamiento bajo la acción de un esfuerzo de corte y a la rapidez de corte inducida por dicho esfuerzo; por lo tanto, las características de flujo de un fluido se encuentran determinadas por su comportamiento ante el esfuerzo (Bird et al., 2006).

Para la definición de la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte se considera un sistema de dos placas de área A , paralelas y separadas por un fluido, como el mostrado en la **Figura 3** donde la placa superior se está moviendo con una velocidad $(u_x + du_x)$ y ejerce una fuerza F sobre el fluido.

La rapidez en la parte del fluido más cercana a la placa es la misma que la rapidez de ésta, por lo que el fluido sufrirá una deformación du/dy , la cual puede llamarse también rapidez de corte, γ .

El esfuerzo cortante τ , es la fuerza cortante F por área unitaria A , que perturba el fluido y causa movimiento.

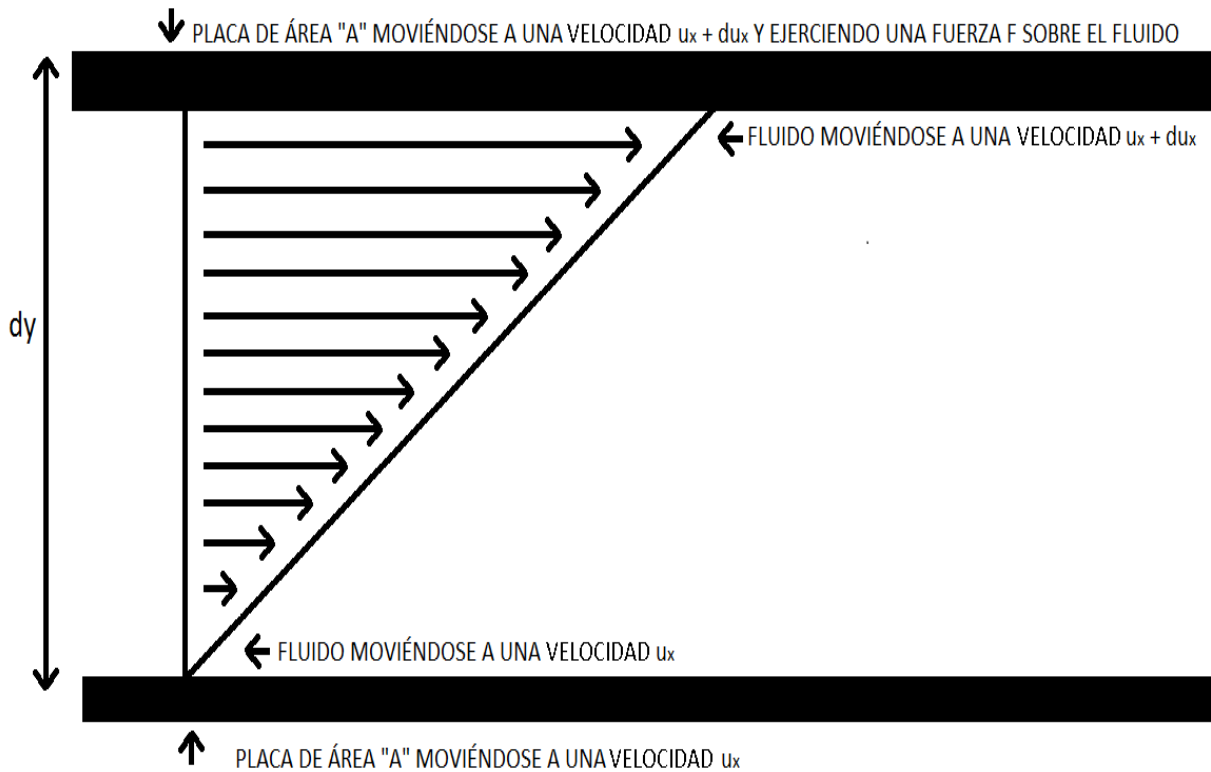


Figura 3 Fluido entre placas paralelas (Bird et al., 2006).

Por lo tanto, para cada fluido existe una relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte resultante. Dicha relación es diferente para todos los fluidos y varía para el mismo fluido bajo condiciones diferentes de presión y temperatura. Así la relación entre el esfuerzo de corte y rapidez de corte, **Ecuación 1**, es única para cada fluido y es característica para un fluido bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. Esta relación es conocida como la ecuación reológica o constitutiva del fluido (León Loya et al., 1986).

Ecuación 1. Ecuación reológica o constitutiva del fluido.

$$\tau = f(\gamma)$$

Esta relación entre esfuerzo y rapidez de corte muchas veces no es simple pues depende de otros factores propios de la naturaleza del fluido, como interacciones químicas entre partículas dispersas de un sistema, cambios de orientación de las partículas o moléculas en la dirección del flujo, etc.

De esta manera, los fluidos se clasifican en varios tipos, basados en la forma de sus ecuaciones reológicas, **Ecuación 1**, o en sus reogramas (representación gráfica de la **Ecuación 1**).

Los fluidos se clasifican en dos grupos: fluidos puramente viscosos y fluidos que exhiben propiedades viscosas y elásticas, llamados fluidos viscoelásticos.

En la **Figura 4**, se muestra una clasificación reológica de los fluidos.

Además, también los fluidos pueden ser clasificados en dos grandes grupos de acuerdo con su comportamiento bajo la acción de un esfuerzo cortante y a la rapidez de corte inducida: fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

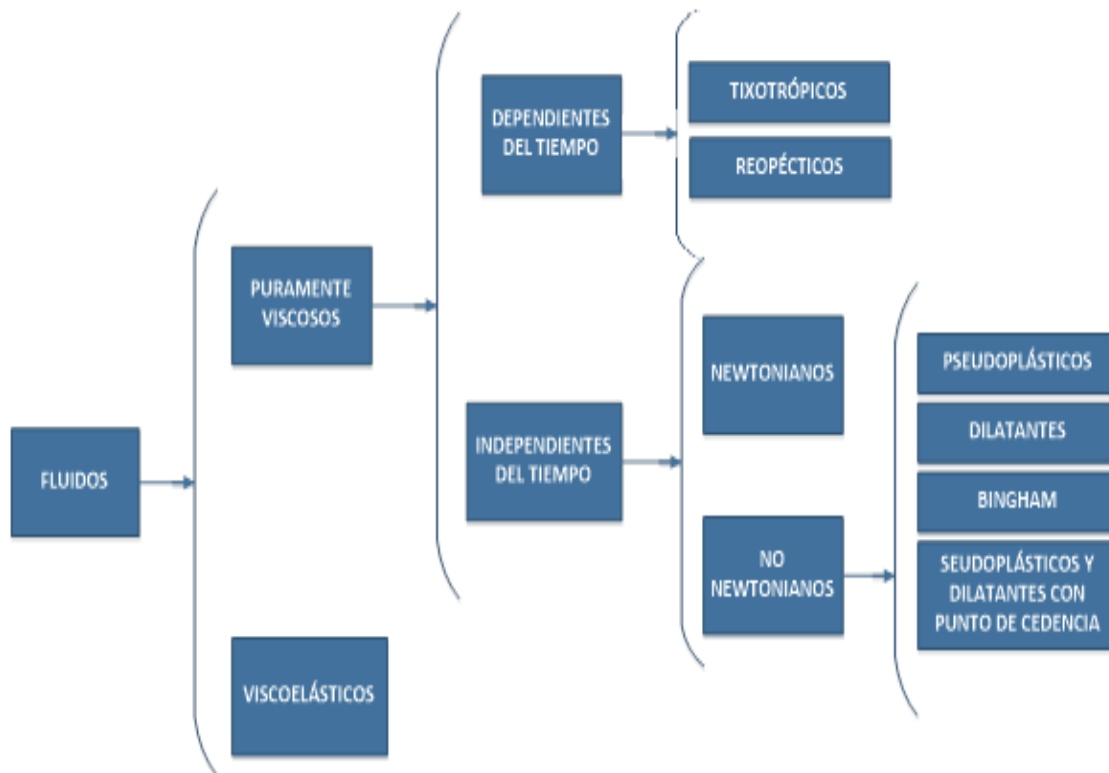


Figura 4 Clasificación de los fluidos (León Loya et al., 1986).

2.3.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Los fluidos Newtonianos se llaman así debido a que su comportamiento reológico es descrito con la Ley de Newton. Esto quiere decir que, bajo condiciones de flujo laminar, los fluidos Newtonianos tienen una relación directa entre el esfuerzo de corte aplicado y la rapidez de corte producida.

La constante de proporcionalidad, conocida como viscosidad, es suficiente para describir el comportamiento de flujo de este tipo de fluidos.

Matemáticamente, esta relación es expresada como:

Ecuación 2. Proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte.

$$\tau = \mu\gamma$$

donde μ es viscosidad, la cual permanece constante a cualquier rapidez de corte, siempre y cuando las propiedades del fluido permanezcan inalterables.

Gráficamente, esta relación puede ser observada en la **curva A** de la **Figura 5** en la cual el fluido Newtoniano está representado por una línea recta que pasa a través del origen y cuya pendiente es μ .

Únicamente es necesario realizar una determinación experimental de la rapidez de corte, a un solo valor de esfuerzo de corte aplicado, para definir completamente las propiedades reológicas de flujo laminar de un fluido Newtoniano. Algunos ejemplos de fluidos Newtonianos son todos los gases, líquidos de moléculas simples y suspensiones de partículas esféricas en gases y líquidos (Bird et al., 2006).

2.3.2 FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Los fluidos no-Newtonianos incluyen a todos los fluidos que no exhiben una proporcionalidad directa entre el esfuerzo cortante y la rapidez de corte.

Las propiedades de flujo de estos fluidos no pueden ser representadas por una sola constante como la viscosidad pues son necesarias al menos dos constantes para generar un modelo apropiado. Mediante la aplicación de la **Ecuación 1** a este tipo de fluidos, la constante de proporcionalidad deberá ser interpretada como una viscosidad aparente la cual es una función del esfuerzo de corte, la duración y en algunos casos de la magnitud de éste o de la deformación producida.

Por lo tanto, la viscosidad de los fluidos no-Newtonianos, aplicando la **Ecuación 2**, puede ser definida como:

Ecuación 3. Variación de la viscosidad aparente en función del esfuerzo de corte y la rapidez de corte.

$$\mu_{aparente} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

En la que el esfuerzo y la rapidez de corte deberán ser especificados.

A su vez, los fluidos no-Newtonianos pueden ser clasificados según Bird et al. (2006) y León Loya et al. (1986) en tres subgrupos:

- Independientes del tiempo: Estos fluidos se denominan así, debido a que sus propiedades reológicas no cambian con la duración del esfuerzo de corte.
 - a) Plásticos de Bingham: Es un tipo de fluido en el cual, se requiere de un esfuerzo cortante inicial para comenzar el movimiento. Una vez que dicho esfuerzo ha sido excedido, se produce una relación lineal entre el esfuerzo y la rapidez de corte (**curva B** de la **Figura 5**).
 - b) Pseudoplásticos: Son los fluidos en los cuales un esfuerzo cortante pequeño iniciará su movimiento y para el cual la tasa de incremento en el esfuerzo de corte disminuye cuando la rapidez de corte aumenta (**curva C** en la **Figura 5**).

c) Dilatantes: Son fluidos en los que un esfuerzo cortante pequeño iniciará su movimiento y a diferencia de los pseudoplásticos, a medida en que la rapidez de corte aumenta, aumenta la tasa de crecimiento del esfuerzo de corte (**curva D, Figura 5**).

Matemáticamente, el comportamiento de los fluidos dilatantes y pseudoplásticos es similar, por lo que las mismas ecuaciones empíricas desarrolladas para los pseudoplásticos se aplican a los fluidos dilatantes, con valores apropiados de sus constantes.

d) Pseudoplásticos y dilatantes con punto de cedencia: son aquellos fluidos que requieren un esfuerzo de cedencia inicial para comenzar con su movimiento, como en el caso de los fluidos plásticos de Bingham; pero la relación entre el aumento del esfuerzo de corte aplicado con la rapidez de corte producida no es lineal. Su comportamiento se asemeja a los fluidos pseudoplásticos y dilatantes (**curvas E y F de la Figura 5**)

- Dependientes del tiempo: Estos fluidos se caracterizan porque sus propiedades reológicas varían con la duración del esfuerzo y la rapidez de corte, dentro de ciertos límites. Es decir, su comportamiento reológico está influenciado por los cambios estructurales en el sistema, a la vez que el esfuerzo de corte observado a cualquier rapidez de corte específica variará con el tiempo hasta que se alcance el equilibrio estructural. Como en el caso de los fluidos pseudoplásticos, el equilibrio estructural depende del esfuerzo de corte y normalmente tiende a mejorar el alineamiento de las partículas y a reducir su resistencia al flujo cuando el esfuerzo cortante incrementa. Si la reformación estructural es del mismo orden de la deformación, el proceso puede ser considerado reversible. Todos los fluidos que muestran cambios pequeños en sus propiedades reológicas son generalmente clasificados como dependientes del tiempo.

Si el esfuerzo cortante disminuye con la duración del corte, el fluido es denominado tixotrópico; en tanto que, si el esfuerzo cortante aumenta con la duración del corte, se denomina reopéctico.

- Viscoelásticos: son así denominados debido a que recobran su forma después de la deformación a que han estado sujetos cuando cede la acción del esfuerzo cortante. Estos fluidos presentan características intermedias entre los fluidos puramente viscosos y sólidos puramente plásticos, especialmente la característica de deformación bajo la acción de un esfuerzo cortante y de retomar a su estado original cuando cesa la acción de dicho esfuerzo. Si la deformación ha sido demasiado grande, esta recuperación elástica puede ser parcial, o total, si la deformación ha sido pequeña.

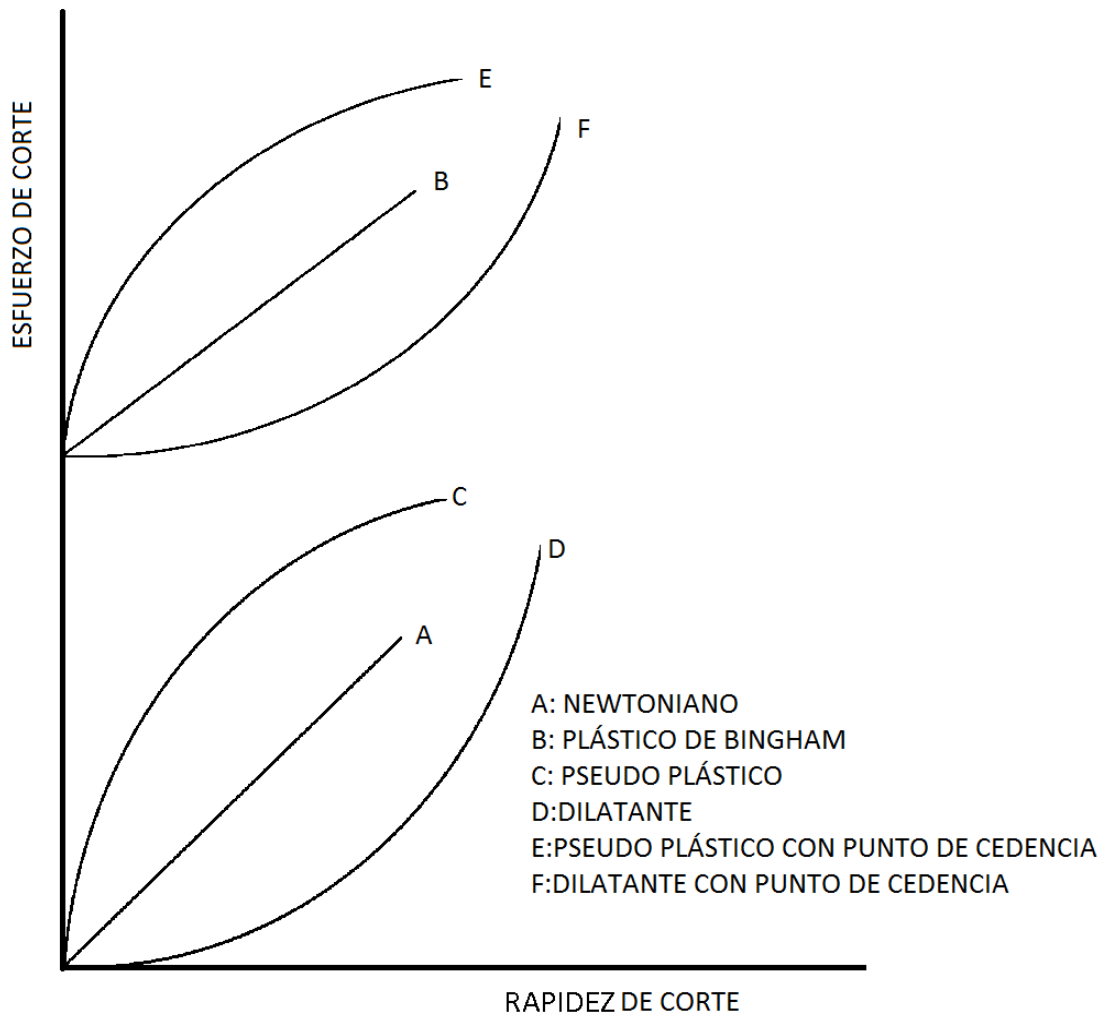


Figura 5 Reograma general de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos (Bird et al., 2006).

2.4 REGIONES DEL FLUJO EN TUBERÍA

Los experimentos de flujo a través de canales cerrados o tubos capilares consisten en hacer pasar un fluido que proviene comúnmente de un recipiente o de una unión (cople, niple, una válvula, etc.) con una dimensión distinta a la del capilar.

Según Sarenque Romero (1995) el comportamiento de flujo dentro de un sistema con estas características puede dividirse en tres regiones, como se muestra en la **Figura 6**.

1. **Entrada:** En esta región comienza la geometría del capilar y es el tramo en donde existe una mayor presión con respecto a las otras regiones, por lo que se desarrollan grandes esfuerzos en la contracción que encuentra el fluido a su paso.
2. **Flujo totalmente desarrollado:** Esta etapa del flujo del fluido es también conocida como región viscosimétrica y es aquella en la cual se supone que el flujo está totalmente desarrollado y por lo tanto existe un gradiente de presión constante en dirección del flujo. Esta es una región de gran interés, pues es donde se deben realizar las determinaciones de viscosidad
3. **Salida:** Esta última región se encuentra cercana a la salida del capilar, por lo que existe un cambio repentino de las condiciones de frontera al salir el fluido del capilar hacia la atmósfera o hacia una reducción o expansión en otro capilar de diámetro diferente.

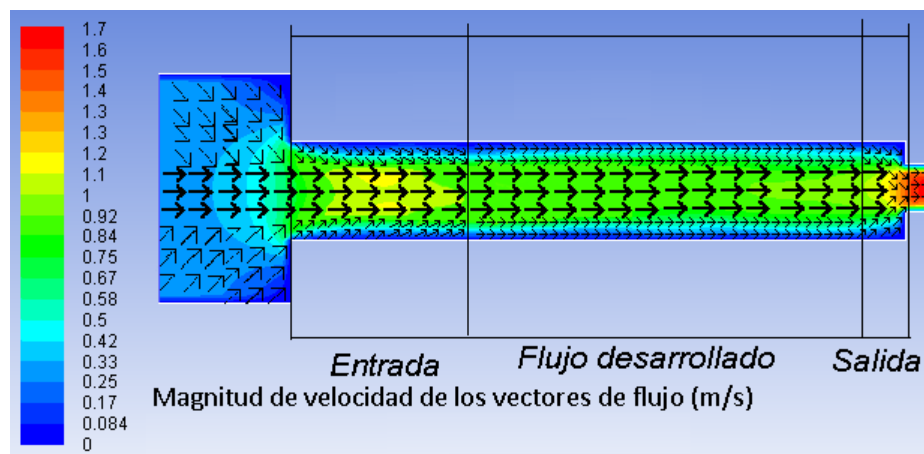


Figura 6 Simulación computarizada de vectores de velocidad de un flujo en capilar.

Por medio de ecuaciones de flujo en conductos circulares aplicadas a modelos reológicos, se pueden obtener las relaciones funcionales entre el gasto de flujo y las caídas de presión para determinar la viscosidad de un fluido por su comportamiento de flujo en un capilar, pero para esto, es fundamental garantizar la existencia de la región de flujo desarrollado.

En este trabajo los cocientes de longitudes del capilar entre los diferentes diámetros utilizados son muy superiores numéricamente a 50, por lo que se desprecian los efectos de extremos (entrada y salida) por lo cual no es necesario realizar una corrección en estas regiones².

2.5 GENERALIDADES DE LA REOLOGÍA DE SISTEMAS POLIMÉRICOS

Los polímeros son grandes moléculas que están formadas por la unión de muchas unidades repetitivas. Estos involucran uniones covalentes entre los átomos de carbono que constituyen la columna vertebral de la cadena polimérica.

Los polímeros se fabrican en varias formas tales como: plásticos sólidos, fibras, espumas, películas, recubrimientos y adhesivos. Estos materiales pueden ser duros o suaves, rígidos o flexibles, ahulados, cuerdos o vidriosos. Pueden ser producidos como materiales porosos o no porosos. Más aún, pueden ser producidos como espumas de bajo peso o reforzadas con diversos materiales de relleno tales como metal, vidrio, fibras de carbón o naturales para mejorar sus propiedades mecánicas (López Carrasquero, 2004).

Una de las propiedades únicas de los polímeros es la asociación por su gran tamaño, lo que conduce a interacciones considerables por las longitudes a lo largo de la cadena y de gran superficie.

² Los fundamentos para comprender este parámetro se explican en el Anexo 1. Efectos de extremos.

Durante el flujo del polímero, las moléculas tienden a deslizarse entre sí y también a desenrollarse. Cuando se retira la deformación, las moléculas tienden a enredarse nuevamente. Esto hace que presenten un comportamiento no Newtoniano ya que la viscosidad disminuye con incrementos de la rapidez de corte. Muchas resinas termoplásticas y algunas termo fijas requieren fluir para producir un producto final manufacturado (López Carrasquero, 2004).

Los procesos de inyección, extrusión, calandrado, soplado, etc. requieren del conocimiento de cómo la temperatura, presión, rapidez de deformación y masa molecular afectan la viscosidad.

Dependiendo de la composición, los polímeros pueden ser homopolímeros o copolímeros. Los homopolímeros se componen de un solo tipo de unidad repetitiva mientras que los copolímeros se componen de dos o más tipos de unidades monoméricas.

2.5.1 EFECTO DE LA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN

La reducción de viscosidad con la rapidez de corte permite obtener viscosidades óptimas de procesamiento de polímeros, sin tener que elevar la temperatura.

López Carrasquero (2004) muestra en la **Tabla 1** el rango de rapidez de corte característica de diversos procesos utilizados en la transformación de plásticos. El rango aproximado de deformación se ha calculado dividiendo la velocidad media del flujo del fluido por una longitud característica de la geometría donde está fluyendo (por ejemplo, el radio de una tubería o el espesor de una capa).

Tabla 1 Rango de rapidez de corte característica de diversos procesos. (Carrasquero, 2004) Reproducción total o parcial autorizada para fines educativos.

Proceso	Rapidez de deformación (s^{-1})
Sedimentación	$10^{-6} a 10^{-4}$
Moldeo por compresión	$10^0 a 10^1$
Calandrado	$10^1 a 10^2$
Flujo a través de tubos	$10^0 a 10^3$
Extrusión	$10^2 a 10^3$
Inyección	$> 10^3$

Debido al amplio rango de rapidez de corte que se aplican en el procesado de polímeros, es muy importante tener en cuenta la variación que pueda sufrir la viscosidad de un fluido que no sigue la Ley de Newton con la rapidez de deformación.

Un ejemplo de piezas de polímeros moldeados por compresión se muestra en la **Figura 7**.



Figura 7 Bloques de Mega Blocks® CC0 Licencia de uso libre Creative Commons pixabay.com

2.5.2 EFECTO DEL TAMAÑO DE LA CADENA

Debido a las características propias de los polímeros en cuanto a su formación y a la diferencia de los compuestos formados por moléculas pequeñas, una muestra de polímero está constituida por una mezcla de polímeros homogéneos, pero con distinta longitud de cadena y en consecuencia de diferente masa molecular, por lo que se consideran materiales polidispersos. Por esto, para los polímeros solo es posible determinar una masa molecular promedio, de una masa estadística relativa a todas las moléculas presentes en la muestra. Un ejemplo de cómo varía el estado de agregación de los polímeros según su masa molecular se encuentra en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Efecto de la masa molecular en las propiedades físicas de los materiales. (López Carrasquero, 2004)
Reproducción total o parcial autorizada para fines educativos.

Especie química	Estado	Masa molecular (g/mol)
CH ₄	Gases	16
CH ₃ -CH ₃		30
CH ₃ -CH ₂ -CH ₃		44
CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃		57
CH ₃ -(CH ₂) ₆ -CH ₃	Líquidos	114
CH ₃ -(CH ₂) ₃₀ -CH ₃	Semisólidos	450
CH ₃ -(CH ₂) ₃₀₀₀₀ -CH ₃	Sólidos	420030

Una distribución amplia de masas moleculares implica menor viscosidad por lo que es más fácil de extruir. Hay que destacar que un polímero de alta masa molecular en general tiene buenas propiedades mecánicas, pero a su vez implica mayor dificultad para su procesamiento (López Carrasquero, 2004).

2.5.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La viscosidad depende fuertemente de la temperatura. La mayoría de los materiales disminuyen su viscosidad al aumentar la temperatura. La dependencia que presentan los polímeros es función de su estructura y tipo de polímero. Pero en general se considera exponencial y puede haber variaciones de hasta un 10%/°C (López Carrasquero, 2004).

La relación entre viscosidad y temperatura puede representarse generalmente por una ecuación del tipo Arrhenius:

Ecuación 4. Relación entre la viscosidad y la temperatura.

$$\mu = ce^{\frac{d}{T}}$$

T es temperatura absoluta, c y d son constantes del polímero.

Las constantes se pueden obtener graficando la viscosidad contra la temperatura absoluta en escala logarítmica.

2.5.4 EFECTO DE LA PRESIÓN

En la mayoría de los casos, la viscosidad de un líquido aumenta con el incremento en la presión del sistema. No obstante, comparado con la influencia de la temperatura, los líquidos son poco influenciados por la aplicación de presión. La razón es que los líquidos a diferencia de los gases son en su mayoría incompresibles a bajas o medias presiones. De 0.1 a 30 MPa causan cerca del mismo cambio en la viscosidad que un cambio de temperatura de 1 °C (López Carrasquero, 2004).

Por esta razón este factor apenas se toma en consideración, pero hay casos, como en la industria de lubricantes, donde las medidas de viscosidad deben de tomarse a presiones elevadas.

Las presiones reportadas para lubricantes en engranajes son del orden de 150,000 PSI (aproximadamente 1GPa), mientras que las perforadoras que operan a profundidad tienen que soportar presiones de aproximadamente 3000 PSI (aproximadamente 20 MPa).

Si se incrementa la presión a temperatura constante incrementa la viscosidad. Para la mayoría de los polímeros un incremento de 1,400 PSI (aproximadamente 100 atm) en la presión es equivalente a un aumento de temperatura de 30-50°C (López Carrasquero, 2004).

2.6 MODELADO DE LA VISCOSIDAD

Después de caracterizar de forma general el comportamiento de los polímeros en base al comportamiento de su viscosidad cuando se encuentran en movimiento y conocer qué variables pueden afectar en la medición, es necesario conocer los modelos reológicos con los que pueden ser representados.

Al ajustar datos experimentales a un modelo reológico, se hace posible obtener una ecuación con constantes características únicas para cada fluido, proporcionando información valiosa en cada una de estas constantes como puede ser: consistencia del fluido, comportamiento de flujo o punto de cedencia.

Los modelos comúnmente empleados son el modelo de Bingham, el modelo de Ostwald-de-Waele y el modelo de Herschel-Bulkley para fluidos no-Newtonianos e independientes del tiempo (León Loya et al., 1986).

2.6.1 MODELO DE BINGHAM

Es un modelo reológico de dos parámetros utilizado ampliamente en la industria de los fluidos de perforación para describir las características del flujo de muchos tipos de lodos (León Loya et al., 1986).

Este tipo de fluido es el más simple, debido a que la relación entre el esfuerzo y la rapidez de corte tiene una proporción directa, justo después de aplicar el esfuerzo inicial (también llamado esfuerzo de umbral).

Este esfuerzo inicial se denomina punto de cedencia τ_y , y la pendiente del reograma es conocida como coeficiente de rigidez o viscosidad plástica.

Así el modelo de Bingham está representado como:

Ecuación 5. Modelo de Bingham.

$$\tau - \tau_y = \eta \gamma$$

Donde:

$$\gamma \neq 0 \text{ si } \tau > \tau_y$$

$$\gamma = 0 \text{ si } \tau \leq \tau_y$$

2.6.2 MODELO DE OSTWALD-DE WAELE

Este modelo, también conocido como Ley de potencias, es uno de los más usados en el campo de la ingeniería y una de las primeras relaciones propuestas entre el esfuerzo y la rapidez de corte. Dicha relación está caracterizada por dos constantes y es expresada como:

Ecuación 6. Modelo de Ostwald-De Waele.

$$\tau = K \gamma^n$$

En este modelo, el índice de consistencia, K, es un término semejante a la viscosidad e indicativo de la consistencia del fluido; es decir, si el valor de K es alto, el fluido es más viscoso y viceversa. En tanto que el índice de comportamiento de flujo, n, es una medida de la “no-Newtonianidad” del fluido; entre más alejado de la unidad sea el valor de n, más “no-Newtoniano” es el carácter del fluido.

Si el valor de n es mayor que cero y menor que la unidad, el modelo representa un fluido pseudoplástico, en tanto que si n es mayor que la unidad, el modelo representa un fluido dilatante. Por otra parte, este modelo se reduce a la ley de viscosidad de Newton si n es igual a la unidad, con $K = \mu$.

No obstante que el modelo es eminentemente empírico, ha sido usado ampliamente debido a que reproduce adecuadamente el comportamiento de flujo de muchos fluidos pseudoplásticos y dilatantes. Otra ventaja en el uso de este modelo la constituye el hecho de que es simple y posee sólo dos constantes reológicas (n y K) además de que cuando ha sido usado en problemas de flujo en tuberías ha dado excelentes resultados (León Loya et al., 1986).

2.6.3 MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

Este modelo es también conocido como ley de potencias con punto de cedencia. Entre los varios modelos propuestos que involucran el uso de tres constantes o parámetros ajustables, el modelo de Herschel-Bulkley es el más simple, el cual al igual que el modelo de Ostwald-De Waele, caracteriza a los fluidos pseudoplásticos y dilatantes, con la diferencia de que éste incorpora un tercer parámetro que representa un esfuerzo de cedencia. Por lo tanto, este modelo se representa de acuerdo a:

Ecuación 7. Modelo de Herschel- Bulkley.

$$\tau - \tau_0 = K \gamma^n$$

$$\text{Con: } \gamma \neq 0 \text{ si } \tau > \tau_0 \quad \gamma = 0 \text{ si } \tau \leq \tau_0$$

En la Ecuación 7 τ_0 representa un esfuerzo inicial o punto de cedencia. Las constantes n y K tienen un significado similar a las constantes del modelo de Ostwald-de Waele.

2.7 ECUACIONES GENERALES DE FLUJO LAMINAR

En esta sección se presentan las ecuaciones de flujo en conductos circulares aplicando los modelos reológicos presentados en la sección anterior siguiendo el desarrollo realizado por León Loya et al. (1986).

Se obtendrán para los mencionados modelos, las relaciones funcionales entre el flujo volumétrico y las caídas de presión las cuales, con la geometría del sistema son cantidades fácilmente medibles en un reómetro de tipo capilar.

El desarrollo de las ecuaciones de flujo laminar para los modelos reológicos antes mencionados está basado en las siguientes suposiciones:

- a) El flujo es laminar, isotérmico y estacionario (no existe variación con respecto al tiempo).
- b) El flujo es considerado unidireccional y la velocidad axial es únicamente una función de la distancia radial.
- c) La velocidad del fluido en contacto con la pared es cero; es decir, no existe deslizamiento del fluido en la pared de la tubería.
- d) El conducto es suficientemente largo, de tal manera que los efectos de extremos son despreciables, lo que implica que el flujo está totalmente desarrollado.
- e) El fluido es incompresible y la viscosidad no cambia apreciablemente con el cambio de presión a lo largo del tubo (el fluido es independiente del tiempo).
- f) La rapidez de corte producida en cualquier punto en el fluido es una función únicamente del esfuerzo cortante en ese punto.

Durante el flujo laminar ideal de un fluido en un conducto circular de sección transversal constante, no existen componentes de velocidad excepto en la dirección del flujo. En otras palabras, todas las partículas del fluido se mueven en líneas rectas paralelas al eje de la tubería y las capas adyacentes del fluido se deslizan unas sobre otras sin mezclarse o sin intercambio de fluido entre una capa y otra.

El flujo laminar también puede ser visualizado como una serie de cilindros delgados concéntricos, deslizándose uno sobre otro como los tubos de un telescopio. El cilindro de fluido en contacto con la pared de la tubería permanece estático (condición de no deslizamiento), mientras que los cilindros interiores se mueven progresivamente más rápido conforme sus diámetros se van reduciendo.

Las expresiones para el flujo volumétrico y la distribución de velocidades como función de las caídas de presión (caídas de presión por fricción), pueden ser fácilmente derivadas mediante la sustitución apropiada de la ecuación constitutiva del modelo reológico (Barnes et al., 1989).

Las ecuaciones generales de flujo laminar en tuberías que relacionan el flujo volumétrico y la caída de presión, pueden ser obtenidas mediante la integración de la relación funcional, **Ecuación 1**, para el tipo de fluido bajo estudio.

Para el flujo de tuberías, la ecuación constitutiva puede ser definida como:

Ecuación 8. Ecuación constitutiva aplicada en flujo en tuberías.

$$\left(-\frac{du}{dr}\right) = f(\tau)$$

Donde $\left(-\frac{du}{dr}\right)$ es la rapidez de corte o gradiente de velocidad, la cual es una cantidad negativa debido a que la velocidad en un punto en el interior de la tubería decrece con el aumento de la distancia radial. Por otro lado, el esfuerzo de corte puede ser obtenido a partir de un balance de momento (fuerzas), considerando una porción cilíndrica de fluido de radio r , espesor Δr y de longitud L , que circula en una tubería de radio R , como se muestra en la **Figura 8**.

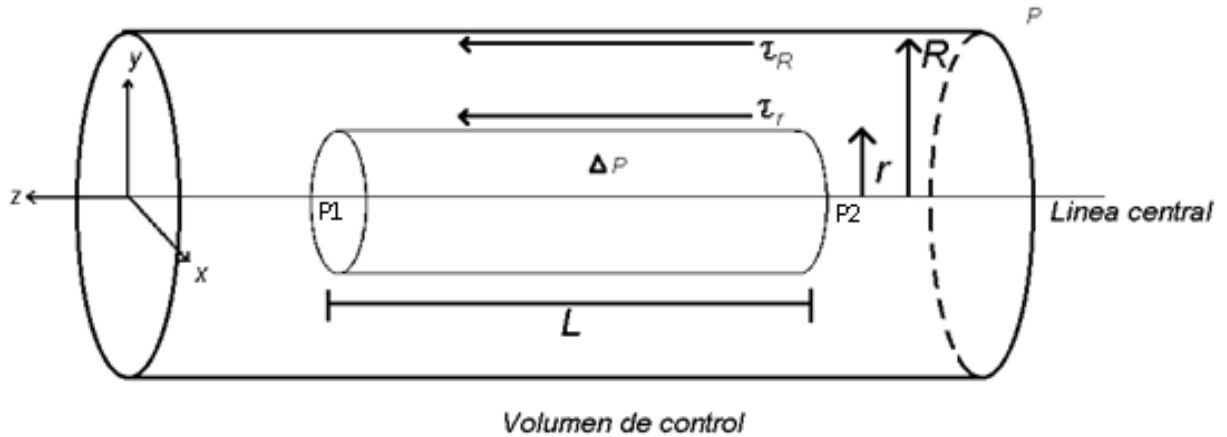


Figura 8 Diagrama de geometría de control para flujo en tubería.

Con referencia a la **Figura 8**, la presión diferencial ($P_2 - P_1$) actuando sobre los extremos del elemento de fluido de área πr^2 tiende a mover al cilindro en la dirección del flujo. Al mismo tiempo, las partículas del fluido en la superficie curva de $2\pi rL$ están siendo sometidas a la acción de corte por el movimiento de las partículas inmediatamente fuera de esta superficie; como consecuencia están sujetas a un esfuerzo cortante el cual se opone al movimiento del cilindro. Por lo tanto, un balance de fuerzas actuando en el elemento de fluido se puede expresar como:

$$(P_2 - P_1) \pi r^2 = \tau_{rz}(2\pi rL)$$

Si $\Delta P = (P_2 - P_1)$ y τ_{rz} es simplemente τ , arreglando la relación anterior tenemos:

Ecuación 9. Ecuación de esfuerzo de corte de flujo en tubería.

$$\tau = \frac{r \Delta P}{2L}$$

Así, para el esfuerzo de corte desarrollado en la pared de la tubería ($r = R$), se tiene:

Ecuación 10. Ecuación de esfuerzo de corte en la pared.

$$\tau_w = \frac{R \Delta P}{2L} = \frac{D \Delta P}{4L}$$

Por lo tanto, el esfuerzo cortante en cualquier punto en el interior de la tubería es independiente de las características reológicas de fluido y únicamente es función de la posición radial. Combinando la **Ecuación 9** y **10** se obtiene la **Ecuación 11**:

Ecuación 11. Ecuación de esfuerzo de corte en un punto en función de la distancia radial.

$$\tau = \tau_w \left(\frac{r}{R} \right)$$

E introduciendo la ecuación constitutiva (**Ecuación 8**) en esta expresión queda:

$$-\left(\frac{du}{dr} \right) = f \left(\tau_w \frac{r}{R} \right)$$

La cual al integrarla con $u = u$ cuando $r < R$ y $u = 0$ cuando $r = R$ (condición de no deslizamiento en la pared), queda:

Ecuación 12. Perfil general de velocidades en el interior de la tubería.

$$u = \int_r^R f \left(\tau_w \frac{r}{R} \right) dr$$

La **Ecuación 12** representa el perfil general de velocidades en el interior de una tubería. Por otro lado, considerando el gasto volumétrico dentro del elemento cilíndrico, moviéndose a una velocidad u , se tiene que:

$$dq = u dA = u 2\pi r dr$$

E integrando esta expresión:

$$\int_0^Q dq = 2\pi \int_0^R ur dr$$

Entonces:

$$Q = \pi [ur^2 - \int r^2 du]_0^R$$

Debido a que $u = 0$ cuando $r = R$, el primer término de esta última expresión se elimina. Si sustituimos el valor de du de la **Ecuación 12** en la última expresión, ésta queda:

$$Q = \pi \int_0^R r^2 f\left(\tau_w \frac{r}{R}\right) dr$$

Y de la **Ecuación 11** se tiene que $r = R(\tau - \tau_w)$, por lo que finalmente se tiene:

Ecuación 13. Expresión general para el flujo laminar en una tubería.

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

La cual es la expresión general para el flujo laminar en una tubería.

Mediante la sustitución de los diferentes modelos reológicos en la **Ecuación 12** y **13**, se pueden obtener el perfil de velocidades y las ecuaciones de flujo laminar del fluido bajo consideración.

2.7.1 ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS NEWTONIANOS

El flujo de fluidos Newtonianos proporciona las bases necesarias para el estudio de los fluidos no-Newtonianos. Se sigue el desarrollo realizado por León Loya et al. (1986). A partir del modelo reológico para un fluido Newtoniano, la relación funcional en base a la **Ecuación 2** se expresa como:

$$f(\tau) = \frac{\tau}{\mu}$$

La cual al ser sustituida en la **Ecuación 13**, lleva a la ecuación de flujo. Por lo tanto:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \left(\frac{\tau}{\mu}\right) = \frac{\pi R^3}{\mu \tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^3 d\tau$$

e integrando y evaluando los límites se obtiene:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\mu \tau_w^3} \left[\frac{\tau^4}{4}\right]_0^{\tau_w} = \frac{\pi R^3}{4\mu} \tau_w$$

Si se sustituye $\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L}$ y $Q = \frac{V\pi D^2}{4}$, se tiene que:

$$\frac{V\pi D^2}{4} = \frac{\pi D^3}{32\mu} \left(\frac{D\Delta P}{4L} \right)$$

Y arreglando términos se obtiene la siguiente expresión:

Ecuación 14. Ecuación de Hagen-Poiseuille para fluidos Newtonianos.

$$V = \frac{D^2 \Delta P}{32\mu L}$$

La cual es conocida como la ecuación de Hagen-Poiseuille y expresa la relación entre la velocidad y la caída de presión.

El perfil de velocidades puede ser obtenido por sustitución de la ecuación constitutiva en la **Ecuación 12**; de tal manera que:

$$f\left(\tau_w \frac{r}{R}\right) = \frac{\tau_w}{\mu R} r$$

Entonces,

$$u = \int_r^R \frac{\tau_w}{\mu R} r dr = \frac{\tau_w}{\mu R} \int_r^R r dr$$

Integrando y evaluando los límites se obtiene:

$$u = \frac{\tau_w}{2R\mu} (R^2 - r^2)$$

Y si el valor de τ_w es sustituido en esta expresión por la **Ecuación 10**, se obtiene:

$$u = \frac{\Delta P}{4\mu L} (R^2 - r^2)$$

Si esta última expresión es igualada con la **Ecuación 14**, se observa que el perfil de velocidades expresado como una función de la velocidad promedio del flujo es definido por:

Ecuación 15. Perfil de velocidad expresado en función de la velocidad promedio de fluidos Newtonianos.

$$u = 2V[1 - (\frac{r}{R})^2]$$

El cual es parabólico con máxima velocidad en el centro de la tubería, $u_{max} = 2V$ a $r = 0$. Se observa que la velocidad máxima es el doble de la velocidad promedio en el centro de la tubería. La rapidez de corte es de especial interés en este estudio y mediante la sustitución de τ_w y la **Ecuación 14** en el modelo de Newton se obtiene:

$$(\frac{D\Delta P}{4L})_w = \mu(-\frac{du}{dr})_w$$

En donde

Ecuación 16. Rapidez de corte en la pared de tubería para fluidos Newtonianos.

$$(-\frac{du}{dr})_w = \frac{8V}{D}$$

2.7.2 ECUACIONES DE FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Las ecuaciones de flujo de fluidos en tuberías se comportan de acuerdo con el modelo de Ostwald-de Waele, pueden ser derivadas de forma análoga a la ecuación de Hagen-Poiseuille siguiendo el desarrollo realizado por León Loya et al. (1986).

En este caso, la relación funcional entre el esfuerzo y la rapidez de corte se expresa como:

$$f(\tau) = (\frac{\tau}{K})^{1/n}$$

La cual al sustituirse en la **Ecuación 13** resulta en:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 (\frac{\tau}{K})^{1/n} d\tau$$

Integrando esta expresión y evaluando los límites conduce a:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3 K^{\frac{1}{n}}} \int_0^{\tau_w} \tau^{2+\frac{1}{n}} d\tau = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3 K^{\frac{1}{n}}} \left[\frac{\tau^{\frac{3n+1}{n}}}{\frac{3n+1}{n}} \right]_0^{\tau_w}$$

$$Q = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \pi R^3 \left(\frac{\tau_w}{K} \right)^{1/n}$$

Si se sustituye el valor de τ_w y expresamos Q en función de la velocidad promedio se obtiene:

$$\frac{V\pi D^2}{4} = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \frac{\pi D^3}{8} \left(\frac{D\Delta P}{4LK} \right)^{1/n}$$

Arreglando esta última expresión se obtiene finalmente la velocidad como función de la caída de presión:

Ecuación 17. Relación entre el flujo volumétrico y la caída de presión en términos de la velocidad promedio para fluidos no Newtonianos.

$$V = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \frac{D}{2} \left(\frac{D\Delta P}{4LK} \right)^{1/n}$$

De igual manera, el perfil de velocidades puede ser obtenido a partir de:

$$f \left(\tau_w \frac{r}{R} \right) = \left(\frac{\tau_w r}{K R} \right)^{1/n}$$

Y de la **Ecuación 12**, entonces,

$$u = \int_r^R \left(\frac{\tau_w}{KR} r \right)^{1/n} dr = \left(\frac{\tau_w}{KR} \right)^{1/n} \int_r^R r^{1/n} dr$$

Y al integrarla y evaluarla en los límites resulta:

$$u = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{\tau_w}{KR} \right)^{\frac{1}{n}} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right)$$

Por otro lado, si se sustituye el valor de τ_w y se iguala con la **Ecuación 17** se tendrá el perfil de velocidades expresado como función de la velocidad promedio de flujo.

De tal manera que

$$u = \left(\frac{n}{n+1}\right) \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}}\right)$$

Y por la **Ecuación 17** se tiene:

Ecuación 18. Perfil de velocidad para fluidos no Newtonianos.

$$u = \left(\frac{3n+1}{n+1}\right) V \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right]$$

Se observa en esta relación que el perfil de velocidades depende del valor del índice de comportamiento de flujo, n.

La rapidez de corte es de especial interés, así del modelo de Ley de potencias y la **Ecuación 17** se tiene:

$$\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)_w = K \left(-\frac{du}{dr}\right)_w^n$$

Por lo tanto,

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \left(\frac{3n+1}{n}\right) \frac{2V}{D}$$

Ecuación 19. Rapidez de corte en la pared de la tubería para fluidos no Newtonianos.

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \left(\frac{3n+1}{4n}\right) \frac{8V}{D}$$

2.8 DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE RABINOWITSCH Y MOONEY

Siguiendo el desarrollo original de Rabinowitsch et al. (1929) y el efectuado posteriormente por Mooney (1931) de acuerdo con la **Ecuación 13**, expresada en función de la velocidad promedio se obtiene:

$$\left(\frac{8V}{D}\right) \frac{\tau_w^3}{4} = \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

Diferenciando esta última ecuación con respecto a τ_w ,

$$\frac{d\left[\left(\frac{8V}{D}\right)\frac{\tau_w^3}{4}\right]}{d\tau_w} = \frac{d}{d\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau$$

$$\left(\frac{8V}{D}\right)\frac{3\tau_w^2}{4} + \left(\frac{\tau_w^3}{4}\right)\frac{d\left(\frac{8V}{D}\right)}{d\tau_w} = \tau_w^2 f(\tau_w)$$

$$f(\tau_w) = \left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \frac{3}{4}\left(\frac{8V}{D}\right) + \frac{\tau_w}{4}\frac{d(8V/D)}{d(\tau_w)}$$

Si se sustituye el valor de τ_w se obtiene:

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \frac{3}{4}\left(\frac{8V}{D}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)\frac{d\left(\frac{8V}{D}\right)}{d\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)}$$

Como puede observarse, la ecuación anterior representa una relación general para la rapidez de corte en la pared de una tubería.

Multiplicado y dividiendo la ecuación anterior por $(8V/D)$ y arreglando el segundo término del lado derecho se obtiene:

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \frac{3}{4}\left(\frac{8V}{D}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{8V}{D}\right)\frac{d\left(\frac{8V}{D}\right)/\left(\frac{8V}{D}\right)}{d\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)/\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)}$$

Reconociendo que:

$$d\log(X) = \frac{dX}{X}$$

La ecuación anterior queda:

Ecuación 20. Ecuación de Rabinowitsch y Mooney.

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \frac{3}{4}\left(\frac{8V}{D}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{8V}{D}\right)\frac{d\log(8V/D)}{d\log\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)}$$

La cual es una función lineal entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte en la pared de la tubería, donde la pendiente está definida por:

Ecuación 21. Pendiente de la función lineal entre el esfuerzo y la rapidez de corte en la pared de la tubería en la Ecuación de Rabinowitsch y Mooney.

$$n' = \frac{d \log(D\Delta P/4L)}{d \log(8V/D)}$$

Por lo tanto, la **Ecuación 20** puede ser simplemente expresada como:

Ecuación 22. Rapidez de corte en la pared utilizando la Ecuación de Rabinowitsch y Mooney.

$$\left(-\frac{du}{dr}\right)_w = \left(\frac{3n'+1}{4n'}\right)\left(\frac{8V}{D}\right)$$

Debido a que la **Ecuación 13** es una ecuación general para el flujo de cualquier fluido no-Newtoniano independiente del tiempo, sin importar su comportamiento reológico, la **Ecuación 22** es una ecuación perfectamente general que puede ser usada como el punto de partida para derivar las relaciones en flujo laminar de los fluidos cuyo comportamiento reológico es descrito por varias ecuaciones constitutivas.

Por lo tanto, la **Ecuación 21** y **Ecuación 22** son aplicables a todos los fluidos independientes del tiempo. Además de ser rigurosamente exactas, estas ecuaciones no requieren de suposiciones tales como la relación funcional entre el esfuerzo y la rapidez de corte. Asimismo, debido al hecho de que para el flujo laminar de cualquier fluido cuyo esfuerzo de corte es únicamente una función de la rapidez de corte (como lo indica la **Ecuación 1**), la relación entre el esfuerzo cortante en la pared de la tubería ($D\Delta P/4L$) y la cantidad ($8V/D$), es única.

2.9 ESTUDIO DE FLUJO EN CAPILARES

Para el estudio del flujo de fluidos a través de tubos o capilares se efectúan las mismas suposiciones consideradas en la sección anterior; es decir, se usan las ecuaciones generales de flujo laminar.

Así, mediante un balance de fuerzas sobre un elemento cilíndrico de un fluido que fluye dentro de un ducto circular, se obtiene que el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la distancia radial y al gradiente de presión. Por lo tanto, el esfuerzo de corte en la pared del tubo es igual a la **Ecuación 9**; evaluada en la pared, la cual es válida independientemente de la naturaleza del fluido.

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L}$$

La rapidez de corte también varía con respecto al radio, siendo esta variación dependiente de la distribución (perfil) de velocidades, la cual a su vez está determinada por la naturaleza del fluido. Así, la rapidez de corte en la pared del capilar es una cantidad difícil de determinar a partir de datos experimentales.

Las cantidades $D\Delta P/4L$ y $8V/D$ son fácilmente obtenidas mediante el uso del reómetro capilar, pudiéndose establecer así los diagramas de corte para fluidos Newtonianos. En cambio, para fluidos no-Newtonianos, el esfuerzo cortante en la pared es aun igual a $D\Delta P/4L$, pero la rapidez de corte en la pared ya no es igual a la cantidad $8V/D$, sino que depende de las propiedades reológicas del fluido.

Rabinowitsch et al. (1929) y Mooney (1931) demostraron que la rapidez de corte en la pared del tubo está relacionada con la cantidad $8V/D$ a través de la **Ecuación 20** y que existe una relación única, independientemente de las dimensiones del equipo, entre el esfuerzo cortante en la pared y el término $8V/D$, para cualquier fluido cuya rapidez de corte es función únicamente del esfuerzo cortante.

Metzner y Reed (1955) basados en el trabajo de Rabinowitsch et al. (1929) y Mooney (1931) (**Ecuación 20**) definieron el comportamiento del flujo laminar de los fluidos no-Newtonianos, usando la **Ecuación 21**. Por lo que la rapidez de corte en la pared está expresada por la **Ecuación 22**. Debe hacerse notar que las

Ecuaciones 20,21 y 22 no están basadas en ninguna relación funcional (ecuación reológica) entre el esfuerzo de corte y la rapidez de corte; por lo tanto, son válidas para todos los fluidos independientes del tiempo, sin importar su comportamiento reológico. Las rapidezces de corte en la pared correspondientes a los esfuerzos cortantes en la pared de los tubos capilares pueden ser determinadas utilizando la **Ecuación 22**, una vez que la pendiente n' , ha sido evaluada de una gráfica logarítmica de $D\Delta P/4L$ contra $8V/D$. Por lo tanto, las características de flujo del fluido pueden ser definidas mediante una curva de $D\Delta P/4L$ contra $8V/D$, llamada curva de flujo, para diferenciarla del diagrama de corte, el cual es una curva del esfuerzo y la rapidez de corte, ambas evaluadas en la pared del tubo (τ_w vs γ_w).

Una vez que los esfuerzos cortantes y las rapidezces de corte en la pared han sido calculados, a partir de las determinaciones experimentales, es posible ajustar uno de los diferentes modelos reológicos descritos en las secciones anteriores para caracterizar al fluido bajo estudio.

Como dice Méndez Sánchez et al. (2010) cuando un fluido es estudiado empleando un reómetro capilar, puede ser analizado bajo condiciones muy amplias de rapidez de corte, tales como a las que se encuentran sujetos los fluidos de perforación en su aplicación en campo; es decir, a rapidezces de corte que varían desde 8 s^{-1} hasta $100,000 \text{ s}^{-1}$ aproximadamente.

2.10 PATRONES DE FLUJO MULTIFÁSICO AGUA-ACEITE

La necesidad de modelos confiables para el fenómeno de flujo multifásico ha motivado el estudio exhaustivo de sistemas gas-líquido durante los últimos 30 años. Recientemente, la industria ha tomado atención hacia el entendimiento del flujo mezclas trifásicas gas/aceite/agua. Sin embargo, los casos donde la fase gas no está presente no han sido estudiados tan rigurosamente. La estructura de flujo de mezclas aceite-agua es diferente a la de mezclas gas-liquido. Esa diferencia en estructura del flujo es causada principalmente por la gran capacidad de transferencia de momentum en el

sistema líquido-líquido y la pequeña participación de fuerzas de flotabilidad (o diferencia de densidad). Por lo tanto, en los sistemas aceite-agua se espera tener un comportamiento diferente a los gas-líquido (Trallero et al. 1997).

En los experimentos realizados en la bibliografía Trallero et al. (1997) en una tubería transparente de 5 cm de diámetro y 15.5 m de longitud se observaron seis tipos de patrones de flujo en la distribución espacial de la interfase aceite-agua.

Después se clasificaron según el trabajo de Guzhov et al. (1973) y Nadre y Mewes (1976) y se enlistan a continuación:

- Flujo estratificado.
- Flujo estratificado con mezclado en la interfase.
- Dispersión de aceite en agua con agua.
- Emulsión de aceite en agua.
- Dispersiones de agua en aceite y aceite en agua.
- Agua en emulsión de aceite.

Los patrones de flujo de aceite / agua se dividen en dos categorías principales: flujo segregado y flujo disperso. El flujo segregado o separado se define como el patrón de flujo donde hay continuidad de ambas fases en la dirección axial. El patrón de flujo se identifica como flujo disperso cuando la continuidad se pierde en una o ambas fases. Por lo que se reconocen estos seis patrones de flujo entre estas dos categorías. Los flujos estratificado y estratificado con algunas mezclas en la interfase son flujos segregados. El flujo disperso puede ser dominado por el agua o por el aceite. Una dispersión de aceite en agua sobre una capa de agua y una emulsión de aceite en agua son patrones de flujo dispersos donde el agua es la fase dominante. Por otro lado, una emulsión de agua en aceite o la coexistencia de ambos tipos de dispersiones (dispersión de agua en aceite y dispersión de aceite en agua) son patrones de flujo dominados por el aceite.

Los límites entre los diversos patrones de flujo ocurren porque un régimen se vuelve inestable a medida que se acerca el límite y el crecimiento de esta inestabilidad causa la transición a otro patrón de flujo. Al igual que la transición laminar a turbulenta en flujo monofásico, estas transiciones multifásicas pueden ser bastante impredecibles ya que pueden depender de características menores de flujo, por ejemplo, la rugosidad de las paredes o las condiciones de entrada, el diámetro del tubo, etc.

Los gradientes de presión en flujo multifásico están relacionados con transiciones de patrones de flujo. La transición de la región estratificada a la región dispersa se muestra como una disminución de la pérdida de presión (Trallero et al.,1997).

Graficando la caída de presión de la tubería en función de la velocidad de una de las fases como se hace con los datos experimentales de Trallero et al. (1997) es posible distinguir gráficamente el punto donde existe un cambio en la tendencia de la caída de presión, lo que hace posible encontrar el momento donde aparezca una transición en el patrón de flujo.

CAPÍTULO 3 DISEÑO

El reómetro capilar fue diseñado y construido en el laboratorio L-106 de alta presión de la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera (USIP) en el edificio F2 de la Facultad de Química de la UNAM.

El reómetro capilar consta de 6 componentes principales:

1. Estructura principal
2. Contenedores de muestra
3. Sistema de desplazamiento
4. Sensores de presión
5. Equipo de cómputo y software de adquisición de datos
6. Sistema de control de temperatura

3.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL

Los materiales utilizados en la fabricación del reómetro fueron los siguientes:

2 tramos de tubo 1/8" de 665 cm con diámetro interno de 0.060" con código HIP 15-9H2-316 de acero inoxidable tipo 316.

2 tramos de tubo de 1/4" de 759 cm con diámetro interno de 0.125" con código HT#539286 de acero inoxidable tipo 316.

3 tramos de tubo de 3/8" de 261 cm con diámetro interno de 0.250" con código HT#EB0621 de acero inoxidable tipo 316.

Se realizó un doblado circular de los tubos en forma de espiral a un diámetro de 60 cm y separación entre cada vuelta de 0.5 cm como se muestra en la **Figura 9** y **Figura 10**.



Figura 9 Tubo doblado.

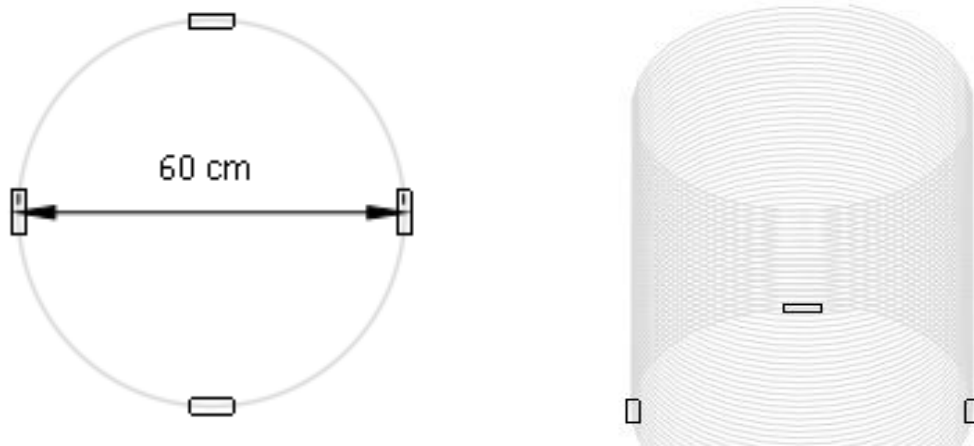


Figura 10 Vista superior (izquierda) y lateral del doblado (derecha).

Después de obtener la forma adecuada del tubo para el armado del reómetro, se procedió a unir los tramos de tubo con las conexiones apropiadas. A este proceso se le conoce como ferrulado de tubo y consiste en unir el tubo con el tipo de entrada de conveniencia por medio de un ferrul y una tuerca sin necesidad de usar soldadura. En cada unión con una válvula, cople, niple o reducción fue necesario ferrular el tubo. La fotografía de algunos componentes utilizados se muestra en la **Figura 11** y **Figura 12**.



Figura 11 Válvula de 3 vías.



Figura 12 Ferrules y tuercas de 3/8".

Los accesorios utilizados en el armado del reómetro son marca HiP High Pressure Equipment Co. ®, hechos de acero inoxidable tipo 316.

La lámina de acero inoxidable de la parte superior del baño para controlar la temperatura se muestra en la **Figura 13**.

El acero inoxidable tipo 316 es un acero de cromo níquel austenítico que contiene molibdeno. Esta adición aumenta la resistencia a la corrosión general, mejora la resistencia a picaduras de soluciones de iones cloruro y proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas (NKS.com, s.f.).



Figura 13 Lámina de acero inoxidable utilizada en el sistema de calentamiento.

La estructura delimitada por las válvulas 1 y 6, indicadas en el diagrama de la **Figura 14** que se presenta a continuación, puede soportar hasta 10,000 PSI de presión.

Se enlistan en las **Tabla 3** y **Tabla 4** los accesorios utilizados, con un identificador único para referirse a ellos en este trabajo y una breve descripción. Los datos técnicos, así como las imágenes utilizadas en las tablas provienen del catálogo del fabricante High Pressure Equipment Company © (2017).

Tabla 3 Accesorios del reómetro capilar.

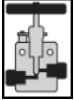
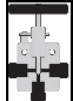



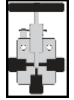


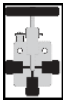

IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	DATOS TÉCNICOS	IMAGEN
V6	Válvula de paso 1/8"	15-11AF2 316SS HT#A12544 15,000 PSI 9/14	
V5	Válvula de 3 vías 1/8"	15-14AF2 316SS HT#A12794 10,000 PSI 8/15	
C4	Cople 1/8"-1/8"	15-21AF2 316SS HT#506323	
V4	Válvula de 3 vías 1/8"	15-14AF2 316SS HT#A12794 15,000 PSI 8/15	
CR7	Adaptador 1/8" – 1/4"	NIPLE REDUCTOR SWAGELOK 316VJS (316VAP OD¼)- (1/8OD 316UXZ)	
V3	Válvula de 3 vías 1/4"	10-14AF4 316SS HT#A12567 10,000 PSI	
CR6	Adaptador 1/8" – 1/4"	NIPLE REDUCTOR SWAGELOK 316VJS (316VAP OD¼)- (1/8OD 316UXZ)	
C3	Cople 1/4"-1/4"	NIPLE SWAGELOK 316VJS (316XEP OD¼) -(¼OD 316XEP)	
V2	Válvula de 3 vías 1/4"	10-14AF4 316SS HT#A12567 10,000 PSI	
CR5	Adaptador 1/8" – 1/4"	NIPLE REDUCTOR SWAGELOK 316VJS (316VAP OD¼)- (1/8OD 316UXZ)	

Tabla 4 Accesorios del reómetro capilar.


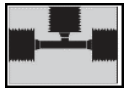



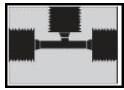


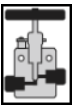
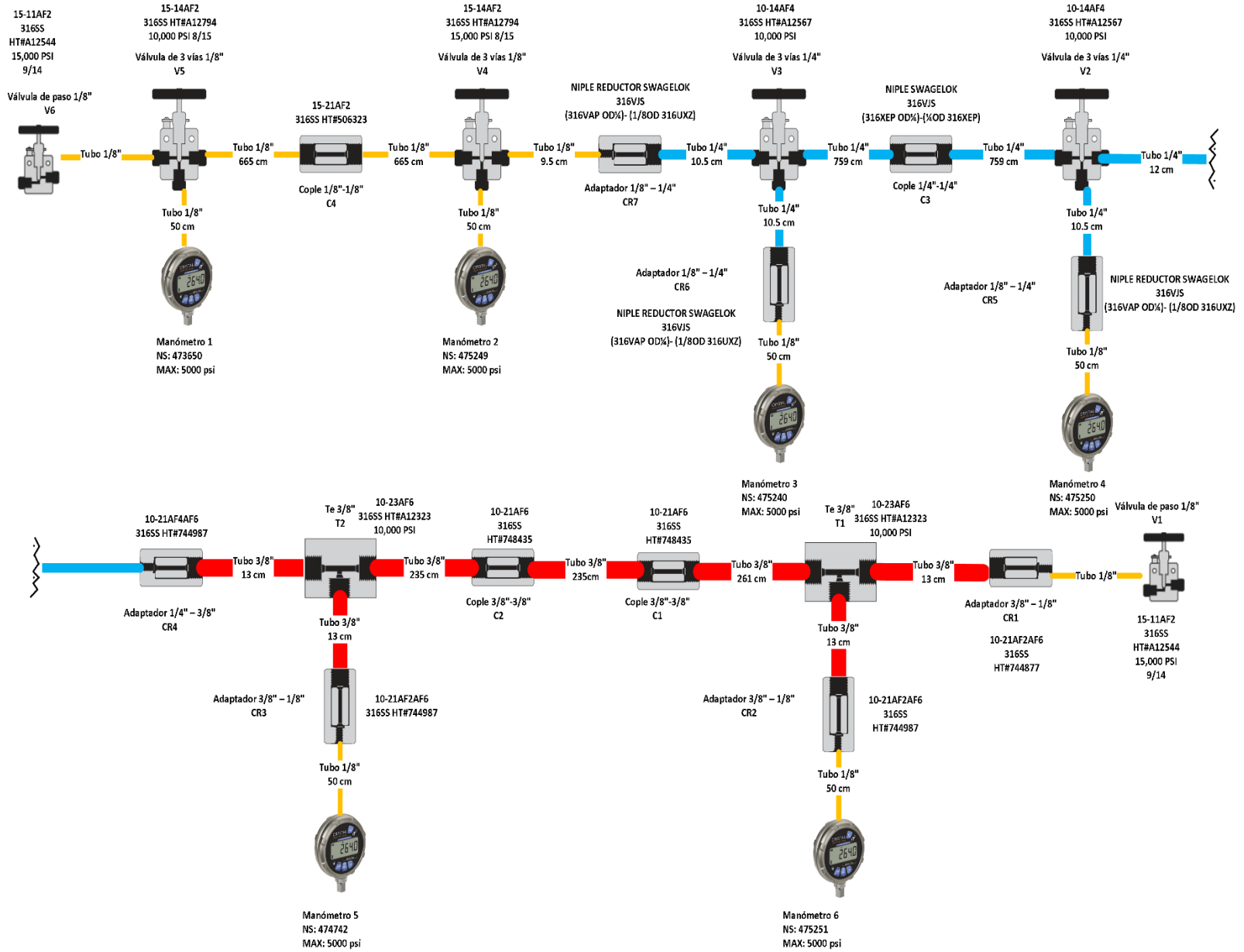
IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	DATOS TÉCNICOS	IMAGEN
CR4	Adaptador 1/4" – 3/8"	10-21AF4AF6 316SS HT#744987	
T2	Te 3/8"	10-23AF6 316SS HT#A12323 10,000 PSI	
CR3	Adaptador 3/8" – 1/8"	10-21AF2AF6 316SS HT#744987	
C2	Cople 3/8"-3/8"	10-21AF6 316SS HT#748435	
C1	Cople 3/8"-3/8"	10-21AF6 316SS HT#748435	
T1	Te 3/8"	10-23AF6 316SS HT#A12323 10,000 PSI	
CR2	Adaptador 3/8" – 1/8"	10-21AF2AF6 316SS HT#744987	
CR1	Adaptador 3/8" – 1/8"	10-21AF2AF6 316SS HT#744877	
V1	Válvula de paso 1/8"	15-11AF2 316SS HT#A12544 15,000 PSI 9/14	

Figura 14 Esquema general de la estructura principal del reómetro capilar.



3.2 CILINDROS PORTA MUESTRA

Se utilizaron 2 cilindros porta muestra con una esfera interna de titanio para mezclar. Los cilindros cuentan en ambos extremos con válvulas y tienen una capacidad de 981 cm³ y soportan una presión máxima de 10,000 psi a 65 grados centígrados. Pueden ser usadas para almacenar gases o líquidos y su peso es de 7.6 kg sin muestra. En su interior se encuentra un pistón que divide el volumen total del cilindro de forma hermética.

El dibujo conceptual y la fotografía de los cilindros se muestra en la **Figura 15**.

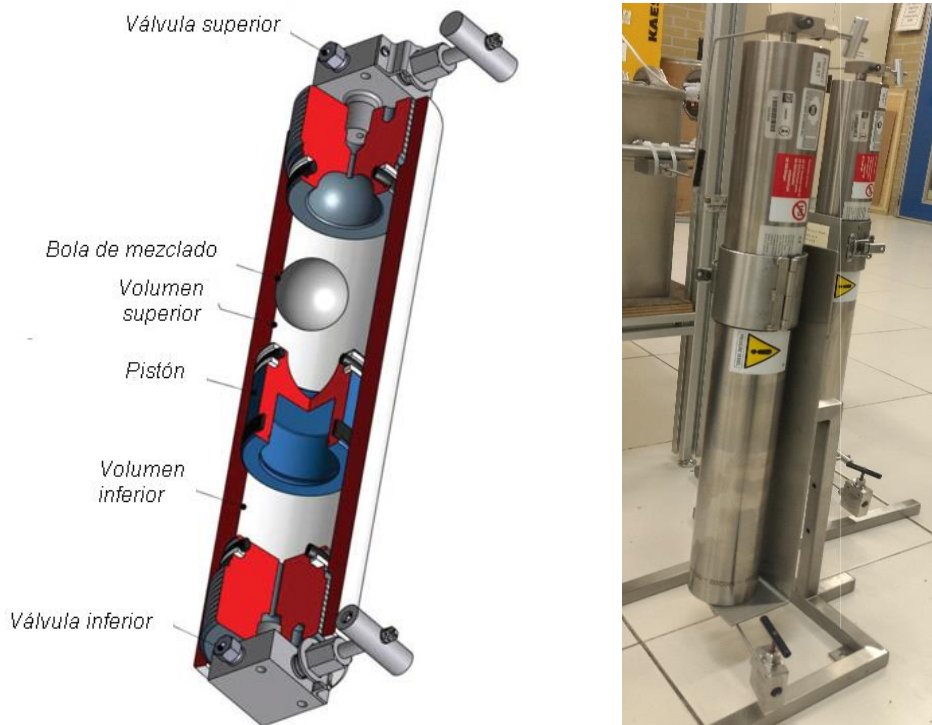


Figura 15 Diagrama de cilindro porta muestra (proserv.com, s.f.) y fotografía.

Se colocó un cilindro porta muestra en la entrada del reómetro capilar y uno en su salida. En adelante se denominan Contenedor 1 y Contenedor 2, respectivamente.

Al inicio del experimento la función de este par de contenedores es la siguiente:

- Contenedor 1: Almacena aproximadamente 1 L de muestra en el volumen superior y 20 mL de Marcol 82 en el volumen inferior.
- Contenedor 2: Almacena 20 mL de muestra en el volumen superior y 1 L aproximadamente de Marcol 82 en el volumen inferior.

Con el sistema de desplazamiento que se describe más adelante se inyecta Marcol 82 al contenedor 1 en el volumen inferior y se hace fluir el volumen donde se encuentra la muestra por los diferentes diámetros de tubo capilar hasta llegar a la salida donde se encuentra el contenedor 2, el cual comienza a llenarse de muestra en su volumen superior y expulsa de su volumen inferior el Marcol 82 a un depósito externo.

Al final del experimento:

- Contenedor 1: Almacena 20mL de muestra en el volumen superior y 1L aproximadamente de Marcol 82 en el volumen inferior.
- Contenedor 2: Almacena aproximadamente 1 L de muestra en el volumen superior y 20 mL de Marcol 82 en el volumen inferior.

Los contenedores al invertir su estado inicial pueden intercambiarse de posición para iniciar exactamente el mismo proceso y continuar con el estudio en el reómetro capilar.

3.3 SISTEMA DE DESPLAZAMIENTO

El sistema utilizado para generar el movimiento del fluido dentro del reómetro capilar es una bomba Quizix modelo QX-6000® marca Ametek Chandler Engineering®, capaz de alcanzar una presión máxima de 6000 PSI y un flujo máximo de 50 mL/min y mínimo de 0.001 mL/min. Esta bomba cuenta con 2 pistones controlados de forma independiente para bombear continuamente en flujo o a presión constante. Mientras que un cilindro de muestra está en movimiento inyectando fluido, el otro se llena y luego se presuriza para que coincida con la presión del primer cilindro y se asegure el suministro ininterrumpido de fluido presurizado.

La fotografía de la bomba utilizada se muestra en la **Figura 16**.



Figura 16 Bomba Quizix modelo QX-6000®.

Esta bomba requiere de dos servicios auxiliares para su correcto funcionamiento:

Aire comprimido a 85-115 PSI limpio y seco.

Fuente de alimentación 110 V corriente alterna, 50/60 Hz.

Tiene unas dimensiones de ancho 19 cm, alto 30 cm, fondo de 48 cm y pesa 16 Kg. Para controlar sus funciones es necesario conectar una computadora por medio de

un puerto RS232³, el cual se conecta con un adaptador serial para después conectar un cable RJ11⁴ que va directo a un puerto de la bomba. Con esta conexión es posible enviar instrucciones con un equipo de cómputo y el software PumpWorks 7.07 ®.

3.4 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Este sistema de control de temperatura consiste de un baño de acero inoxidable para contener líquidos hasta 100 °C de temperatura, sin filo en bordes y pulido. Tiene una tapa que es colocada sobre el baño para cubrir la parte superior del contenedor, con propósito de cubrir la mayor parte de la superficie y (con ayuda de un aislante) evitar la transferencia de calor. La conceptualización y la fotografía del baño se muestran en la **Figura 17**.

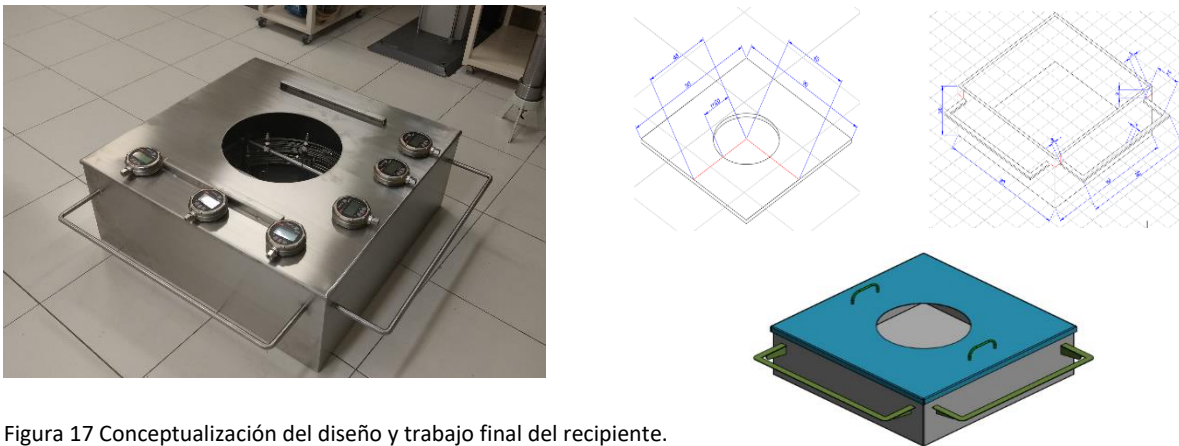


Figura 17 Conceptualización del diseño y trabajo final del recipiente.

En 2 lados contiguos del baño tiene 2 soleras de 3 cm de ancho que sirven de soporte para colocar los manómetros a distancias iguales.

El recipiente se llena de líquido para mantener la temperatura constante.

Con ayuda de un controlador de temperatura y resistencias eléctricas de cabeza tipo marina, se llega a la temperatura adecuada para realizar la medición después de esperar a que estabilice la temperatura.

³ RS232: Denominación al puerto serie y al protocolo de comunicación para transferir información, comúnmente con un conector DB9 para la computadora.

⁴ RJ11: Nombre del conector que usa 6 posiciones y 4 contactos, comúnmente utilizado en cableado de teléfono.

La fotografía del tablero de control de temperatura y de una de las 4 resistencias eléctricas instaladas se muestra en la **Figura 18**.



Figura 18 Tablero de control de temperatura (izquierda) y resistencia eléctrica (derecha).

3.5 SENSORES DE PRESIÓN

Para la adquisición de datos de presión se utilizaron seis manómetros modelo XP2i marca Crystal Pressure®, con capacidad de monitorear la presión hasta 5000 psi, con precisión variable a lo largo de la escala. De 0-1000 psi ± 1 psi y de entre 1001-5500 psi $\pm 0.1\%$ de la propia medición. La fotografía del sensor de presión utilizado se muestra en la **Figura 19**.



Figura 19 Sensor de presión Crystal Pressure® XP2i.

Pueden operar en un rango de temperatura de -10 a 50 °C. Tienen un peso de 600 g y el material que está en contacto con la muestra es acero inoxidable T316 y un O-ring de Viton®.

Estos sensores cuentan con una interfaz digital con conexión RS232, la cual se utiliza por medio de un cable RS232-USB para enviar los datos de presión de manera ininterrumpida a la computadora.

3.6 EQUIPO DE CÓMPUTO Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para poder obtener los datos de los 6 manómetros descritos anteriormente es necesario contar con una computadora con 6 entradas USB 2.0 disponibles y un puerto RS232 para mantener comunicación con el software de la bomba.

En este caso se utilizó una laptop y un E-Port PR02X, ambos marca Dell. La función este último es aumentar la cantidad de puertos USB y establecer la conexión RS232, puesto que la laptop no cuenta con esos puertos. La fotografía del equipo de cómputo y el adaptador de puertos utilizado se muestra en la **Figura 20**.

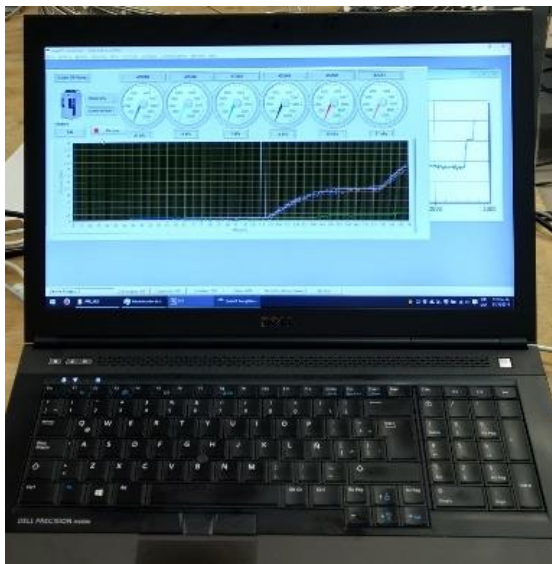


Figura 20 Equipo de cómputo y adaptador de puertos.

Se cuenta con conexiones eléctricas para mantener siempre encendida la computadora y poder realizar la adquisición de datos del experimento y su análisis, también se cuenta con una base de aluminio en la estructura de la mesa exclusiva para la laptop que facilita monitorear los resultados de presión, flujo y temperatura desde un solo lugar. Para el monitoreo y el control de este sistema, es necesario utilizar dos softwares:

PumpWorks 7.07 ®

Este es un software comercial, propio de la bomba Quizix QX-6000®, con el que se puede configurar la operación del experimento con varias opciones de flujo constante, presión constante o control desde señales externas. Este programa cuenta con protocolos de comunicación DDE⁵ o OPC⁶ para poder compartir información con otras aplicaciones diseñadas para propósitos específicos y automatización.

Reómetro Capilar v.3

Este software fue programado por el autor de este trabajo, para la adquisición de datos de presión de los sensores Crystal XP2i®, la temperatura, flujo y presión de la bomba. Está diseñado para muestrear cada segundo estas variables durante el tiempo que necesite el experimento y guardarlas en un archivo para su análisis posterior. Esta aplicación mantiene comunicación DDE con el programa comercial PumpWorks 7.07 ® para extraer información de interés para el experimento, así como parámetros de seguridad, por ejemplo, para evitar exceder la presión máxima de medida de los manómetros (5000 PSI) o sobrepasar el volumen máximo de los recipientes de muestra (981 mL), por lo que deben ejecutarse de forma paralela en el mismo sistema operativo.

⁵ DDE: Dynamic Data Exchange. Protocolo de comunicación entre aplicaciones en sistema operativo Microsoft Windows® basado en consultas, enfocado a una sola computadora.

⁶ OPC: Estándar de comunicación basado en Microsoft Windows® entre sistemas de control e instrumentación con arquitectura cliente-servidor, diseñado principalmente para operaciones en red.

Para ello, se utilizó Labview 2015 que es un entorno de programación y utiliza un lenguaje gráfico que se basa en la creación de bloques para crear rutinas con ayuda de estructuras clásicas de programación (for, while, do while, etc.) y que permite el anidado de funciones para crear aplicaciones más complejas. La interfaz principal de los dos softwares utilizados se muestra en la **Figura 21** y **Figura 22**.

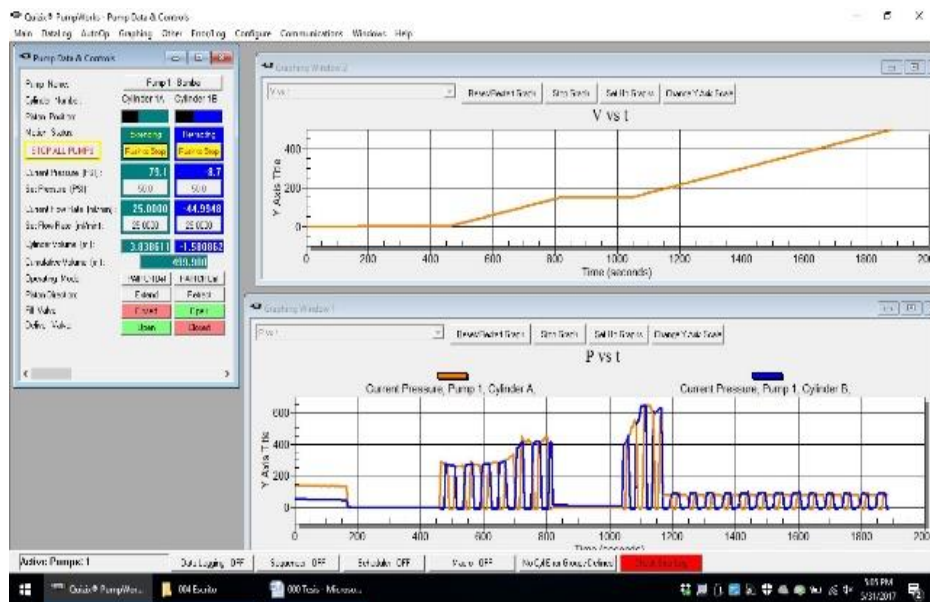


Figura 21 Software PumpWorks 7.07 ®



Figura 22 Reómetro Capilar V3

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA

4.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se experimentó con 2 disoluciones poliméricas de acrilamida con diferente concentración y 2 emulsiones de agua destilada y aceite mineral Marcol 82. En el Anexo 5 se encuentra la información de seguridad para el manejo de las sustancias.

Se enumeran y se describen a continuación los experimentos realizados:

Experimento 1: Acrilamida 0.5% P/P en agua destilada a 23 °C.

Experimento 2: Acrilamida 2% P/P en agua destilada a 23 °C

Experimento 3: Emulsión Marcol 82 con agua destilada con relación de volumen 1:9 con 1% P/P de Span 85® a 23 °C.

Experimento 4: Emulsión Marcol 82 con agua destilada con relación de volumen 1:1 con 2% P/P de Span 85® a 23 °C.

En adelante en este trabajo se utilizará esta nomenclatura para referirse a cada experimento así como a sus resultados.

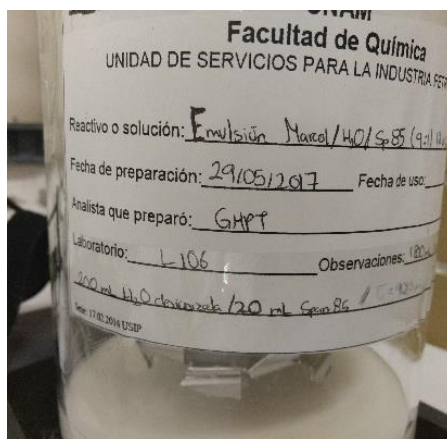


Figura 23 Emulsión Marcol 82 con agua destilada con relación de volumen 1:1 con 2% P/P de Span 85®.

Debido a un acuerdo de confidencialidad del proyecto en el que se realiza este trabajo no es posible compartir el método exacto de preparación de los fluidos utilizados.

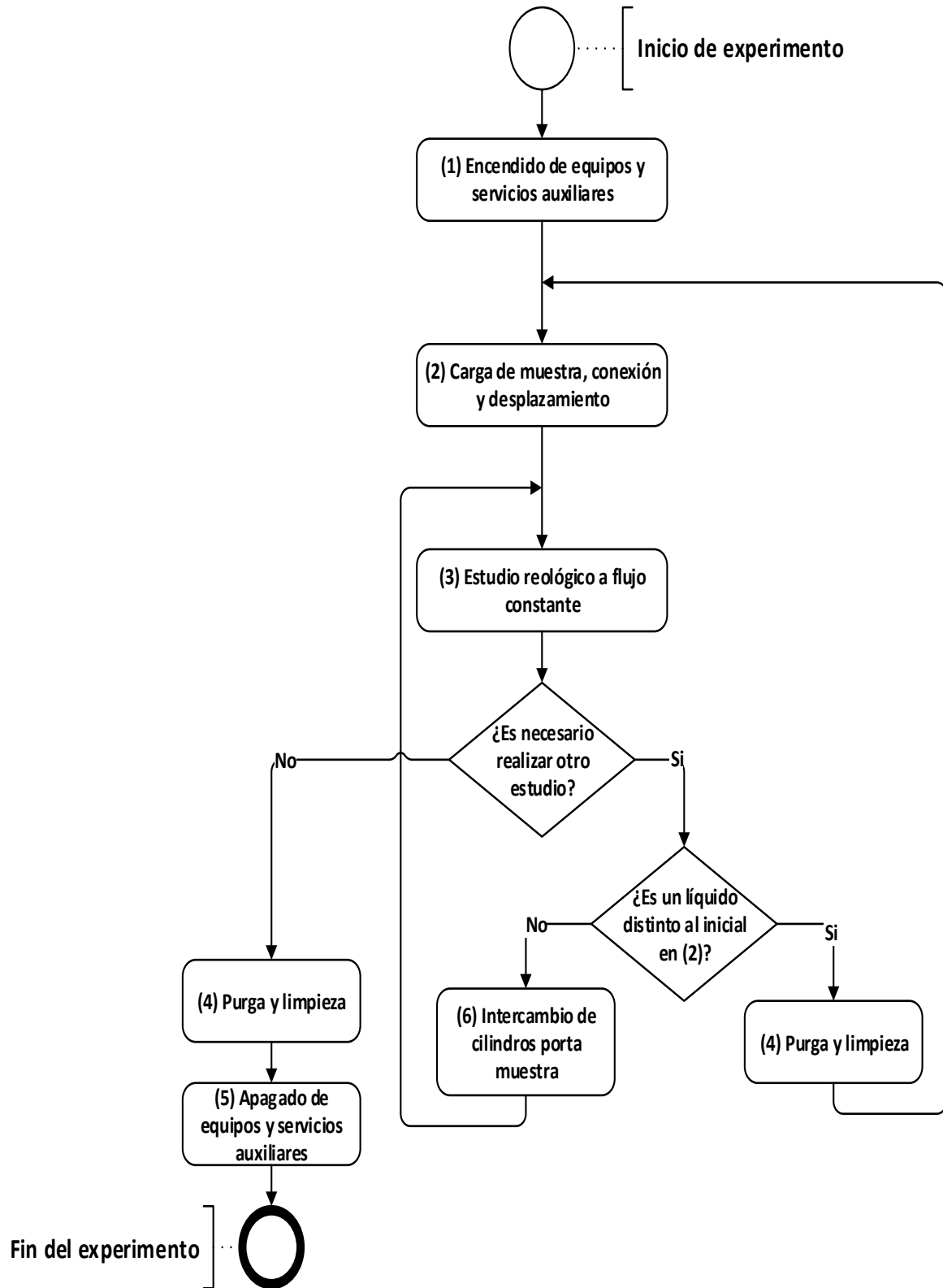
Una fotografía de una emulsión utilizada se muestra en la **Figura 23**.

De forma paralela al estudio en el reómetro capilar, se llevó a cabo una caracterización reológica de los fluidos con ayuda de los ingenieros Mariano Pineda Torres y Luis Antonio Cervantes Montejano, utilizando un reómetro TA Instruments modelo DHR-3, con el objetivo de tener una comparación de los resultados obtenidos.

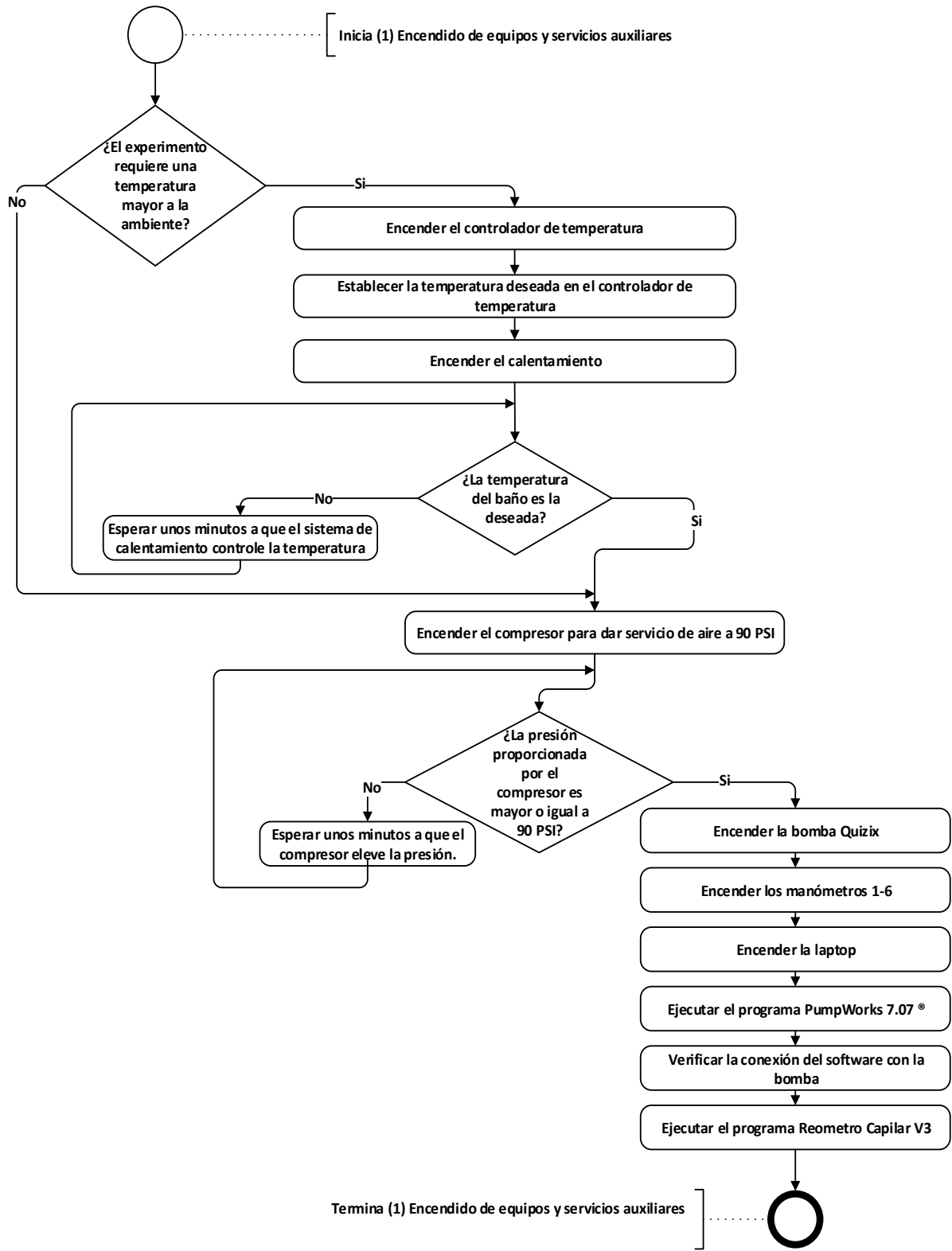
Para realizar estos procedimientos que se describen más adelante, es necesario conocer y seguir el instructivo técnico IT10 Acondicionamiento de cilindros porta muestra elaborado por personal de la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera. Este documento se encuentra en el Anexo 4.

La metodología de experimentación en el reómetro capilar se divide en seis diferentes etapas generales, las cuales son descritas a continuación en sus respectivos diagramas de flujo.

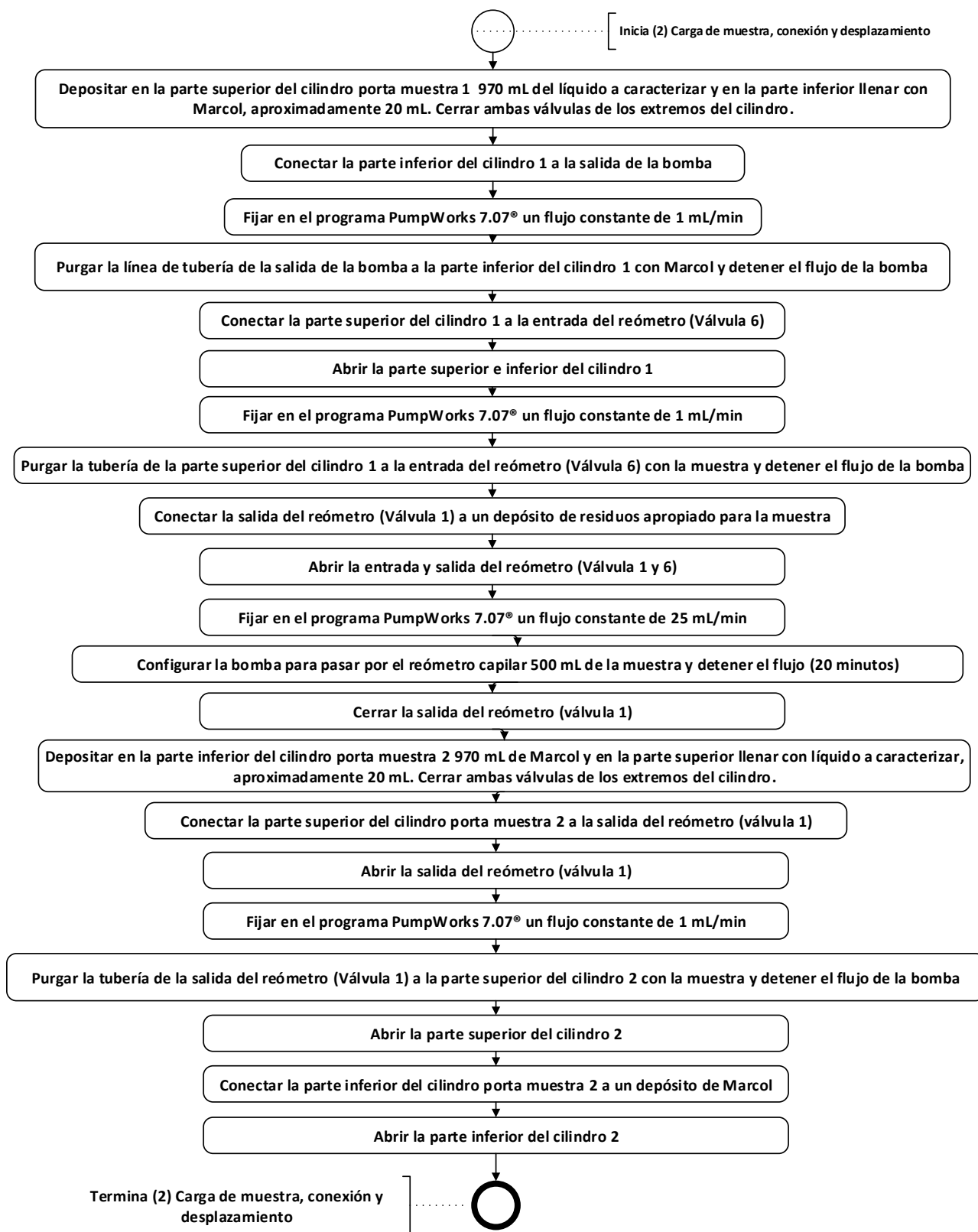
4.1.1 DIAGRAMA GENERAL



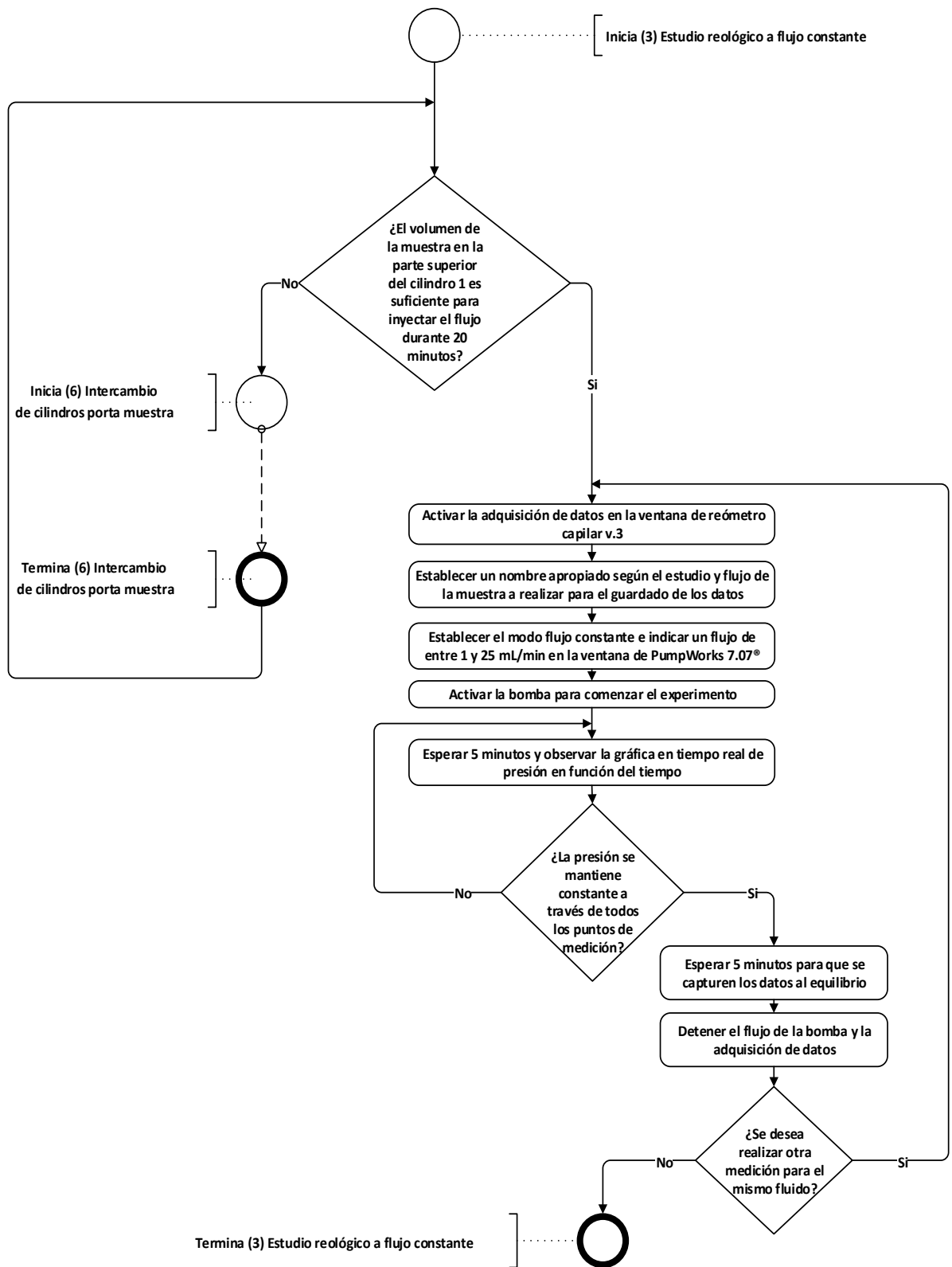
4.1.2 (1)- ENCENDIDO DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES



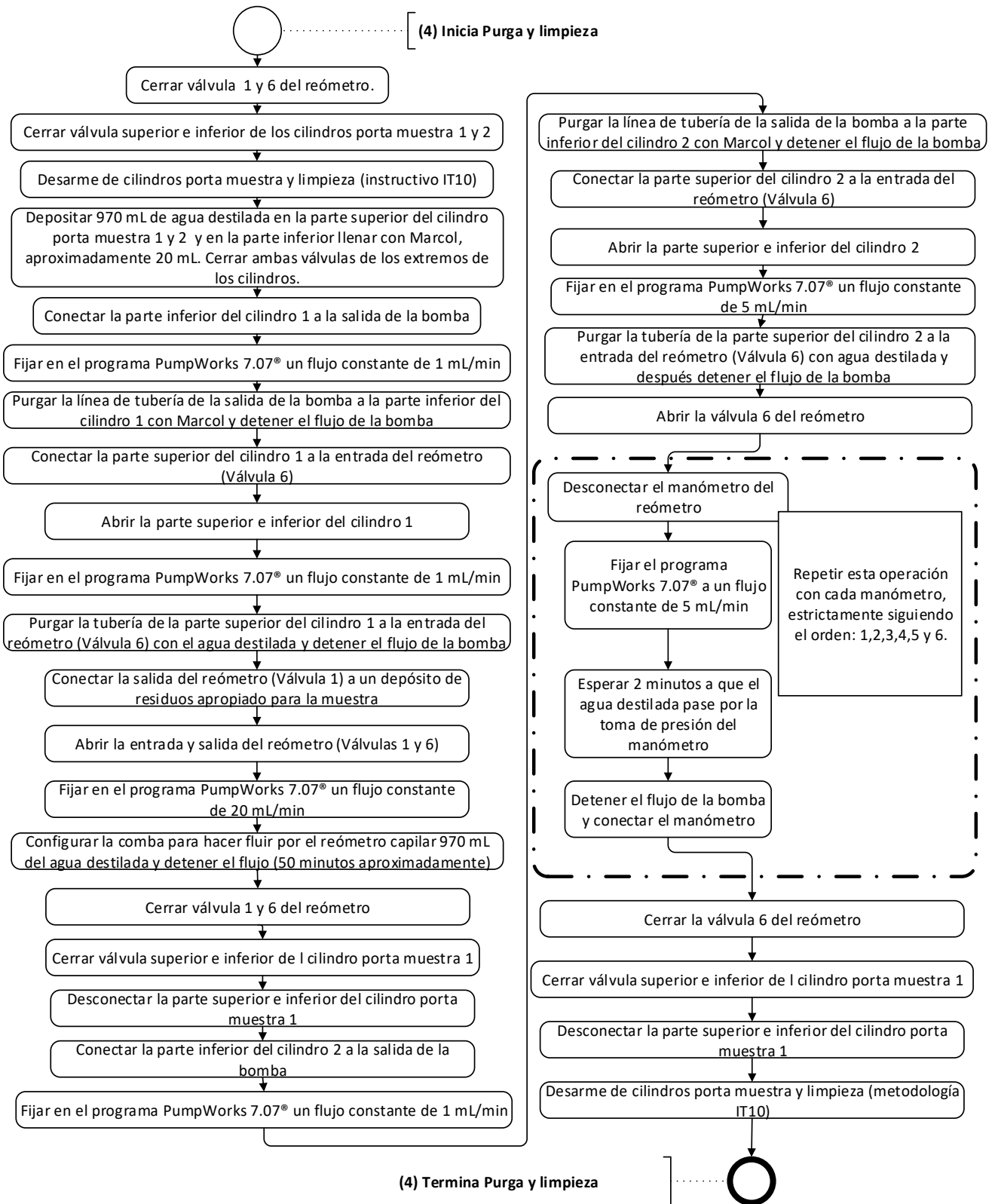
4.1.3 (2)- CARGA DE MUESTRA, CONEXIÓN Y DESPLAZAMIENTO



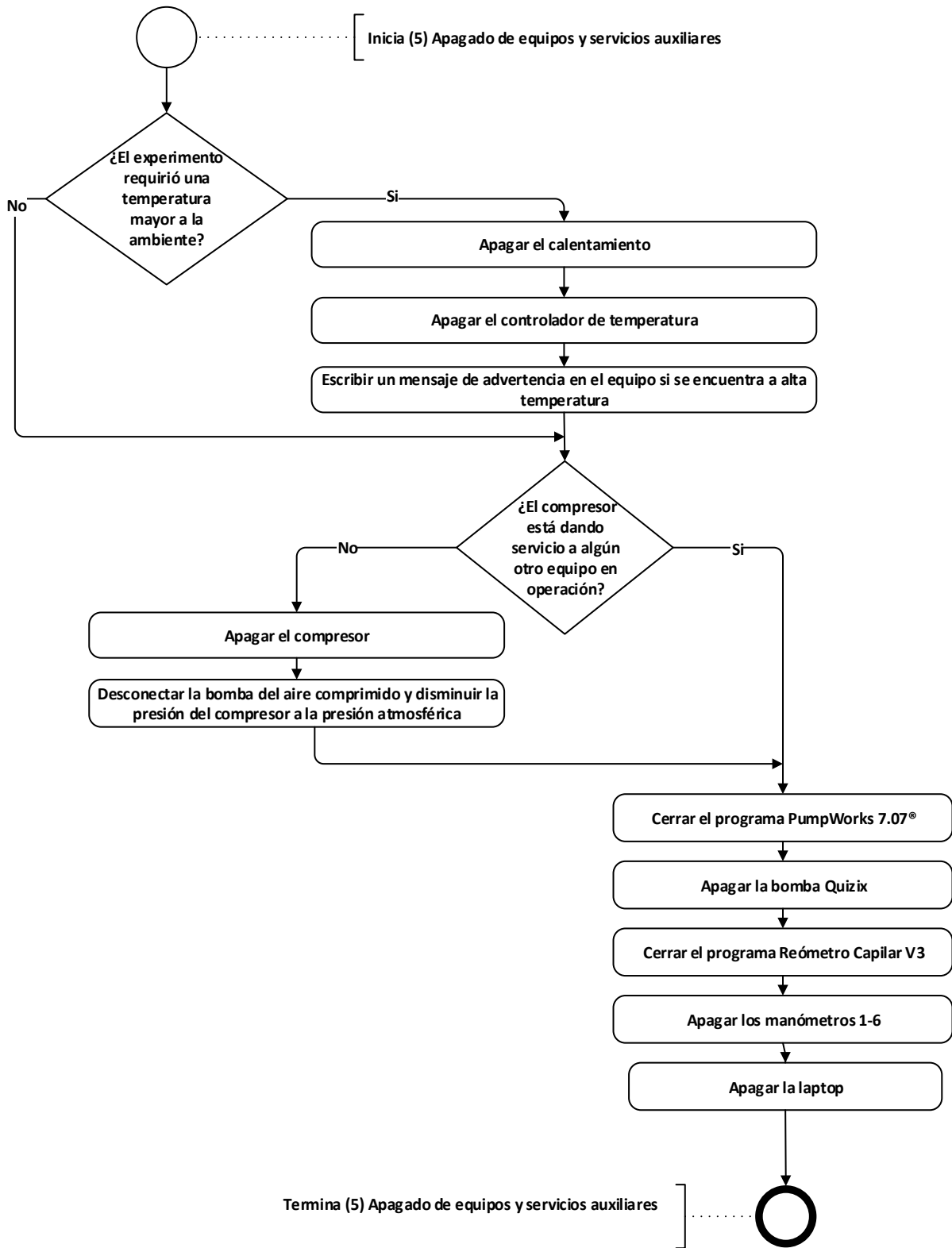
4.1.4 (3)- ESTUDIO REOLÓGICO A FLUJO CONSTANTE



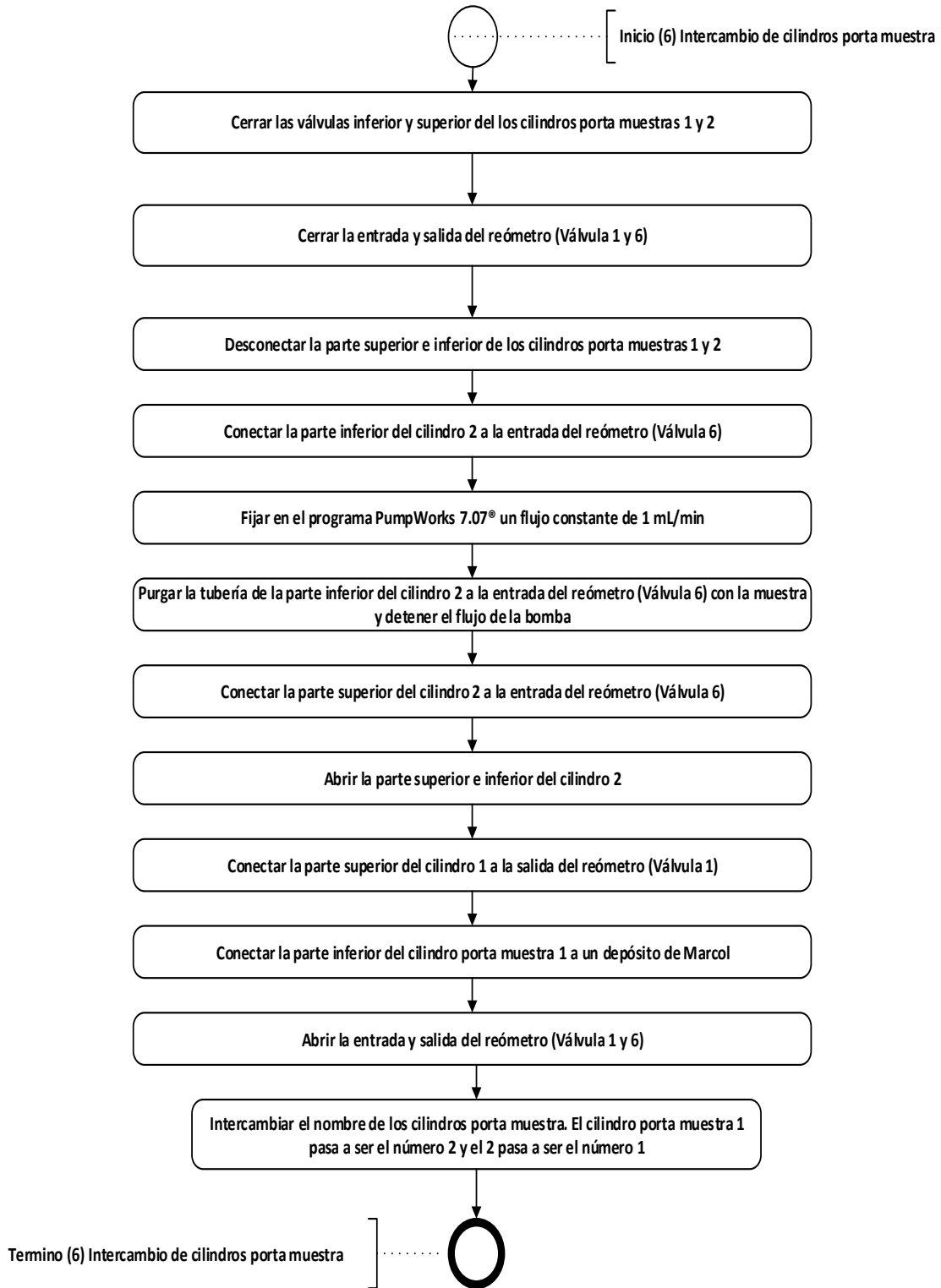
4.1.5 (4)- PURGA Y LIMPIEZA



4.1.6 (5)- APAGADO DE EQUIPOS Y SERVICIOS AUXILIARES



4.1.7 (6)- INTERCAMBIO DE CILINDROS PORTA MUESTRA



4.2 METODOLOGÍA ANALÍTICA

Se enlista a continuación el procedimiento para el análisis de datos recopilados por el reómetro capilar.

1. Extraer los datos obtenidos en hojas de cálculo distintas (Microsoft Excel ®) para cada flujo, (ver **Figura 24**).

223.8316511	0.270016223	4.887369662	-1.309273236			
1 mL	2 mL	3 mL	4 mL	5 mL	6 mL	7 mL

Figura 24 Ejemplo de organización de flujos en pestañas.

2. Organizar los datos en una tabla que indique el número de Muestra, Fecha y hora de la muestra, la presión de la bomba (kPa), la presión de los seis indicadores (kPa), la temperatura (°C) y el flujo (mL/min), (ver **Figura 25**).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Muestra	Fecha	Indice	Bomba (kPa)	IP1 (kPa)	IP2 (kPa)	IP3 (kPa)	IP4 (kPa)	IP5 (kPa)	IP6 (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo (ml/min)
1757	10/24/2016 10:52:45 AM	1	173.75	25	70	71	75	75	75	20	0.2

Figura 25 Ejemplo de columnas para organización de datos.

3. Realizar una selección de datos únicamente tomando en cuenta el momento del experimento en donde la presión se encuentra al equilibrio en todos los puntos de medida, (ver **Figura 26**).
4. En el equilibrio, realizar un promedio aritmético de la presión de la bomba y la presión de cada uno de los manómetros.
5. Obtener la diferencia de presión entre los manómetros 1 y 2 (tubo 1/8"), 3 y 4 (tubo 1/4") y 5 y 6 (tubo 3/8"), (ver **Figura 27**).

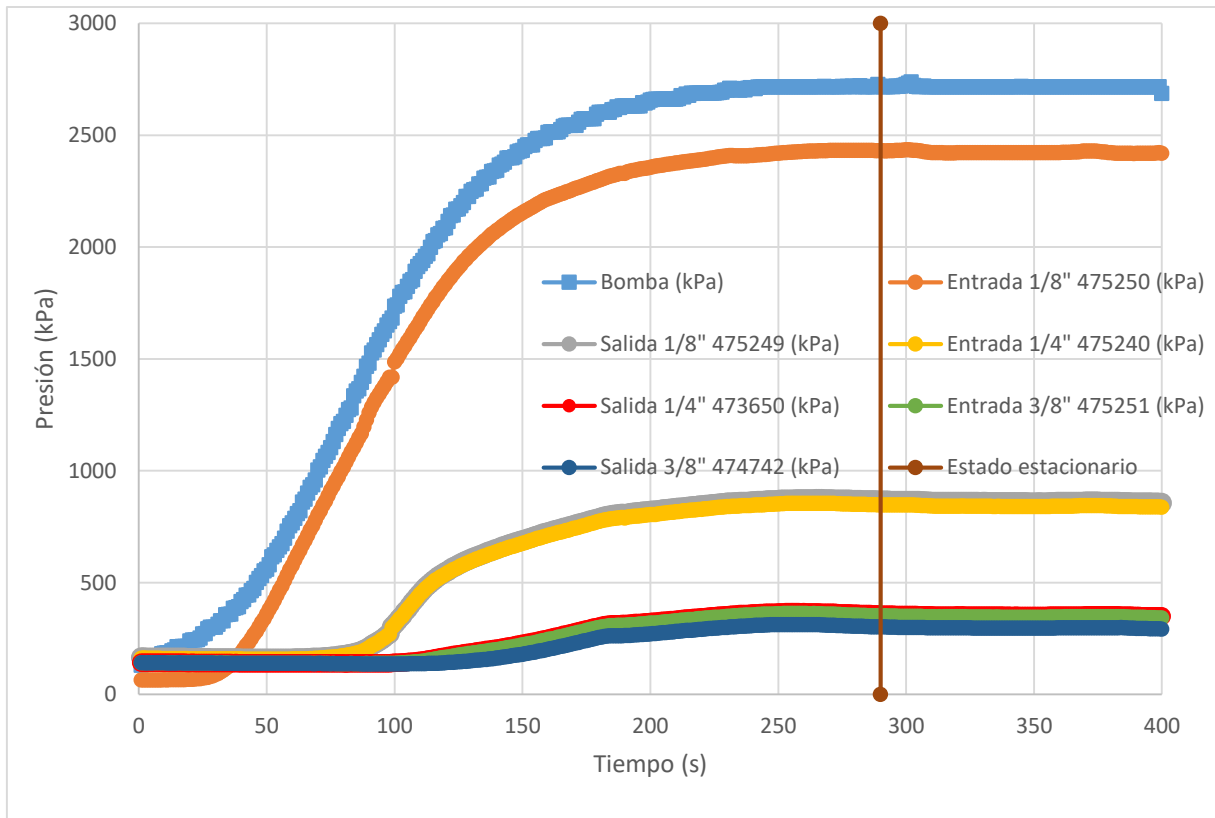


Figura 26 Ejemplo de curvas experimentales a flujo de 1mL/min. En estas se muestran que aproximadamente a partir del segundo 300 se alcanza el equilibrio.

R	S	T
Al equilibrio		
Entrada 1/8" 475250 (kPa)	Salida 1/8" 475249 (kPa)	$\Delta P(1/8")$ (kPa)
2423.72	777.68	1646.04
Entrada 1/4" 475240 (kPa)	Salida 1/4" 473650 (kPa)	$\Delta P(1/4")$ (kPa)
756.46	658.76	97.71
Entrada 3/8" 475251 (kPa)	Salida 3/8" 474742 (kPa)	$\Delta P(3/8")$ (kPa)
657.79	654.87	2.92

Figura 27 Ejemplo de diferencia de presión entre manómetros.

6. Realizar los pasos 3, 4 y 5 para cada flujo probado en la misma muestra.
7. Compilar en una tabla la información obtenida en los pasos anteriores. Esta tabla consta de 4 columnas: El flujo aplicado y su respectivo promedio de diferencial de presión en cada diámetro, (ver **Figura 28**).

A	B	C	D
Flujo (mL/min)	$\Delta P(1/8")$ (kPa)	$\Delta P(1/4")$ (kPa)	$\Delta P(3/8")$ (kPa)
21.00	1393.23	83.88	2.53
22.00	1463.98	88.43	2.62
23.00	1545.25	92.98	2.82
24.00	1616.04	97.71	2.92

Figura 28 Ejemplo de tabla-resumen de diferencial de presión.

Para cada gasto en cada diámetro de tubo obtener los siguientes datos y cambio de unidades:

- Realizar la conversión de unidades del flujo proporcionado por la bomba de $\left(\frac{mL}{min}\right)$ a $\left(\frac{cm^3}{s}\right)$ y las presiones obtenidas de (kPa) a (Pa)
- Obtener la rapidez de corte suponiendo un comportamiento Newtoniano con otra forma de la **Ecuación 16** $\gamma = \frac{4Q}{\pi r^3}$, donde γ es la rapidez de corte en $\left(\frac{1}{s}\right)$, Q es el flujo en $\left(\frac{cm^3}{s}\right)$ y r es el radio de la tubería en cm .
- Obtener el esfuerzo de corte con la **Ecuación 9**. $\tau = \frac{r \Delta P}{4L}$, donde τ es el esfuerzo de corte en (Pa) , ΔP es la diferencia de presión entre 2 manómetros de un tubo del mismo diámetro en (Pa) y L es la longitud de tubo en cm .
- Obtener la viscosidad con la **Ecuación 2**. $\mu = \frac{\tau}{\gamma}$, donde μ es la viscosidad en $(Pa * s)$.
- Obtener la velocidad del fluido en la tubería con la relación $V = \frac{Q}{A}$, donde V es la velocidad del fluido en la tubería en (cm/s) y A es el área transversal al flujo en el tubo en cm^2 .
- Obtener el número de Reynolds para conocer de manera aproximada si el fluido está moviéndose en régimen laminar o turbulento con la ecuación $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$, donde Re es el número de Reynolds adimensional, ρ es la densidad en g/cm^3 y D es el diámetro interno del tubo en cm .

8. Compilar en una tabla todos los datos obtenidos de rapidez de corte y esfuerzo de corte, ordenar en orden creciente con respecto a la rapidez de corte.

Con esto, se elimina la distinción que hay entre cada punto obtenido de los diferentes diámetros, mostrando únicamente la dependencia entre el esfuerzo de corte de la rapidez de corte.

9. Seleccionar los datos de rapidez de corte con su respectivo esfuerzo de corte donde exista una variación de la pendiente de puntos contiguos.

Conforme se aumenta la rapidez de corte, el comportamiento de muchos fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo comienza a ser Newtoniano, es decir, no aumenta o disminuye de manera apreciable la viscosidad a un mayor incremento de rapidez de corte.

Puede ser de gran ayuda graficar como en la **Figura 29** el esfuerzo de corte con respecto a la rapidez de corte, o la pendiente entre puntos con respecto a la rapidez de corte buscando los datos de viscosidad variable con respecto a la rapidez de corte, para así saber dónde se encuentra el comportamiento no Newtoniano.

En la **Figura 29** puede observarse que a baja rapidez de corte (menor a 2) y a alta rapidez de corte (mayor a 30) la viscosidad tiene un comportamiento Newtoniano, por lo que de 2 a 30 $\left(\frac{1}{s}\right)$ es el rango de datos que es de interés modelar.

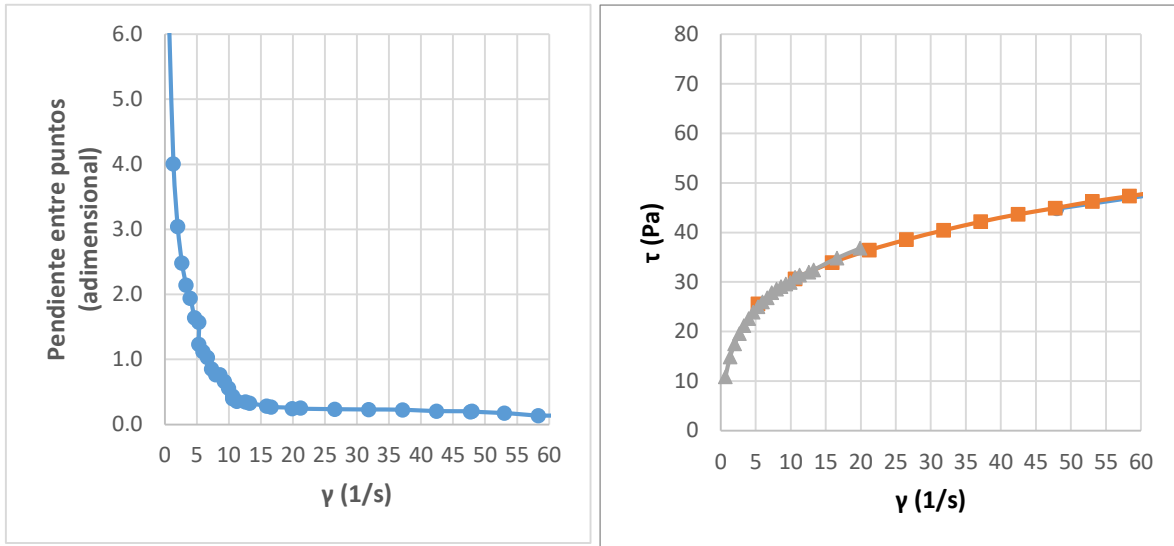


Figura 29 Gráfica de pendiente entre cada punto con respecto a rapidez de corte(izquierda). Gráfica de esfuerzo de corte con respecto a rapidez de corte (derecha).

10. Ordenar los datos obtenidos de la depuración anterior en una tabla $\ln \gamma$ en función de $\ln \tau$ y realizar una gráfica, (ver **Figura 30**).

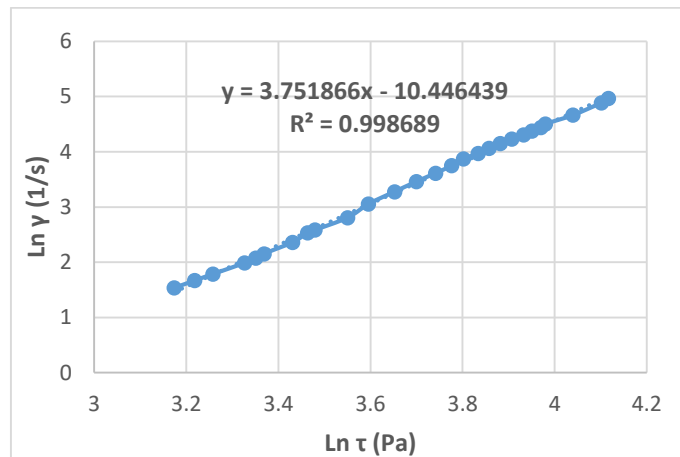


Figura 30 Ejemplo de gráfica $\ln \gamma$ (1/s) en función de $\ln \tau$ (Pa).

11. Obtener la pendiente, la ordenada al origen y el coeficiente cuadrático de correlación de la gráfica para obtener el término $\frac{d\ln(\gamma)}{d\ln(\tau)}$ de la **Ecuación 21**.

12. Corregir la rapidez de corte para obtener la rapidez de corte de comportamiento no Newtoniano con otra forma de la **Ecuación 20**: $\gamma_{nN} = \left(\frac{1}{4}\right)\left(3 + \frac{dLn(\gamma)}{dLn(\tau)}\right)$ donde γ_{nN} es la rapidez de corte corregida.
13. Ahora se debe obtener la viscosidad corregida del fluido, con la **Ecuación 2**, $\mu_{nN} = \frac{\tau}{\gamma_{nN}}$, donde μ_{nN} es la viscosidad corregida del fluido en ($Pa \cdot s$).
14. Entonces se calcula $Ln(\gamma_{nN})$ y $Ln(\mu_{nN})$
15. Realizar una gráfica de $Ln(\mu_{nN})$ con respecto a $Ln(\gamma_{nN})$, (ver **Figura 31**).

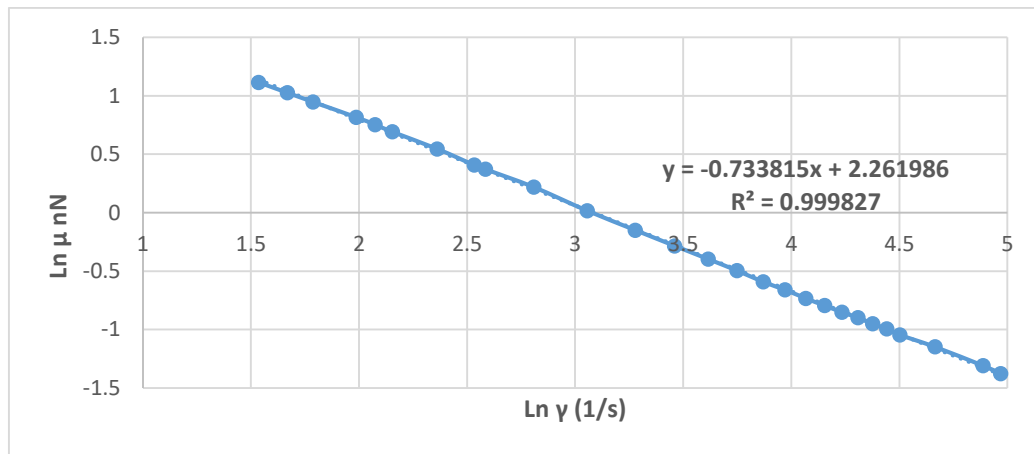


Figura 31 Ejemplo de gráfica $Ln \mu_{nN}$ en función de $Ln \gamma$ (1/s).

16. Obtener la pendiente $\frac{d\mu_{nN}}{d\gamma_{nN}}$, ordenada B y coeficiente de correlación.
17. Calcular $n = \frac{d\mu_{nN}}{d\gamma_{nN}} + 1$
18. Calcular $k = e^B$
19. Expresar el modelo reológico del fluido de la forma:

$$\mu_{nN} = k\gamma_{nN}^{n-1} [=] Pa \cdot s$$

A partir de datos de presión registrados en distintos puntos del reómetro aplicando gastos constantes se llega a caracterizar el fluido al obtener una expresión matemática que modela el comportamiento de la viscosidad con respecto a la rapidez de corte, la cual puede aplicarse a diferentes tuberías y flujos, que se encuentren dentro del rango de medición realizada.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE VALIDACIÓN Y DISCUSIÓN

Este capítulo se divide en dos partes, las cuales están enfocadas a validar el modelo obtenido como resultado de la experimentación en los 4 diferentes fluidos:

- Comparación de resultados experimentales

Se calcula la diferencia o error con respecto a una prueba en el reómetro marca TA Instruments modelo DHR-3, realizada para tener una referencia experimental.

- Comparación de resultados en CFD

Se realiza una simulación en CFD (Anexo 3) en ANSYS Fluent® considerando flujo en tubería recta con las dimensiones (diámetro y longitud de tubo) del reómetro capilar, todo esto con el modelo de viscosidad experimental obtenido.

5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Experimento 1:

En la **Figura 32** se muestran los datos de esfuerzo de corte calculados a partir de las caídas de presión obtenidas de los diferentes diámetros del reómetro capilar.

La viscosidad, que es la pendiente en las curvas graficadas, no mostró una dependencia con respecto al tiempo (ver **Figura 32**), y se observa una disminución de la viscosidad al incrementar la rapidez de corte, por lo que puede clasificarse como un fluido pseudoplástico.

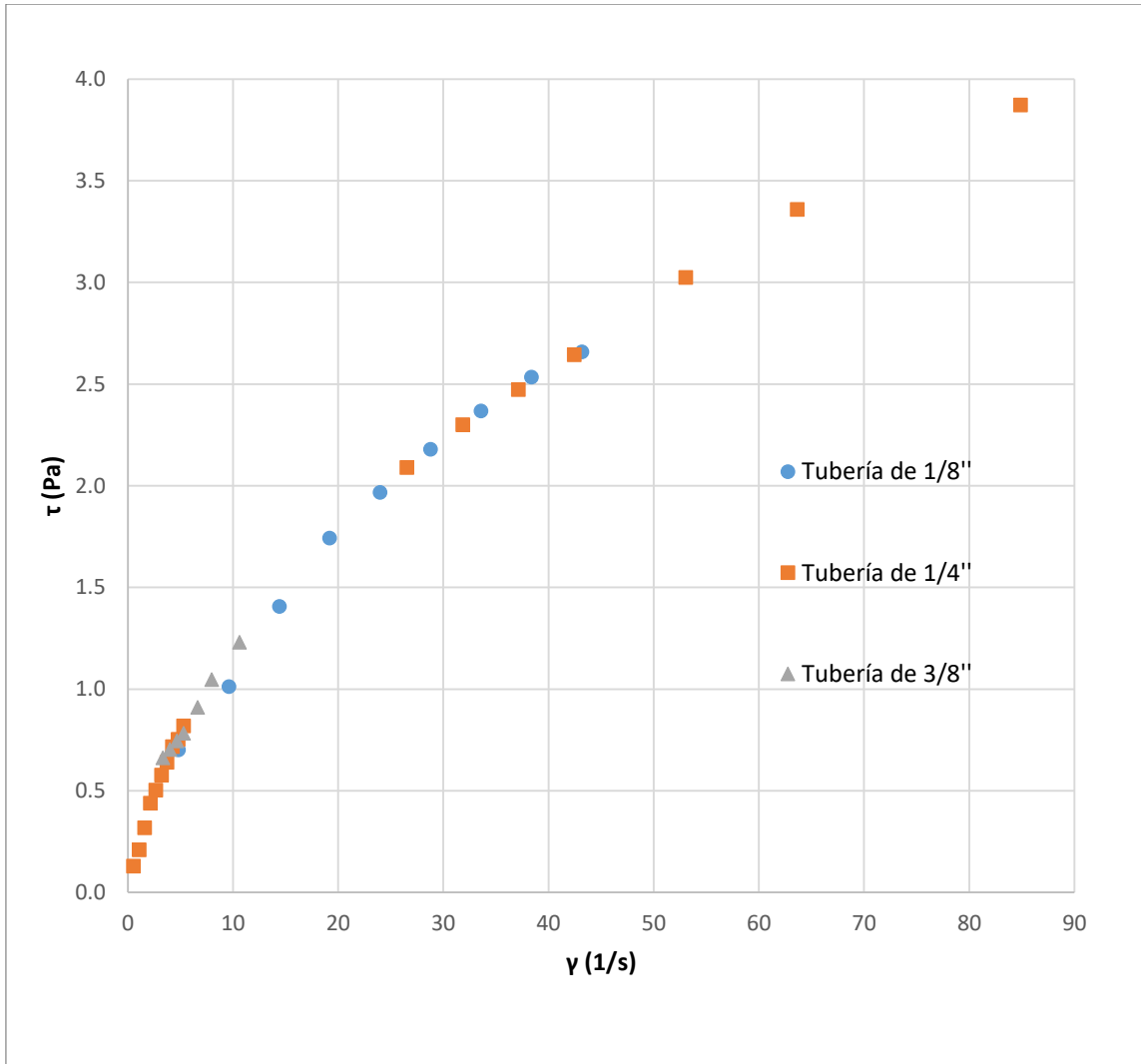


Figura 32 Gráfica de τ (Pa) en función de γ (1/s) del Experimento 1.

Caracterizando el fluido del Experimento 1, se propone el siguiente modelo reológico que describe su comportamiento:

$$1. \mu_{nN} = 0.290810486 \gamma_{nN}^{(0.56618918-1)} [=] Pa s$$

Este modelo y los datos obtenidos en el reómetro DHR-3 del fluido del Experimento 1 se presentan en la **Figura 33**:

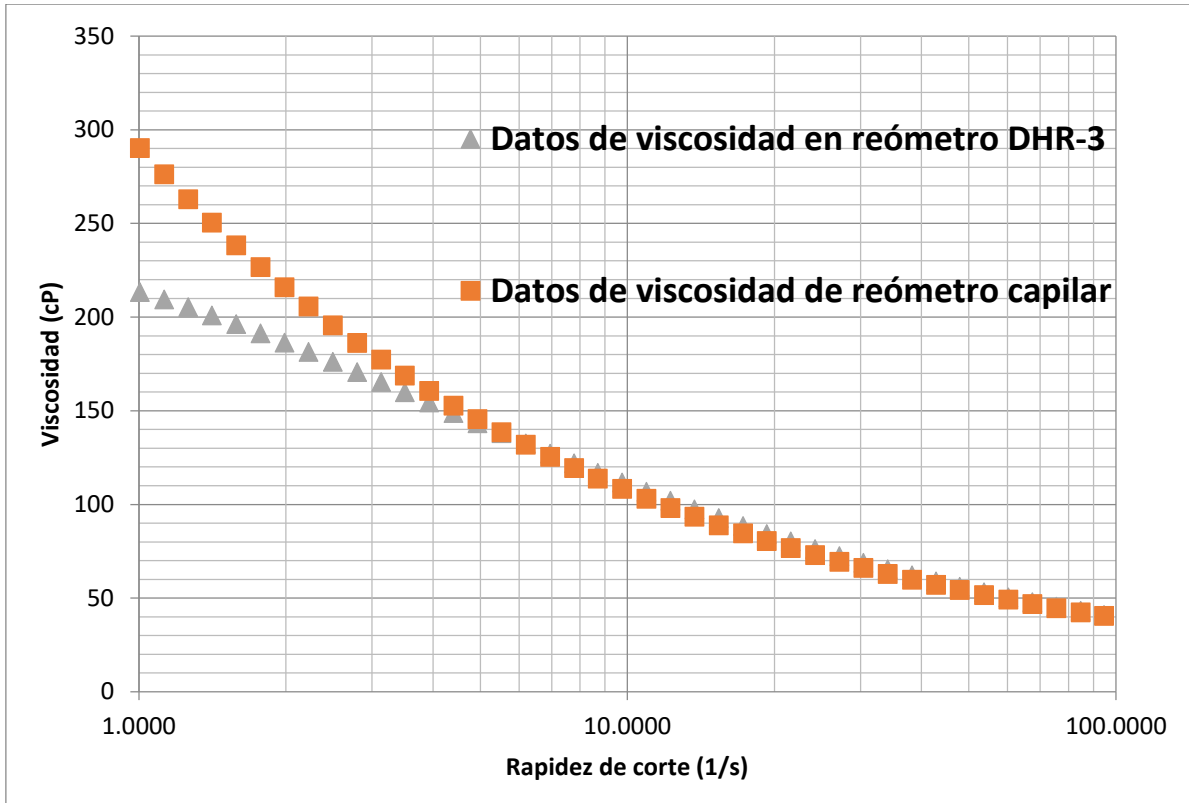


Figura 33 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1.

Para verificar la similitud de los datos obtenidos por el reómetro capilar fabricado y el reómetro tomado como referencia, se realiza una diferencia porcentual entre cada punto (de los datos de la **Figura 33**) y se muestra en la **Figura 34**.

La ecuación para obtener la diferencia porcentual es la siguiente:

$$\%error = \frac{|\mu_{Reómetro\ DHR-3} - \mu_{Reómetro\ capilar}|}{\mu_{Reómetro\ DHR-3}}$$

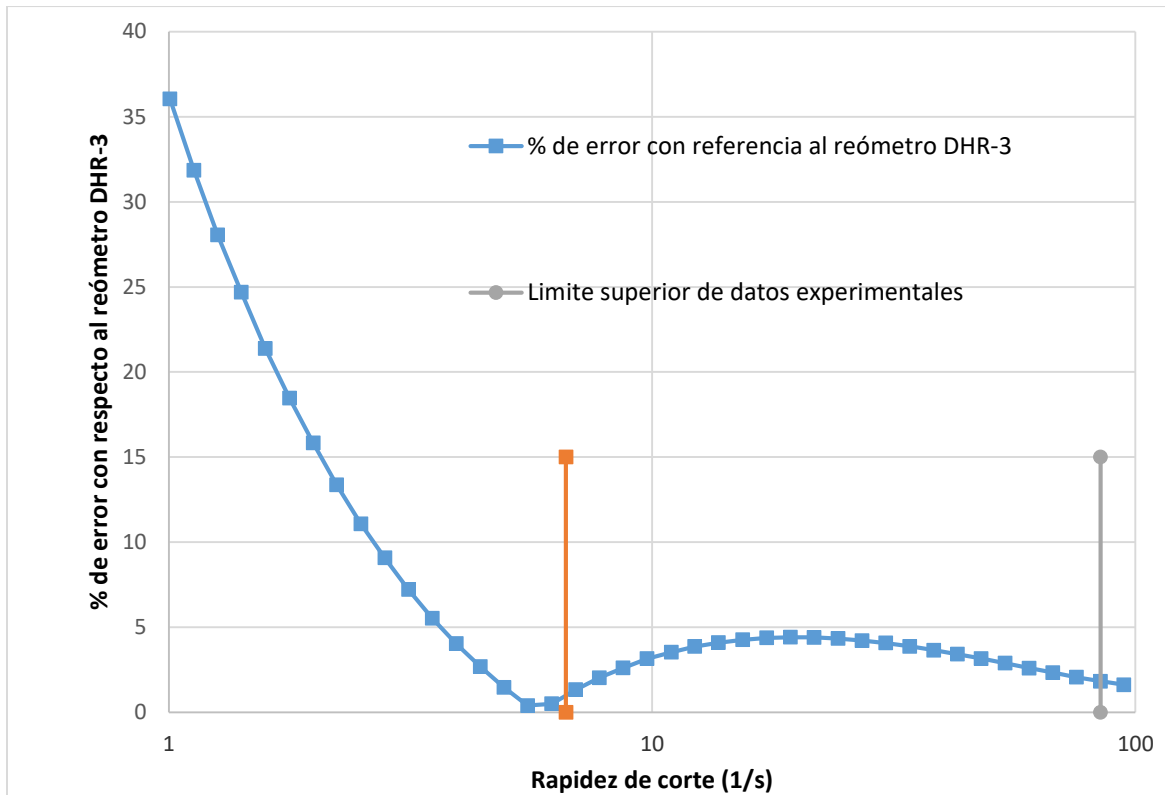


Figura 34 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 1.

El porcentaje de error entre cada punto del modelo obtenido y de los datos experimentales del reómetro de referencia se muestran en la **Figura 34**.

En el rango de medición del reómetro capilar el error porcentual no supera el 4.4%.

El estudio del reómetro DHR-3 de este fluido se realizó hasta 90 s^{-1} . Por lo que esa es la rapidez de corte hasta donde se realiza la validación y aunque existe la posibilidad de predecir el comportamiento de la viscosidad fuera del rango de los datos experimentales, únicamente se realizó la comparación hasta 90 s^{-1} .

Por debajo del límite inferior de datos experimentales (6 s^{-1}) el modelo se aproxima y se sobrepone en la curva de referencia, (ver **Figura 33**), pero aumenta el porcentaje de error por encima del 5% a 5.2 s^{-1} , (ver **Figura 34**).

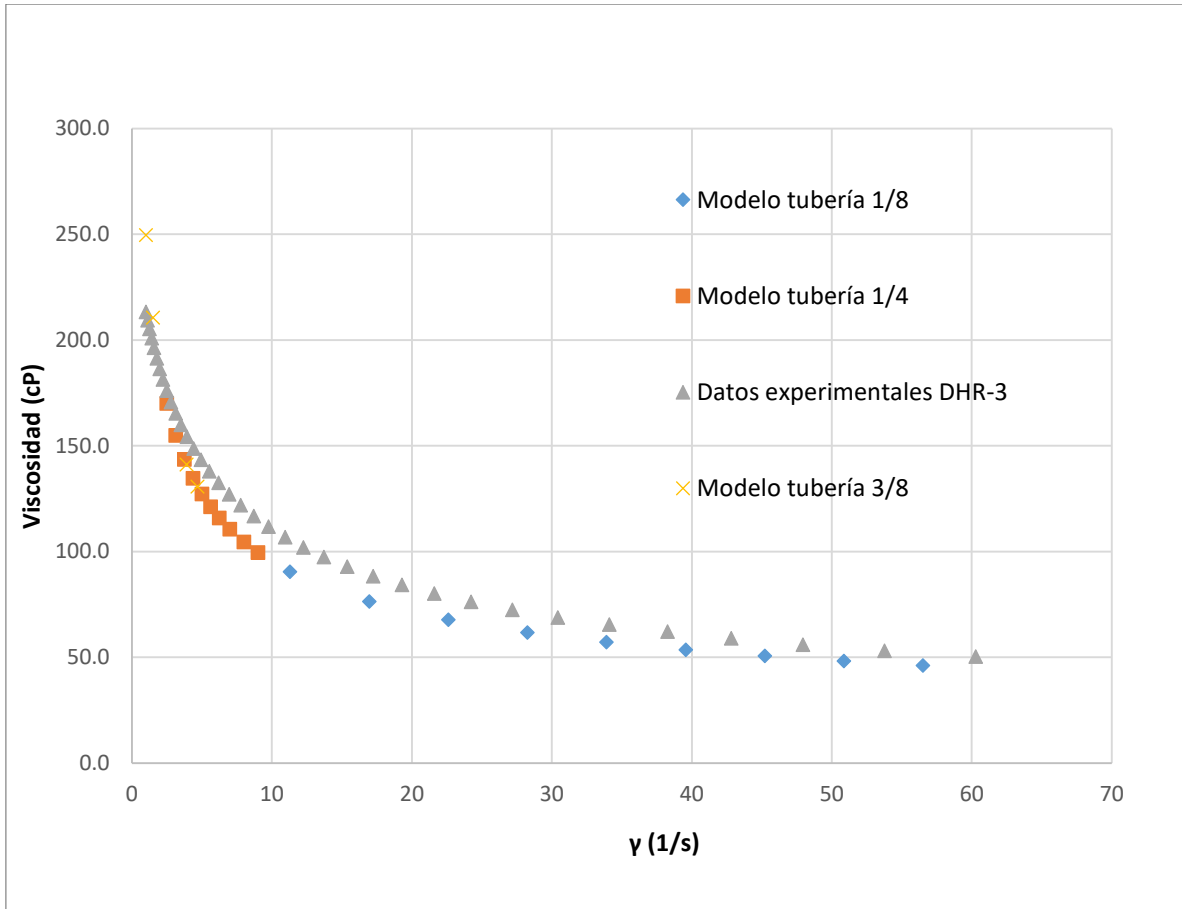


Figura 35 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte γ (1/s) del Experimento 1 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.

Para determinar si existen alteraciones en el patrón de flujo se deben analizar las curvas de los modelos obtenidos a partir de los datos experimentales de caídas de presión de cada capilar (1/8", 1/4" y 3/8") por separado. Se presentan los modelos obtenidos en la **Figura 35** y se observa que la variación de viscosidad en este experimento depende únicamente de la rapidez de corte y no del diámetro de tubo donde se mueva el fluido ya que las curvas siguen la misma tendencia. Con esta información, el fluido del Experimento 1 puede clasificarse como un fluido pseudoplástico y cuyo comportamiento de flujo en tubería es puramente viscoso e independiente del tiempo (las pérdidas de presión en el capilar se registran a diferente tiempo en un mismo experimento por lo que al generar datos de viscosidad con la misma tendencia en la misma rapidez de corte, pero con diferentes diámetros en diferentes flujos se descarta la dependencia con respecto al tiempo).

Experimento 2:

Siguiendo el anterior formato de presentación de resultados y el criterio de independencia del tiempo, se muestra la variación del esfuerzo de corte con respecto a la rapidez de corte en los diferentes diámetros del reómetro capilar en la **Figura 36**.

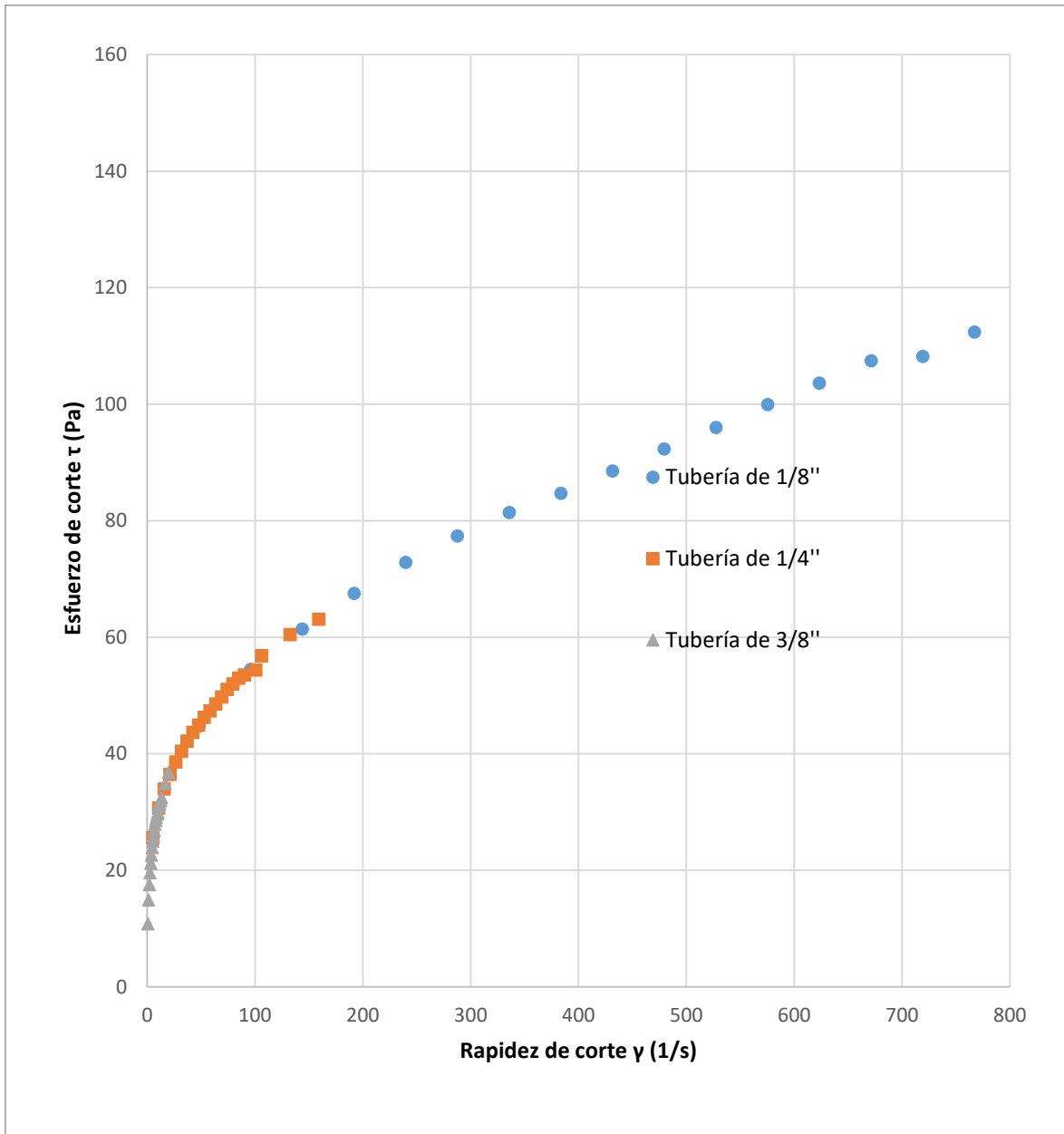


Figura 36 Gráfica de τ (Pa) en función de γ (1/s) del Experimento 2.

Caracterizando este fluido, se propone el siguiente modelo reológico que describe su comportamiento:

$$2. \mu_{nN} = 14.0997335 \gamma_{nN}^{(0.26618474-1)} [=] Pa s$$

Este modelo y los datos obtenidos en el reómetro DHR-3 del Experimento 2 se presentan en **Figura 37**.

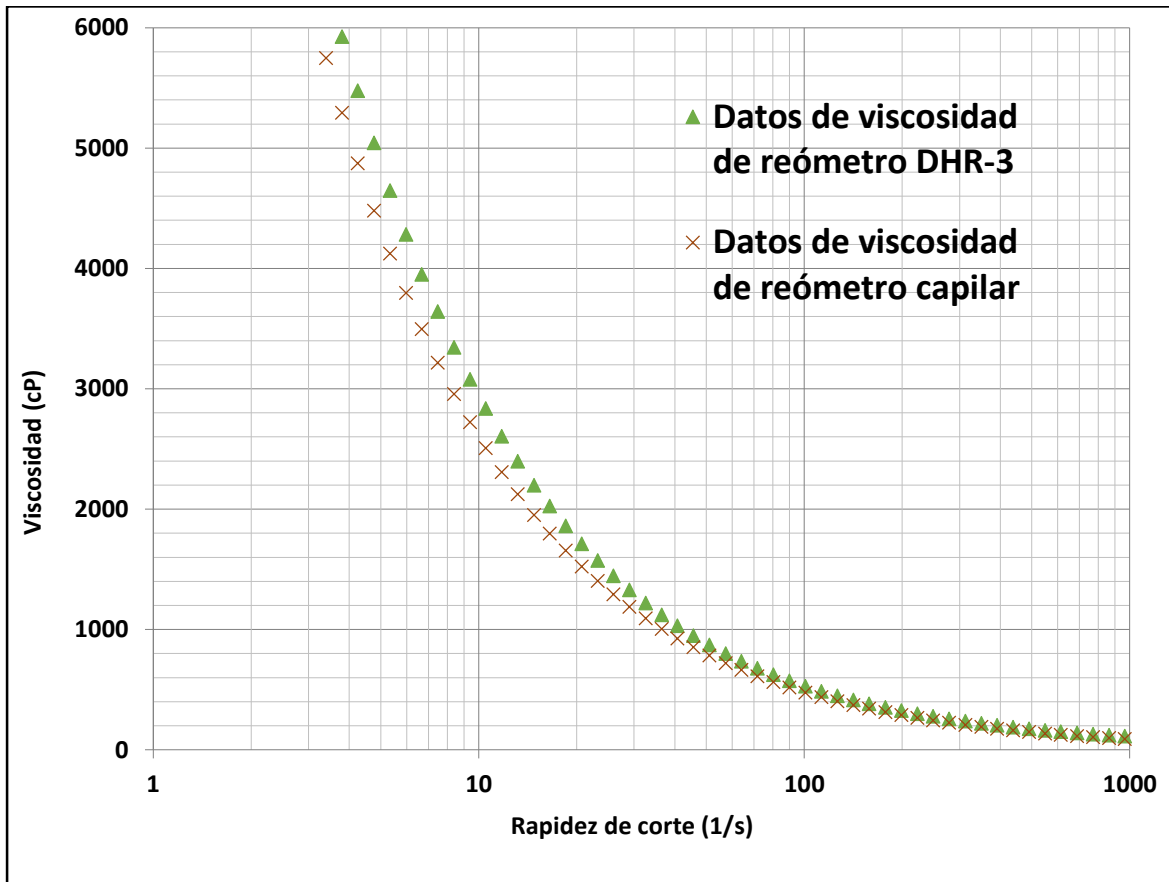


Figura 37 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2.

Para verificar numéricamente los datos obtenidos nuevamente utilizamos la ecuación de porcentaje de error y los resultados se presenta en la **Figura 38**.

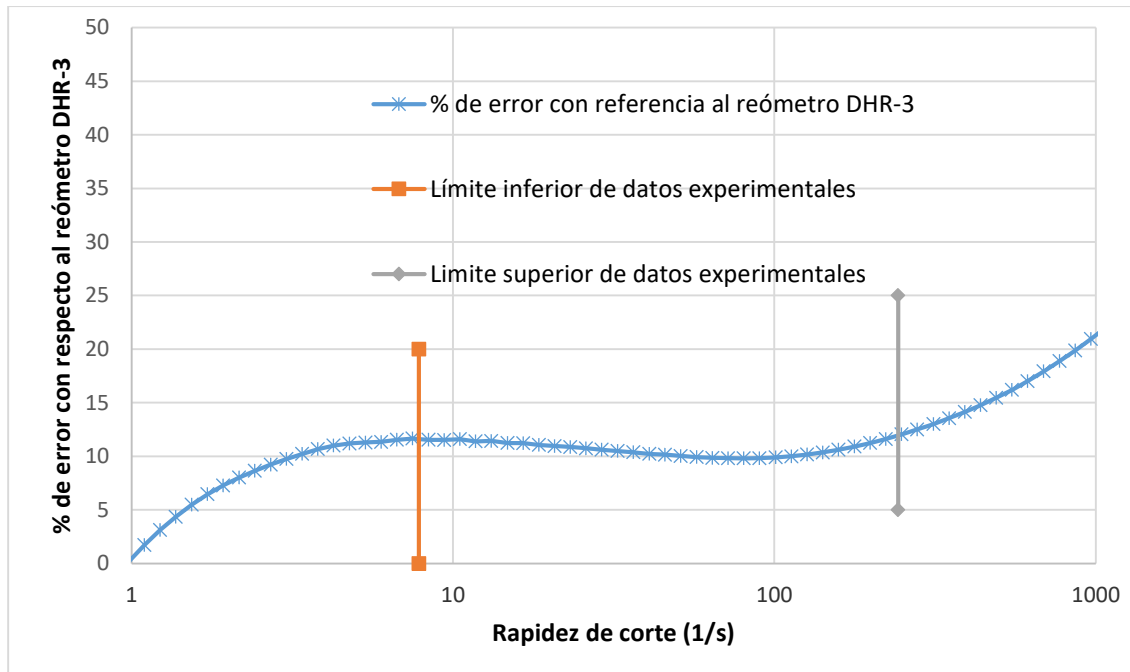


Figura 38 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 2.

En el rango de medición experimental del reómetro capilar, se encuentran valores de 9 a 12%. Debido a esto, los resultados en este experimento se acercan a la referencia, pero no proporcionan una similitud tan grande como el Experimento 1.

Por encima del límite superior de datos experimentales (249 s^{-1}) se cuenta con datos del reómetro DHR-3, pero el modelo no puede predecir el comportamiento con buena exactitud (menor a 10%) fuera de los datos experimentales, pues de 249 s^{-1} comienza a subir el error hasta 22% a 1000 s^{-1} .

En la **Figura 38** puede observarse que por debajo del límite inferior de datos experimentales (6 s^{-1}) el modelo se aproxima a la curva de referencia. Esto es debido al comportamiento numérico del modelo, pero es solo coincidencia, pues, por ejemplo, en rangos de rapidez de corte de 0.1 a 0.2 s^{-1} se encuentra la curva de error extrañamente por debajo de 1%. Aunque puedan aparecer este tipo de coincidencias, no es recomendable extender el modelo por debajo del límite inferior de datos experimentales, pues, como menciona León Loya et al. (1986) a baja rapidez de corte (menor a 5 s^{-1}) el comportamiento de los fluidos no Newtonianos es, en promedio, bastante irregular.

Para determinar si existen alteraciones en el patrón de flujo se deben observar nuevamente, por separado las curvas de los modelos obtenidos de los datos experimentales de caídas de presión de cada capilar (1/8", 1/4" y 3/8").

Los modelos obtenidos son presentados en la **Figura 39**. Se observa que la variación de viscosidad en este experimento depende únicamente de la rapidez de corte y no del diámetro de tubo donde se mueva el fluido ya que calculando los modelos a partir de los datos de las tuberías de diferente diámetro y al graficarlas muestran la misma tendencia como una sola curva.

Se observó en la **Figura 36** que al aumentar la rapidez de corte disminuye la pendiente de las curvas y que no tiene dependencia con respecto al tiempo. Por lo que se clasifica como un fluido pseudoplástico de comportamiento de flujo viscoso e independiente del tiempo.

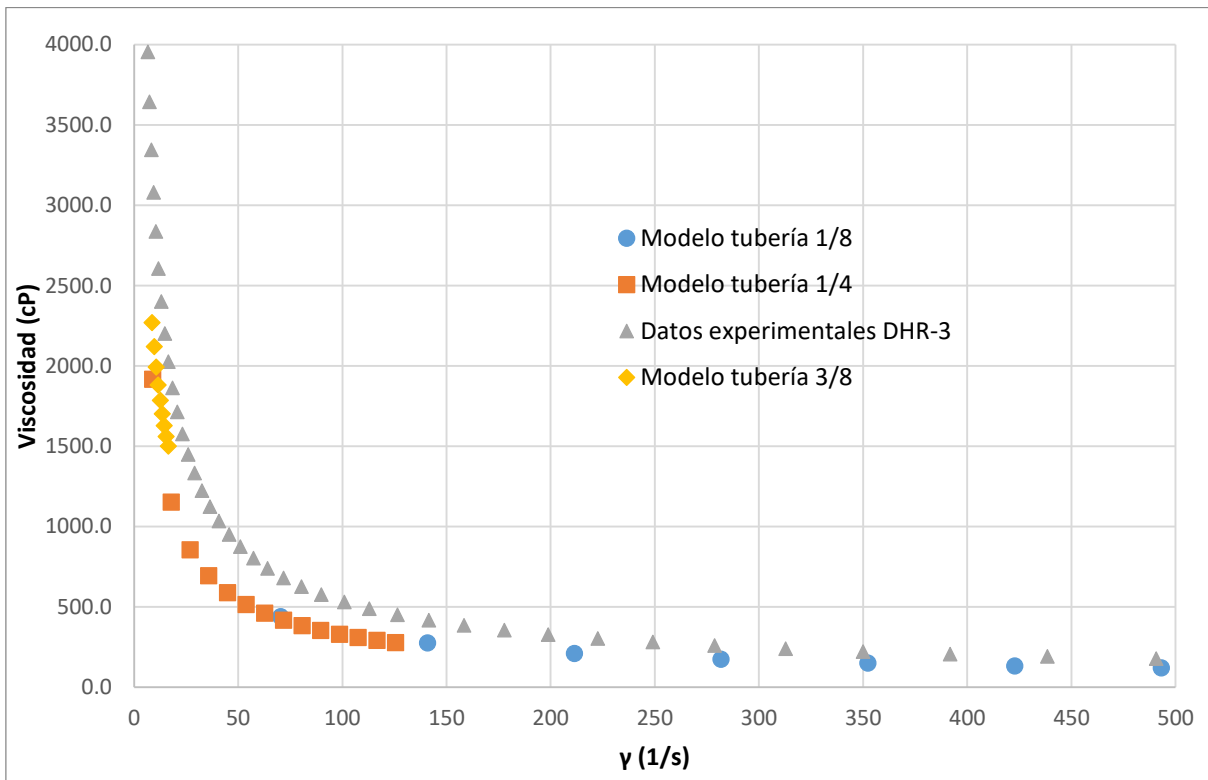


Figura 39 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte γ (1/s) del Experimento 2 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.

Experimento 3:

La **Figura 40** muestra el esfuerzo de corte en función de la rapidez de corte obtenido del Experimento 3. Se observa que la pendiente de los datos se mantiene constante con respecto al incremento de la rapidez de corte, no existe una dependencia con respecto al tiempo y que la viscosidad registrada no depende del diámetro del capilar. Por lo tanto, el comportamiento de esta emulsión en flujo en tubería es se caracteriza como Newtoniano, independiente del tiempo y puramente viscoso.

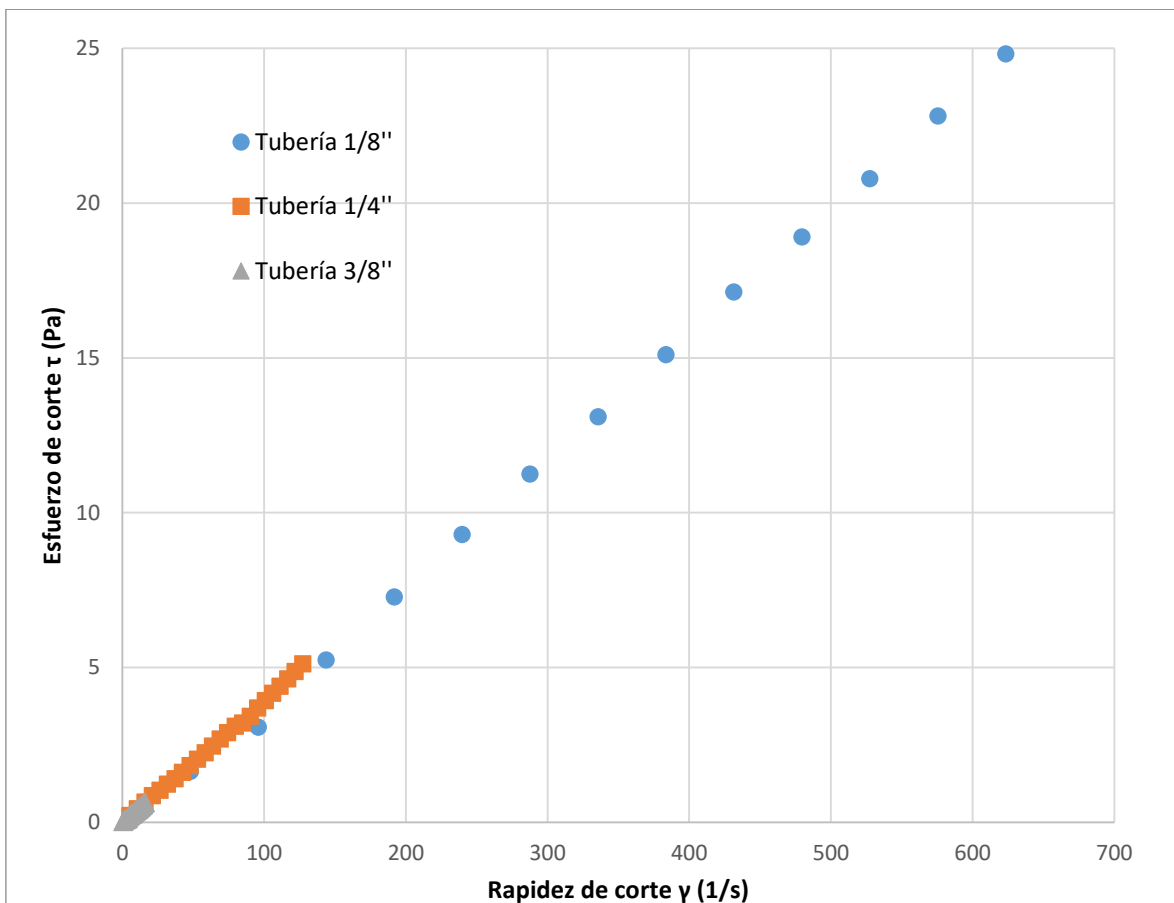


Figura 40 Gráfica de τ (Pa) en función de γ (1/s) del Experimento 3.

Para la caracterización de este fluido, se realiza una regresión lineal para obtener la pendiente de la curva, por lo que se obtiene:

$$3. \mu_N = 0.03969642 [=]Pa \text{ ó } 39.69 [cP]$$

Este resultado y los datos obtenidos en el reómetro DHR-3 del Experimento 3 se presentan en la **Figura 41**.

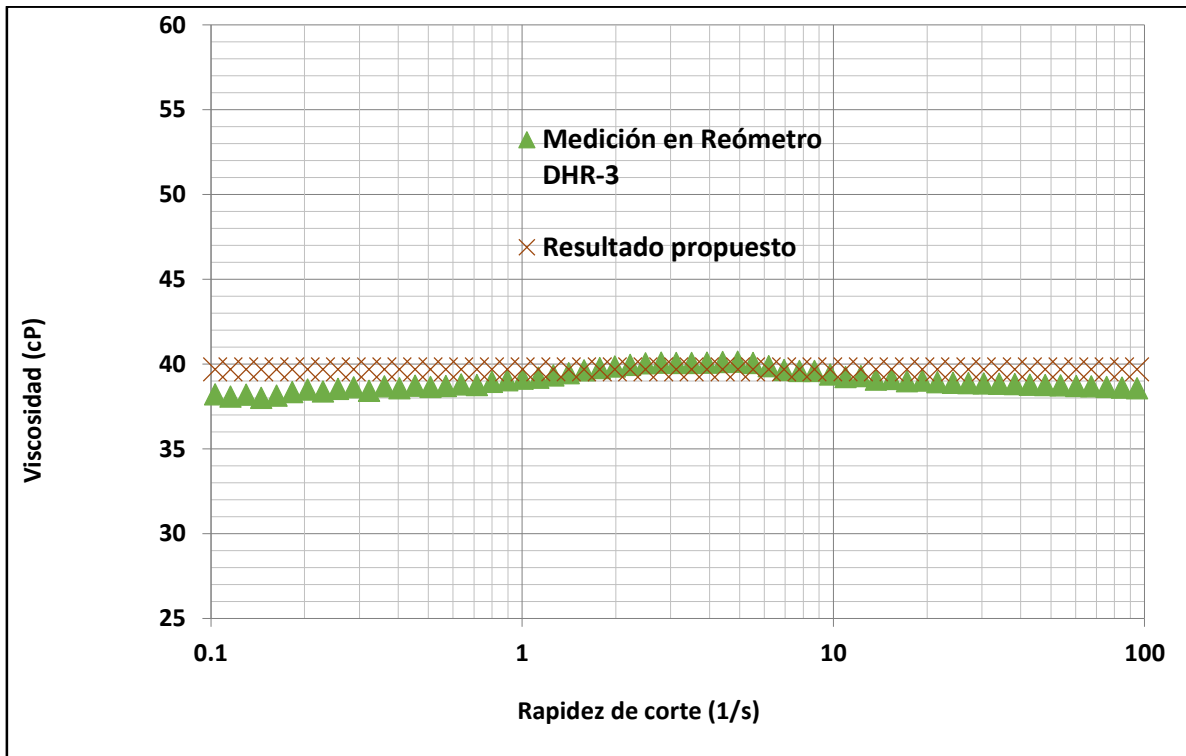


Figura 41 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 3.

Debido a que el comportamiento es predominante de tipo Newtoniano, se desprecian los datos a rapidez de corte menor a 0.1 s^{-1} y se realiza un promedio aritmético.

La concordancia entre los resultados obtenidos con el reómetro capilar y el reómetro DHR-3 es muy buena, teniendo un error de 4%. Por tanto, en esta validación se obtuvieron datos de viscosidad equivalentes.

Cabe aclarar que el reómetro capilar diseñado no es posible obtener valores a ultra baja rapidez de corte ($<0.1 \text{ s}^{-1}$), por lo que se desprecian en el cálculo del promedio aritmético para así comparar el resultado en un rango de medición efectivo para el reómetro capilar.

Experimento 4:

Se muestran en la **Figura 42** los datos de esfuerzo de corte calculados a partir de las caídas de presión en los diferentes diámetros del reómetro capilar.

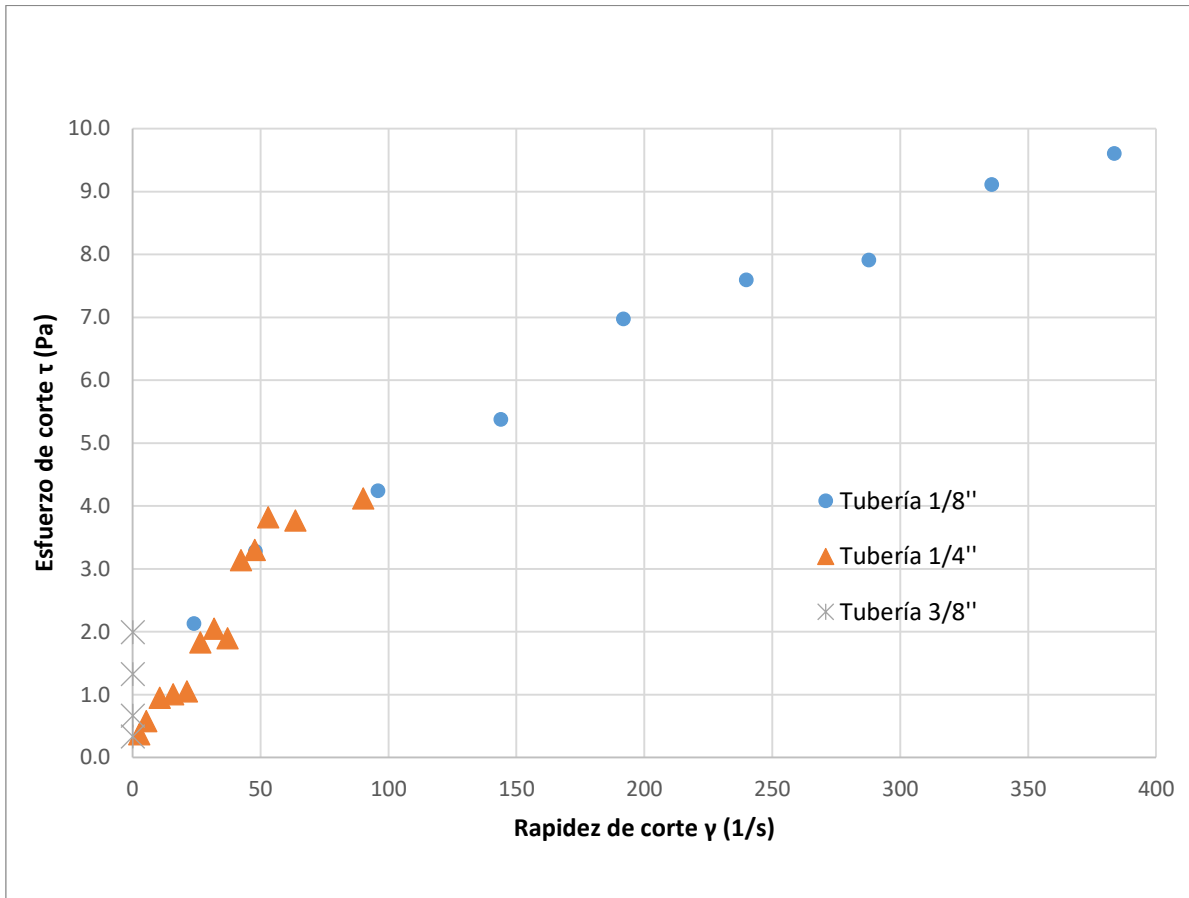


Figura 42 Gráfica de τ (Pa) en función de γ (1/s) del Experimento 4.

El comportamiento de esta emulsión es puramente viscoso, pero a diferencia de los anteriores es dependiente del tiempo ya que se trata de una emulsión poco estable (esto pudo notarse durante la experimentación ya que el fluido presentaba 2 fases en cuestión de minutos). Aún en esta circunstancia, es posible proponer un modelo para intentar reproducir los datos obtenidos del reómetro DHR-3.

Se puso a prueba el siguiente modelo reológico para describir el comportamiento del Experimento 4:

$$4. \mu_{nN} = 0.50599721 \gamma_{nN}^{(0.51927418 - 1)} \text{ [Pa. s]}$$

Este modelo y los datos obtenidos en el reómetro DHR-3 se presentan en la **Figura 43**.

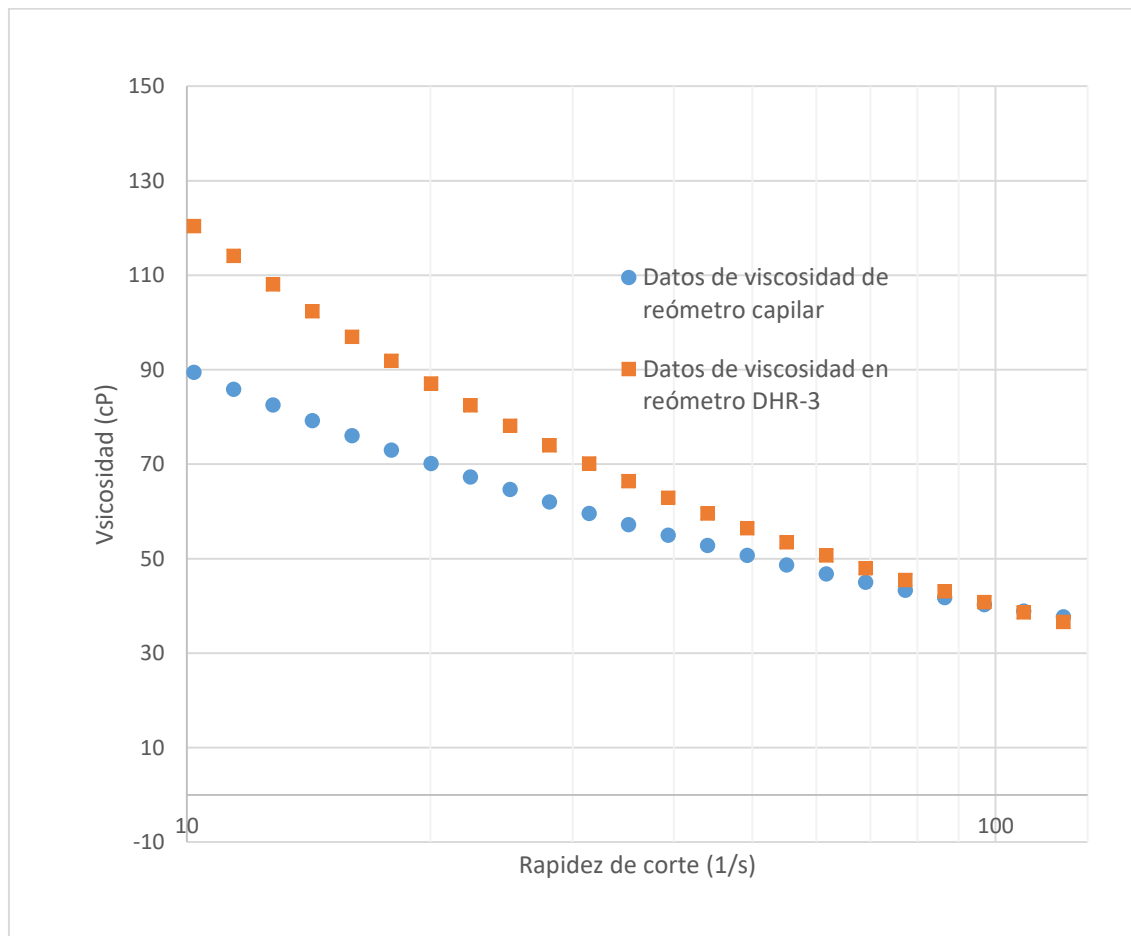


Figura 43 Gráfica logarítmica de viscosidad (cP) en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 4.

Al igual que en los resultados anteriores, para verificar la similitud de los datos obtenidos por el reómetro capilar fabricado y el reómetro tomado como referencia se realiza una diferencia porcentual entre cada punto y se grafica en la **Figura 44**.

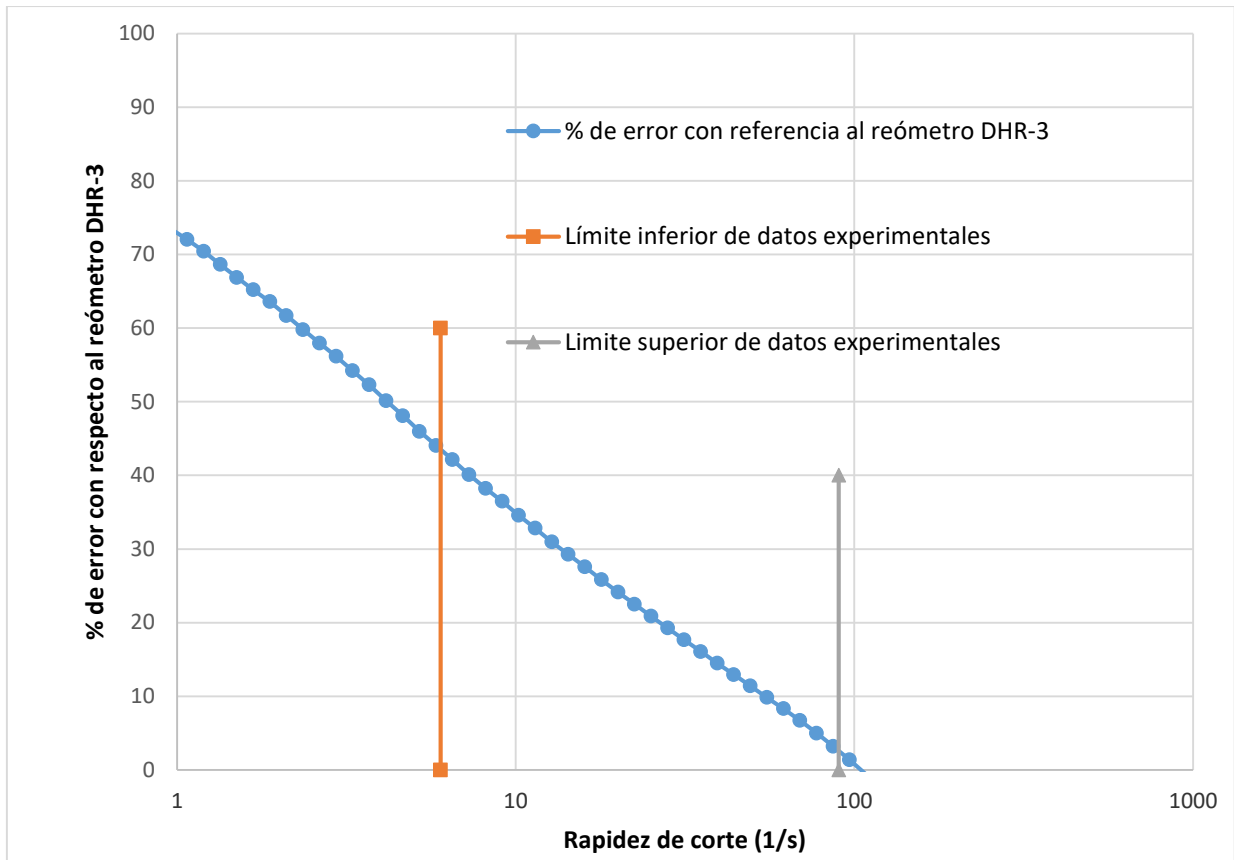


Figura 44 Gráfica de % error en función de $\dot{\gamma}$ (1/s) del Experimento 4.

En el rango de medición del reómetro capilar, el error porcentual se encuentra entre 42 y 3%.

El resultado de este experimento es bastante alejado de los valores obtenidos con el reómetro comercial DHR-3. En primera instancia, se podría llegar a la conclusión de que el error es muy alto y existe un problema con la experimentación, provocando mediciones de viscosidad no muy aproximadas a la referencia.

Es aquí donde resalta uno de los factores más importantes de la medición en reómetro capilar. Como se menciona en la sección Patrones de flujo multifásico Agua-Aceite, la dependencia del flujo en parámetros como la rugosidad de las paredes, condiciones de entrada o diámetro del tubo, por ejemplo, pueden generar transiciones de patrones de flujo.

Las transiciones entre patrones de flujo ocurren porque un régimen se vuelve inestable a medida que se acerca a su límite de estabilidad afectada por la aparición de otro patrón de flujo. Este fenómeno modifica la caída de presión resultante y causa un comportamiento diferente al del flujo totalmente desarrollado.

Los modelos obtenidos por separado de los datos de cada capilar se presentan en la **Figura 45** para analizar si efectivamente existen alteraciones en el patrón de flujo.

Para apreciar mejor la tendencia de los modelos, se agregaron las líneas de tendencia para cada ecuación.

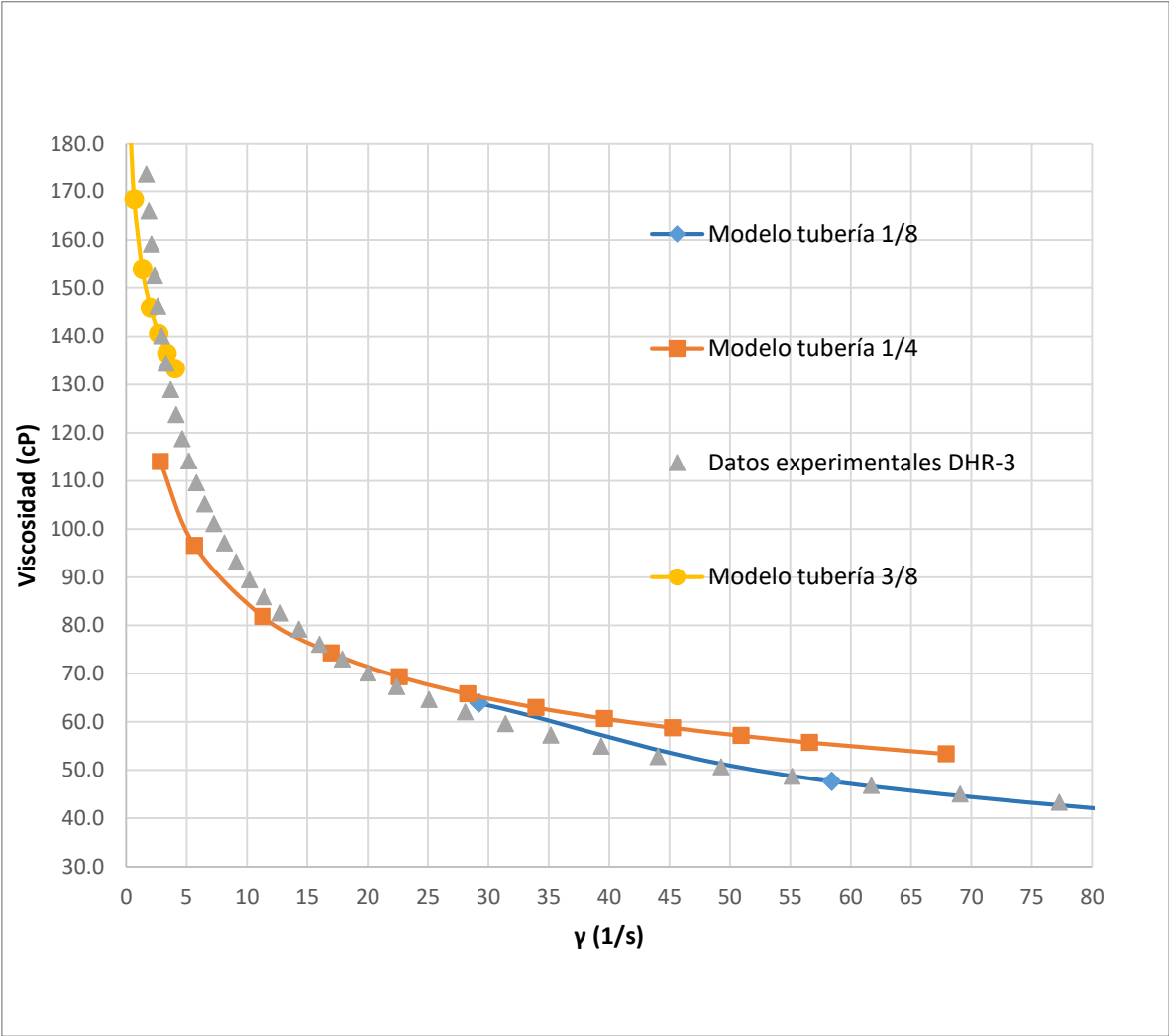


Figura 45 Gráfica de viscosidad (cP) en función de rapidez de corte del Experimento 4 con modelos obtenidos de cada diámetro de tubo.

En este caso los datos experimentales muestran una variación de la viscosidad provocada por el diámetro del capilar en el que se mueva el fluido. Por lo tanto, en este experimento la viscosidad registrada depende tanto de la rapidez de corte como del diámetro del capilar que se utiliza. Este tipo de fenómeno se atribuye a perturbaciones por flujo estratificado el cual no puede ser detectado por una geometría rotacional como la que usa el reómetro de referencia DHR-3, pero si por el reómetro capilar. Por lo tanto, este caso el reómetro DHR-3 no puede usarse como referencia para evaluar la calidad de los resultados obtenidos.

5.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN CFD

Otra forma de validar los modelos simplificados desarrollados en este trabajo es comparar los casos estudiados contra simulaciones detalladas usando temas de CFD⁷, lo cual complementa el estudio experimental.

La justificación para realizar una simulación CFD como validación es que: si el modelo simplificado se usa en un programa CFD y la simulación muestra una diferencia de presión muy cercana a la obtenida experimentalmente, se valida que el modelo experimental aplicado con CFD reproduce correctamente el comportamiento real del experimento. Por lo que cada fluido fue simulado con su respectiva ecuación de viscosidad a diferentes flujos constantes en tuberías rectas, con el diámetro y longitud de los tubos del reómetro capilar. Los modelos de viscosidad obtenidos se presentan a continuación:

$$\text{Experimento 1: } \mu_{nN} = 0.290810486 \gamma_{nN}^{(0.56618918-1)} [=] \text{Pa s}$$

$$\text{Experimento 2: } \mu_{nN} = 14.0997335 \gamma_{nN}^{(0.26618474-1)} [=] \text{Pa s}$$

$$\text{Experimento 3: } \mu_N = 0.03969642 [=] \text{Pa s}$$

$$\text{Experimento 4 } \mu_{nN} = 0.50599721 \gamma_{nN}^{(0.51927418 -1)} [=] \text{Pa s}$$

⁷ CFD: Computational Fluid Dynamics. Se ofrece un panorama general de la simulación en CFD en el anexo Computational Fluid Dynamics.

Los resultados de la simulación de los modelos del Experimento 1 y 2 se presentan a continuación en las **Tabla 5** y **Tabla 6** respectivamente.

Experimento 1: $\mu_{nN} = 0.290810486 \gamma_{nN}^{(0.56618918-1)} [=] \text{Pa s}$

Tabla 5 Comparación de modelo del Experimento 1 con simulación en CFD.

Modelo 1	$\Delta P(1/8")$ (Pa)	$\Delta P(1/4")$ (Pa)	Flujo(mL/min)
Experimental	288391	47294	7
CFD	269419	42367	
%Error	7.04	11.63	
Experimental	371749	57827	10
CFD	358661	54056	
%Error	3.65	6.98	
Experimental	423832	64241	12
CFD	397557	61734	
%Error	6.61	4.06	

Experimento 2: $\mu_{nN} = 14.0997335 \gamma_{nN}^{(0.26618474-1)} [=] \text{Pa s}$

Tabla 6 Comparación de modelo del Experimento 2 con simulación en CFD.

Modelo 2	$\Delta P(1/8")$ (Pa)	$\Delta P(1/4")$ (Pa)	Flujo(mL/min)
Experimental	2541709	737328	5
CFD	2247424	742727	
%Error	13.09	0.73	
Experimental	3221604	884499	10
CFD	2939514	894995	
%Error	9.60	1.17	
Experimental	3670319	993489	15
CFD	3277071	997640	
%Error	11.98	0.42	

Los resultados fueron satisfactorios, pues para las caídas de presión (de la simulación y experimental) a tres diferentes flujos se encontró similitud de los valores de 3.7-11.7 % con respecto al valor otorgado por la simulación. Los resultados en ambas tablas de la caída de presión del tramo de mayor diámetro (3/8") fueron omitidos, pues para generar el modelo, se omitieron datos generados en flujos menores a 25 mL/min.

Por último, se presenta en la **Tabla 7** el resultado de la simulación del fluido Newtoniano. Se obtuvieron también resultados similares de 3.7-11 % con respecto al valor otorgado por la simulación. En la **Tabla 8** se presenta el resultado para la simulación de la emulsión inestable.

Experimento 3: $\mu_N = 0.03969642 [=] \text{Pa s}$

Tabla 7 Comparación de modelo del Experimento 3 con simulación en CFD.

Modelo 3	$\Delta P(1/8")$ (Pa)	$\Delta P(1/4")$ (Pa)	$\Delta P(3/8")$ (Pa)	Flujo(mL/min)
Experimental	457217	26902	879	7
CFD	427563	26512	798	
%Error	6.94	1.47	10.09	
Experimental	659826	38786	1217	10
CFD	613584	37873	1114	
%Error	7.54	2.41	9.21	
Experimental	796293	47049	1431	12
CFD	753165	45447	1368	
%Error	5.73	3.52	4.60	

Experimento 4: $\mu_{nN} = 0.50599721 \gamma_{nN}^{(0.51927418 - 1)} [=] \text{Pa s}$

Tabla 8 Comparación de modelo del Experimento 4 con simulación en CFD.

Modelo 4	$\Delta P(1/8")$ (Pa)	$\Delta P(1/4")$ (Pa)	Flujo(mL/min)
Experimental	265058	34951	5
CFD	320720	43279	
%Error	21.70	23.83	
Experimental	405032	73025	10
CFD	477411	87155	
%Error	17.87	19.35	
Experimental	429267	78710	17
CFD	501770	93436	
%Error	16.89	18.71	

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

La construcción de un reómetro capilar para realizar caracterizaciones de fluidos implicó la necesidad de conocer y definir el concepto de viscosidad, así como el comportamiento de un fluido al aplicarle un esfuerzo, los diferentes modelos de viscosidad, la deducción de las ecuaciones generales de flujo laminar y el comportamiento de flujo de fluidos Newtonianos y no Newtonianos.

Además del conocimiento teórico, fue necesario contar con componentes físicos aptos para la medición y el acondicionamiento del sistema de estudio, tales como el controlador de temperatura, el sistema de desplazamiento, los sensores de presión, el sistema de adquisición de datos y los capilares de distintos diámetros de la estructura principal.

Además, se desarrollaron metodologías para el cálculo de los resultados y para la experimentación. Es muy recomendable seguirlas siempre al pie de la letra para establecer un patrón experimental y evitar cometer errores en el análisis de los resultados. Esto ayuda en la calidad de los resultados obtenidos y a la congruencia de los experimentos realizados y su repetitividad.

El resultado del estudio realizado de cuatro fluidos diferentes y su ajuste a un modelo de viscosidad de la forma de la ecuación de Ostwald-De Waele fue comparado con mediciones en un reómetro comercial marca TA Instruments modelo DHR-3.

Las discrepancias porcentuales de los Experimentos 1,2 y 3 con respecto a la referencia DHR-3 fueron de 4.4%, 12% y 4% respectivamente, así como 35% para el Experimento 4. En este último caso mostró un ejemplo de una característica importante en la medición de la reología de un fluido en capilares, ya que se trató de una emulsión inestable en la que pueden existir variaciones de patrones de flujo. Este fenómeno no es detectable en un reómetro rotacional como el DHR-3, pero sí en uno capilar.

La variación porcentual en los resultados con respecto a la referencia, así como una simulación realizada con CFD evaluando los cuatro modelos de viscosidad propuestos (que arrojan desviaciones porcentuales de 1 a 13% con respecto a la simulación) permiten evaluar la calidad de las mediciones realizadas en el reómetro capilar.

Se concluye que con la construcción de este reómetro capilar es posible obtener medidas de viscosidad en un proceso industrial o de laboratorio a condiciones atmosféricas o hasta 4500 PSI y temperatura de 22 a 90 °C, así como en un rango de rapidez de corte o cizalla de 6 a 300 s⁻¹ en fluidos cuya viscosidad no varíe con el tiempo.

REFERENCIAS

Martín Domingo, Agustín. 2011. Apuntes de mecánica de fluidos. Universidad Politécnica de Madrid:(s.e.)⁸. Madrid, España.

León Loya, Juan G., Martínez R., Luis, Cortés M., Álvaro. 1986. Reología de fluidos no-Newtonianos a través de conductos circulares. División de perforación. Departamento de estudios y desarrollo de modelos de perforación, Biblioteca del IMP: (s.e.). Distrito Federal, México.

Macosko, Christopher W. 1994. Rheology Principles Measurements and Applications: Wiley-VCH. Estados Unidos.

Centro Nacional de Metrología. (s.f.)⁹. Laboratorio de Viscosidad. CENAM. Recuperado de <http://www.cenam.mx/> en junio 2016. México.

Batchelor, G.K. 1980. An Introduction to Fluid Dynamics: Cambridge University Press. England.

Bird, R., Stewart, W., Loghtfoor, E. 2006. Fenómenos de transporte. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Wisconsin-Madison: Limusa Wiley. Wisconsin, Estados Unidos.

Sarenque Romero, Javier de J. 1995. Desarrollo del deslizamiento en soluciones poliméricas y un nuevo método para evaluar los efectos de extremos en reómetros de capilar. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas: (s.e.). México.

López Carrasquero, Francisco. 2004. Fundamentos de polímeros. VI Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química: (s.e.). Mérida, Venezuela.

Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. 1989. An Introduction to Rheology. Rheology Series 3, 8833645: Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.

Rabinowitsch, B., Eisenschitz, R., Weissenberg, K. 1929. Pruebas de materiales: Mitt. Alemania.

Mooney, M. 1931. Explicit Formulas for Slip and Fluidity, p. 210: Journal of Rheology.

Metzner A.B., Reed, J.C. 1955. Flow of non-Newtonian fluids—correlation of the laminar, transition and turbulent flow regions: AIChE Journal. Delaware, Estados Unidos.

⁸ (s.e.): Sin editorial

⁹ (s.f.): Sin fecha

- Méndez Sánchez, A.F., Pérez Trejo, L., Paniagua Mercado, A.M. 2010.** Determinación de la viscosidad de fluidos Newtonianos y no Newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas: (s.e.). México.
- Trallero, J.L., Sarica, Cem, Brill, J.P. 1997.** A Study of Oil/Water Flow Patterns in Horizontal Pipes. University of Tulsa: SPE Production & Facilities. Oklahoma, Estados Unidos.
- Guzhov, G., Guzhov, A.I., Grishin, A.D., Medvedev, V.F. and Medvedeva O.P. 1973.** Emulsion Formation during the Flow of Two Liquids in a Pipe. Vol. 8. Neftyanoe Khozyaistvo: (s.e.). Rusia.
- Nadlre, M., Mewes, D. 1976.** Flow Induced Emulsification in the Flow of Two Immiscible Liquids in Horizontal Pipes. University of Tulsa: (s.e.). Oklahoma, Estados Unidos.
- NKS de México. (s.f.).** El acero inoxidable. Recuperado de <http://www.nks.com/> en noviembre 2017. México.
- High Pressure Equipment Company ©. 2017.** Full Line Catalog. Pennsylvania. Recuperado de <https://www.highpressure.com/> en junio 2018. Estados Unidos.
- Proserv©. (s.f.).** Sampling Cylinder. Recuperado de <https://www.proserv.com> en mayo 2018. Estados Unidos.
- Blazek, J. 2015.** Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Butterworth-Heinemann, 3era Edición. Estados Unidos.
- Control Técnico y Representaciones. (s.f.).** Hoja de seguridad de aceite mineral. Recuperado de <https://www.ctr.com.mx/> en junio 2018. México.
- JC Portal®. (s.f.).** Hoja de seguridad de acrilamida. JC Portal Drilling Supplies S.A. de C.V. Recuperado de [http:// http://www.jcpds.com.mx/](http://http://www.jcpds.com.mx/) en junio 2018. México.

ANEXO 1 EFECTO DE EXTREMOS

El comportamiento de flujo en un capilar depende de sus dimensiones y la geometría, por lo que la existencia de una entrada y una salida en sus extremos induce arreglos en el patrón de flujo. Estos arreglos provocan cambios de presión adicionales a los que ocurren en la región donde el flujo se encuentra totalmente desarrollado.

En el flujo en capilares no se conoce la región viscosimétrica y existen cambios de presión en los extremos del capilar que son conocidos como efectos de extremos. Por lo tanto, lo que comúnmente se hace es medir la caída de presión total entre los extremos del capilar y posteriormente se hacen correcciones para determinar los efectos producidos en los extremos del capilar mediante la teoría desarrollada por Bagley.

Con la caída de presión y los datos de flujo se determina la viscosidad de un fluido. Por otra parte, la determinación de las longitudes de entrada y salida de un capilar no es sencilla, ya que estas longitudes dependen del tipo de flujo que se desea caracterizar y de los parámetros experimentales (Sarenque Romero, 1995).

En la bibliografía Barnes et al. (1989) menciona que si el cociente de la longitud total del capilar entre su diámetro (L/D) es mayor que 50, no es necesario hacer ninguna corrección por efectos de extremos, ya que la diferencia de presión provocada por los extremos es despreciable a la generada por el paso del fluido a través del capilar. Por lo tanto, el esfuerzo de corte puede ser determinado midiendo la caída de presión total del capilar.

El método de Bagley consiste en graficar la diferencia de presión en función de cocientes L/D a una rapidez de deformación constante, (ver **Figura 46**).

Si la relación entre ΔP y L/D es lineal, entonces el esfuerzo de corte en la pared del capilar se expresa como sigue:

$$\tau_w = \frac{\Delta P}{4\left(\frac{L}{D} + n\right)} \quad nD = L_e$$

$nD = L_e$ representa una longitud extra la cual debería ser adicionada a la longitud del capilar para explicar la influencia de los efectos de extremos sobre la caída de presión.

En la ecuación anterior n es la abscisa al origen y se encuentra extrapolando la recta a $\Delta P = 0$. Esta magnitud corresponde a las pérdidas de presión debidas a los efectos de extremos y la pendiente de la recta es el esfuerzo de corte en la pared del capilar.

Bagley considera que para obtener su gráfica de ΔP en función de L/D se pueden emplear diferentes diámetros siendo lo único importante el parámetro L/D , es decir, que todos los tubos de diámetro diferente con L/D constante tendrán la misma caída de presión debida a efectos de extremos.

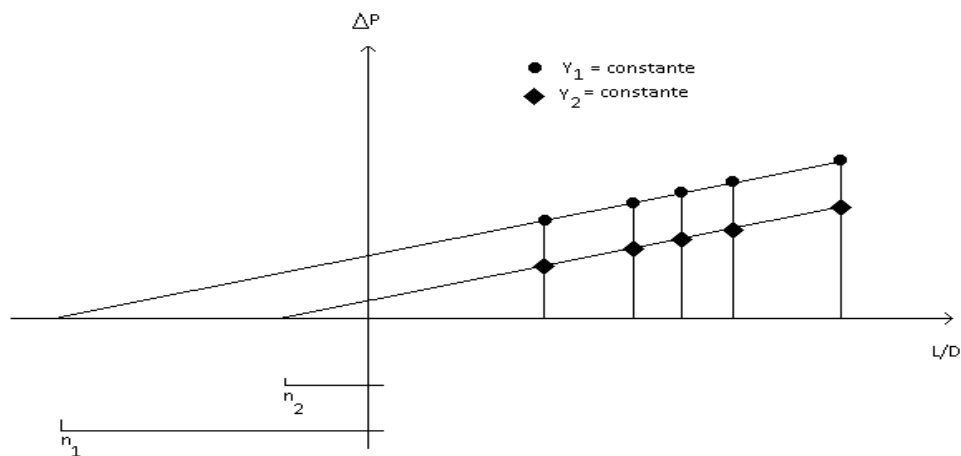


Figura 46 Ejemplo de gráfica para la corrección de Bagley.

La corrección de Bagley se usa extensamente para cualquier valor de L/D y para cualquier tipo de fluido.

El método de Bagley funciona para fluidos Newtonianos. Esto se debe a que el flujo se desarrolla rápidamente en dichos casos, por lo que la relación entre ΔP y L es lineal.

ANEXO 2 EFECTO DE DESLIZAMIENTO

La selección de una apropiada condición de frontera para la velocidad del fluido adyacente a una superficie sólida ha sido discutida desde los inicios de la mecánica de fluidos y la reología. Algunos autores han mencionado que se presentan dificultades con la condición de frontera de “no- deslizamiento”. Pues en algunos sistemas de este tipo se han observado gastos mayores a los predichos teóricamente, lo cual ha llevado a pensar en a la aparente violación de la condición de frontera “no deslizamiento” (Sarenque Romero,1995).

El fenómeno de deslizamiento puede explicarse según Mooney (1931) por la migración de las macromoléculas inducida por el campo no-homogéneo de esfuerzos. En el flujo de tubos capilares, las macromoléculas emigran de la región cercana a la pared, en donde hay un mayor esfuerzo, hacia la región central en donde los esfuerzos son menores. En la región cercana a la pared las macromoléculas tenderán a estar extendidas. Esta difusión provoca una disminución en la concentración de macromoléculas en la región cercana a la pared y consecuentemente, la formación de una capa de fluido con viscosidad más baja que en el resto del volumen. El fluido restante parece deslizarse a través del capilar, aunque la capa de fluido menos viscosa cerca de la pared no viola la condición frontera de no deslizamiento en la pared.

El fenómeno de deslizamiento se interpretó por Mooney como una anomalía grande de la velocidad en una capa delgada en la pared. El consideró que este efecto podía ser tratado matemáticamente como una discontinuidad de la velocidad del fluido, esto es, un deslizamiento, si el espesor de la capa delgada es pequeño en comparación con el diámetro del viscosímetro (Sarenque Romero,1995).

Para más detalle del método propuesto por Mooney puede referir a la bibliografía Mooney (1931).

ANEXO 3 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

La dinámica de fluidos computacional (CFD en inglés o DFC en español) es el campo de estudio dedicado a resolver numéricamente ecuaciones de flujo de fluidos. El método experimental y la CFD se complementan entre sí.

La ventaja de la CFD es que puede abreviar el ciclo de diseño por estudios paramétricos que son controlados con cuidado, de modo que reduce la cantidad necesaria de análisis experimental.

En este anexo, se usa la descripción de los pasos para realizar una simulación CFD según Blazek (2015) y se utilizan capturas de pantalla de Fluent® para ejemplificar. Se presentan los fundamentos de la CFD desde el punto de vista de un usuario y se muestran las indicaciones generales.

Para resolver de manera numérica las ecuaciones de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes y con ello poder representar el campo de flujo, los esfuerzos de corte, velocidad, perfiles de presión y líneas de corriente en el simulador (eg. Fluent®) es necesario seguir el siguiente procedimiento general:

1. Se elige un dominio computacional y se genera una malla (también conocida como red de nodos); el dominio se divide en muchos elementos pequeños llamados celdas.

Para dominios de dos dimensiones, las celdas son áreas, mientras que para dominios de tres dimensiones las celdas son volúmenes. Puede considerarse a cada celda como un pequeño volumen de control en el que se resuelven las versiones separadas de las ecuaciones de conservación y transporte.

La calidad de una solución CFD depende directamente de la calidad de la malla, (ver **Figura 47**).

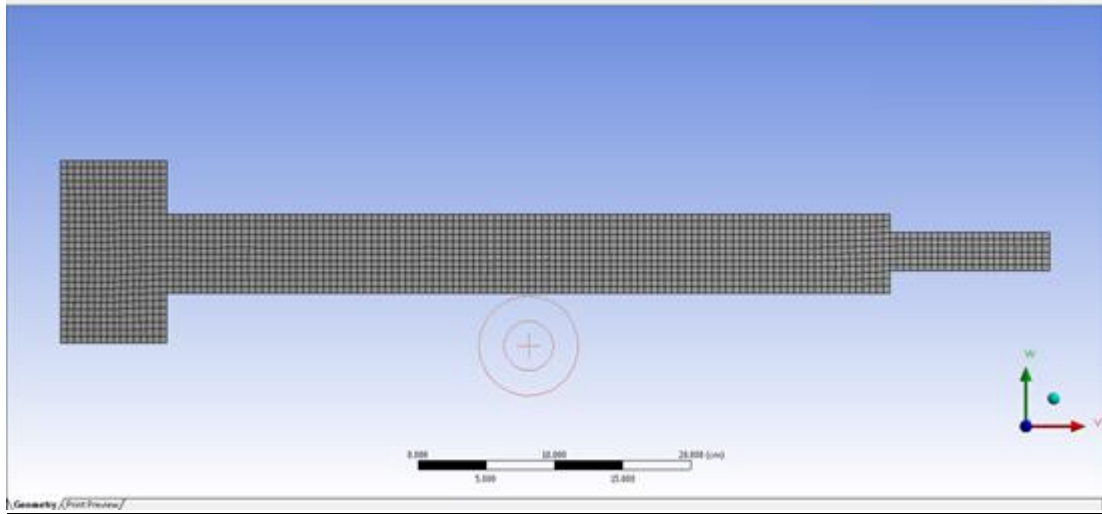


Figura 47 Ejemplo de malla en programa de CFD.

2. Las condiciones de frontera se especifican en cada lado del dominio computacional en flujos en dos dimensiones o en cada cara del dominio en flujos de tres dimensiones, (ver **Figura 48**).

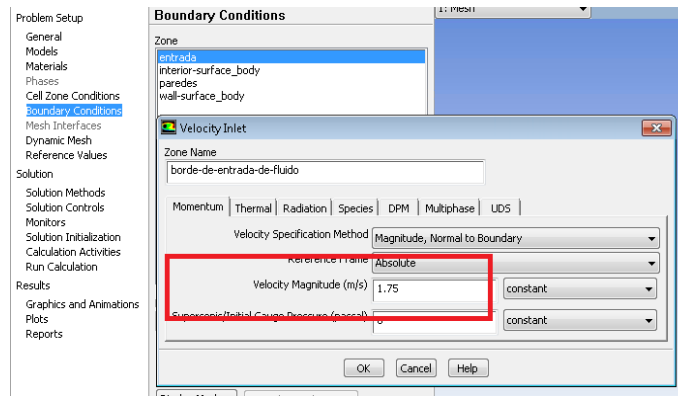


Figura 48 Ejemplo de condiciones de frontera.

3. Se especifica el tipo de fluido a simular, junto con las propiedades del fluido (temperatura, densidad, viscosidad, etc.). La mayoría de paquetes de CFD tiene integrada la base de datos de propiedades de fluidos más comunes, (ver **Figura 49**).

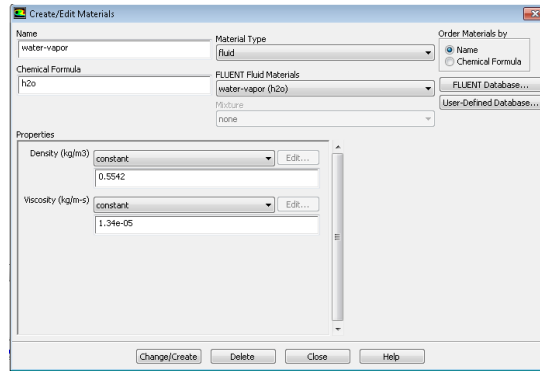


Figura 49 Ejemplo de configuración de condiciones de la simulación.

4. Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución. Estos son específicos para cada paquete de CFD. Los parámetros predeterminados son apropiados para los problemas de flujo simple, (ver **Figura 50**).

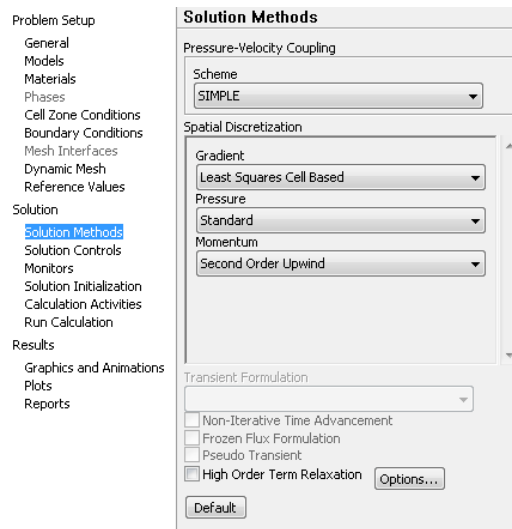


Figura 50 Ejemplo de configuración de parámetros numéricos y algoritmos de solución.

5. Los valores de primera aproximación para las variables de campo de flujo se especifican para cada celda. Estas son condiciones iniciales, que podrían ser correctas o no, pero son necesarias como un punto de partida, para que el proceso de iteración pueda proceder. Es importante destacar que, para los cálculos apropiados de flujo no estacionario, las condiciones iniciales deben ser correctas, (ver **Figura 51**).

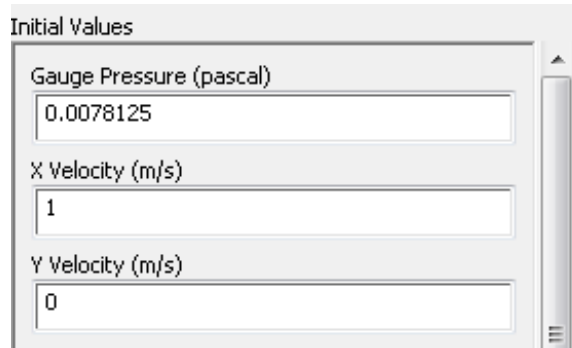
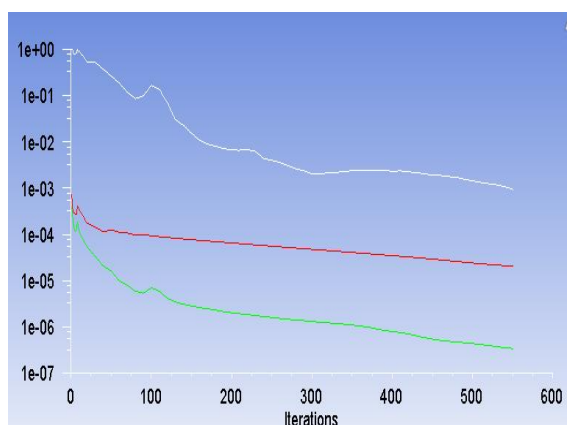


Figura 51 Ejemplo de configuración de valores iniciales.

6. Al comenzar con los valores de primera aproximación, las formas discretizadas de las ecuaciones de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes se resuelven por iteración, por lo general en el centro de cada celda. En estas iteraciones, se les da solución inexacta a las ecuaciones, por lo que se suman todos los errores en sus términos y componen el residuo. En una solución de CFD el residuo nunca es igual a cero, pero conforme se efectúen las iteraciones este tiende a disminuir. Un residuo puede considerarse como una medida de la desviación de una solución numérica para determinada ecuación respecto a la solución exacta y se tiende a monitorear el residuo promedio relacionado con cada ecuación para ayudar a determinar cuándo converge la solución, (ver **Figura 52**).



```

iter continuity x-velocity y-velocity time/iter
530 1.1703e-03 2.1689e-05 3.7704e-07 154:57:39 9999470
540 1.0738e-03 2.1066e-05 3.5480e-07 179:31:16 9999460
! 550 solution is converged
550 9.3285e-04 2.0483e-05 3.4151e-07 199:10:09 9999450

```

Figura 52 Gráfica de error en las ecuaciones de flujo en función del número de iteración (izquierda). Ejemplo de convergencia de la solución (derecha).

7. Por último, cuando converge la solución, las variables del campo de flujo como la velocidad y la presión se trazan y analizan de manera gráfica. Los usuarios pueden definir y analizar también otras funciones particulares que se forman mediante combinaciones algebraicas de variables de campo de flujo, (ver **Figura 53**).

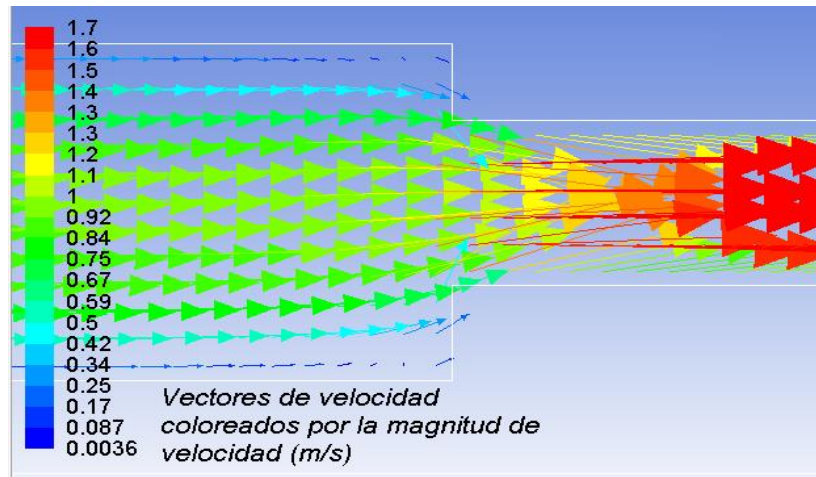



Figura 53 Ejemplo de simulación donde se muestra la velocidad local a lo largo de la geometría acotada por colores.

ANEXO 4 IT10 ACONDICIONAMIENTO DE CILINDROS PORTA MUESTRA

	Universidad Nacional Autónoma de México	Código:IT10	IT10 ACONDICIONAMIE NTO DE CILINDROS PORTA MUESTRA	USIP
	Facultad de Química	Fecha de emisión:		
	Departamento de Ingeniería Química	Versión: 001		
	Unidad de Servicios para la Industria Petrolera			

1. OBJETIVO

Acondicionamiento y lavado de cilindros porta muestras (CPM) Proserv.

2 ALCANCE

El Presente Procedimiento Normalizado de Operación (PNO) está dirigido a todo el personal autorizado de los laboratorios de la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera (USIP).

3. RESPONSABILIDADES

- 3.1 Es responsabilidad del Coordinador General de la USIP el supervisar, autorizar e implementar los procedimientos normalizados de operación y verificar el cumplimiento de los mismos en los espacios de la USIP.
- 3.2 Es responsabilidad del Coordinador General de la USIP el controlar y distribuir los procedimientos normalizados de operación.
- 3.3 Es responsabilidad del titular de cada área documentar una actividad mediante la elaboración de un procedimiento normalizado de operación, así como su divulgación mediante la capacitación y evaluación del mismo.
- 3.4 Es responsabilidad del titular de cada área la actualización de cada uno de sus procedimientos de manera oportuna.
- 3.5 Es responsabilidad del titular de área resguardar los procedimientos. Es responsabilidad de todo el personal vigilar el cumplimiento de cada uno

de los procedimientos e informar de cualquier incidente al titular del área de cualquier percance que sufra el personal o los equipos e instrumentos durante las labores.

4. EQUIPO Y MEDIDAS DE SEGURIDAD

1. Cilindro Porta Muestra
2. Base de Cilindro Porta Muestra
3. Adaptador protector de cuerdas
4. Adaptador de back up ring
5. Papel para limpieza (Sanitas)
6. Línea corta de Tubing 1/8" OD, con conexión Autoclave
7. Recipiente de plástico de 500ml
8. Piseta con cloruro de metileno
9. Palo de madera de 2" de diámetro x 60 cm de largo
10. Guantes
11. Lentes de seguridad
12. Laves españolas de 3/8" y 1/2"
13. 1/2 Litro de Marcol 82
14. Lubricante para O-rings

5. PROCEDIMIENTO

Consideraciones:

Antes de abrir un cilindro porta muestra, es indispensable revisar la presión a la que se encuentra el cilindro, así como también verificar qué fluido se encuentra al interior del mismo.

Procedimiento:

1. Verificar, en la medida de lo posible, el valor de la presión a la que se encuentra el cilindro porta muestras.
2. Desconectar las líneas de tubing de las válvulas A y B. (Ver **Figura 54**).



Figura 54 Cilindro porta muestra.

3. Desmontar el cilindro y colocarlo en una base libre para su fácil manipulación.
4. Conectar una línea pequeña de tubing de 1/8" a la válvula B, correspondiente al fluido de presurización, y colocar el recipiente de plástico a la salida de la línea.
5. Abrir lentamente la válvula B para desfogar la presión y cerrarla nuevamente.
6. Colocar una Sanita en la salida de la válvula A, correspondiente a la muestra, y abrirla lentamente para verificar que no haya presión excedente.
 - Si el cilindro contiene gas, comúnmente N₂, se desfoga lentamente al ambiente.
7. Con la válvula A abierta, sujetar firmemente el cuerpo del cilindro y girar la tapa en sentido antihorario, tomándo la válvula A con una mano.
8. Retirar la muestra sobrante que contenga el cilindro. Limpiar con Sanitas el exceso.
 - Si el cilindro contenía aceite, vertir cloruro de metileno con la piseta y, posteriormente, limpiar con Sanitas.
9. Retirar la esfera de acero contenida en el cilindro.
10. Voltrear el cilindro, abrir la válvula B, girar la tapa en sentido antihorario y vaciar el Marcol 82 en el recipiente de plástico.
11. Retirar el exceso de Marcol 82 con Sanitas.

12. Extraer el pistón del cilindro empujándolo lentamente con el palo de madera, cuidando de no dañar el back up ring del pistón.
13. Limpiar las tapas del cilindro
 - En la tapa A, se hace fluir cloruro de metileno con la piseta a través de la válvula hasta retirar el exceso.
14. Lavar con agua y jabón el cilindro, las tapas y la esfera.
15. Secar perfectamente, con aire comprimido, cada uno de los componentes.
16. Abrir el maletín de accesorios de los cilindros porta muestras y sacar: la barra de empuje, el adaptador del back up ring y el adaptador para proteger las cuerdas, (ver **Figura 55**).



Figura 55 Barra de empuje, adaptador de back up ring y adaptador protector de cuerdas.

17. Colocar en el lado B del cilindro el adaptador protector de cuerdas, (ver **Figura 56**).



Figura 56 Adaptador protector de cuerdas.

18. Tomar con la llema del dedo índice un poco de lubricante para O-rings y untarlo alrededor del O-ring del pistón.
19. Introducir el pistón con la cara plana hacia arriba ajustando el back up ring en la parte superior del pistón y colocando el adaptador sobre éste, (ver **Figura 57**).



Figura 57 Introducción del pistón al cilindro.

20. Colocar el adaptador de back up ring con el pistón en el adaptador protector de cuerdas.
21. Empujar el pistón con la barra de empuje hasta que ingrese completamente al cilindro, (ver **Figura 58**).



Figura 58 Empuje del pistón.

22. Desplazar con el palo de madera el pistón hasta la profundidad deseada para ingresar la muestra; cada centímetro de longitud del cilindro corresponde a 21.2ml en volumen.
23. Rellenar con Marcol 82 la parte B hasta el nivel donde inician las cuerdas del interior del cilindro.
24. Introducir la tapa plana correspondiente, abrir la válvula B y girarla en sentido horario hasta que la tapa quede al ras del cilindro. Cerrar válvula B.
25. Introducir la bola de acero por el lado A con el cilindro inclinado para evitar que la bola dañe el pistón.
26. Ingresar la muestra de líquido hasta el nivel de la parte lisa del interior del cilindro.
27. Introducir la tapa correspondiente, abrir la válvula A y girarla en sentido horario hasta que la tapa quede al ras del cilindro. Cerrar la válvula A.
28. Montar el cilindro porta muestra en la base del permeámetro en que será utilizado.

ANEXO 5 HOJAS DE SEGURIDAD

Hoja de seguridad de Marcol 85 Control Técnico y Representaciones (s.f.).



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACEITE MINERAL

<p>1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa</p> <p>Identificación de la sustancia o del preparado</p> <p>1.1 Denominación: Aceite Mineral.</p> <p>1.2 Uso de la sustancia o preparado: Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.</p> <p>1.3 Identificación de la sociedad o empresa: CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V. Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitras Norte www.ctr.com.mx Tels. (81) 8158 0600, 8158 0628, 8158 0633 e-mail : ctrscientific@infosel.net.mx Apdo. Postal 044-C Monterrey N.L. C.P. 64320, México</p>
<p>2. Identificación de los peligros</p> <p>2.1 Sustancia no peligrosa según Reglamento.</p>
<p>3. Composición/Información de los componentes</p> <p>3.1 Denominación: Aceite de Vaselina</p>
<p>4. Primeros auxilios</p> <p>4.1 Indicaciones generales: -----</p> <p>4.2 Inhalación: Ir al aire fresco. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.</p> <p>4.3 Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua.</p> <p>4.4 Ojos: Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos.</p> <p>4.5 Ingestión: Por ingestión de grandes cantidades: En caso de malestar, pedir atención médica.</p>
<p>5. Medidas de lucha contra incendio</p> <p>5.1 Medios de extinción adecuados: Espuma. Polvo seco.</p> <p>5.2 Medios de extinción que NO deben utilizarse: -----</p> <p>5.3 Riesgos especiales:</p>



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACEITE MINERAL

Combustible. 5.4 Equipos de protección: -----
6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental 6.1 Precauciones individuales: ----- 6.2 Precauciones para la protección del medio ambiente: ----- 6.3 Métodos de recogida/limpieza: Recoger con materiales absorbentes o en su defecto arena o tierra secas y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.
7. Manipulación y almacenamiento 7.1 Manipulación: Sin indicaciones particulares. 7.2 Almacenamiento: Recipientes bien cerrados.
8. Controles de exposición/protección personal 8.1 Medidas técnicas de protección: ----- 8.2 Control límite de exposición: TLV-TWA: 5 ppm ó 10 mg/m ³ 8.3 Protección respiratoria: En caso de formarse vapores/aerosoles, usar equipo respiratorio adecuado. 8.4 Protección de las manos: Usar guantes apropiados 8.5 Protección de los ojos: ----- 8.6 Medidas de higiene particulares: Lavarse las manos antes de las pausas y al finalizar el trabajo. 8.7 Controles de la exposición del medio ambiente: Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACEITE MINERAL

El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

9. Propiedades físicas y químicas

Aspecto:

Líquido transparente e incoloro.

Olor:

Inodoro.

Punto de ebullición : >300°C

Punto de fusión : -24°C

Punto de inflamación : 218°C

Temperatura de auto ignición : 300°C

Presión de vapor: <0,01 Pa

Densidad (20/4): 0,87-0,88

Solubilidad: Inmiscible con agua.

10. Estabilidad y reactividad

10.1 Condiciones que deben evitarse:

10.2 Materias que deben evitarse:

10.3 Productos de descomposición peligrosos:

10.4 Información complementaria:

11. Información toxicológica

11.1 Toxicidad aguda:

Test irritación ojo (conejos): 100 mg/1h: leve

11.2 Efectos peligrosos para la salud:

Por inhalación de vapores: Puede provocar edemas en el tracto respiratorio. No se descarta: neumonía.

Por ingestión de grandes cantidades: trastornos gastro-intestinales.

No se descartan otras características peligrosas. Observar las precauciones habituales en el manejo de productos químicos.


12. Información Ecológica

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACEITE MINERAL

<p>12.1</p>	<p>Movilidad : -----</p>
<p>12.2</p>	<p>Ecotoxicidad : 12.2.1 - Test EC₅₀ (mg/l) : ----- 12.2.2 - Medio receptor : Riesgo para el medio acuático = ---- Riesgo para el medio terrestre = ---- 12.2.3 - Observaciones : -----</p>
<p>12.3</p>	<p>Degradabilidad : 12.3.1 - Test : DBO₅ = ----- 12.3.2 - Clasificación sobre degradación biótica : DBO₅/DQO Biodegradabilidad = ----- 12.3.3 - Degradación abiótica según pH : ----- 12.3.4 - Observaciones : -----</p>
<p>12.4</p>	<p>Acumulación : 12.4.1 - Test : ----- 12.4.2 - Bioacumulación : Riesgo = ----- 12.4.3 - Observaciones : -----</p>
<p>12.5</p>	<p>Otros posibles efectos sobre el medio natural : Manteniendo las condiciones adecuadas de manejo no cabe esperar problemas ecológicos.</p>
13. Consideraciones sobre la eliminación	
<p>13.1</p>	<p>Sustancia o preparado: En América no están establecidas pautas homogéneas para la eliminación de residuos químicos, los cuales tienen carácter de residuos especiales, quedando sujetos su tratamiento y eliminación a los reglamentos internos de cada país. Por tanto, en cada caso, procede contactar con la autoridad competente, o bien con los gestores legalmente autorizados para la eliminación de residuos.</p>
<p>13.2</p>	<p>Envases contaminados: Los envases y embalajes contaminados de sustancias o preparados peligrosos, tendrán el mismo tratamiento que los propios productos contenidos.</p>
14. Información relativa al transporte	



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACEITE MINERAL

14.1 -----
15. Información reglamentaria
15.1 Etiquetado -----
16. Otra información

Grados de NFPA: Salud: 0 Inflamabilidad: 1 Reactividad: 0

Renuncia:

CTR Scientific proporciona la información contenida aquí de buena fe, sin embargo, no hace ninguna representación en cuanto a su integridad o exactitud. Es intención que se utilice este documento sólo como una guía para el manejo del material con la precaución apropiada, por una persona adecuadamente capacitada en el uso de este producto. Los individuos que reciban la información deben ejercer su juicio independiente al determinar la conveniencia del producto para un uso particular. CTR SCIENTIFIC, NO GESTIONA O DA GARANTÍA ALGUNA, EXPRESA O IMPLÍCITA, INCLUYENDO SIN LIMITACIÓN CUALQUIER GARANTÍA DE COMERCIALIZACIÓN, O CONVENIENCIA PARA UN PROPÓSITO PARTICULAR, CON RESPECTO A LA INFORMACIÓN EXPUESTA EN EL PRESENTE DOCUMENTO O DEL PRODUCTO AL QUE SE REFIERE LA INFORMACIÓN. POR CONSIGUIENTE, CTR SCIENTIFIC, NO SERÁ RESPONSABLE DE DAÑOS QUE RESULTEN DEL USO O CONFIANZA QUE SE TENGA EN ESTA INFORMACIÓN.

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**



Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑIA

NOMBRE DEL PRODUCTO	: POLY-XPAND
CLASIFICACION QUIMICA	: Polímero o copolímero de acrilamida
APLICACIONES	: Aditivo para fluido de perforación.
NUMEROS TELEFONICOS DE EMERGENCIA	: 057(5818055)
PROVEEDOR	: JC PORTAL DRILLING SUPPLIES SAC

Número Tel: (51) 01-2551210
Cel. 952049641
RPM # 0008761
AV CAMINO DEL INCA MZ. V LT. 7
URB. HUERTOS DE VILLA CHORRILLOS
TELEF. 5112551210



WEB SITE: www.jcpds.com.mx
MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-16618
PERÚ: (511) 255-1210
COLOMBIA: (574) 232-2998

Índice de Salud HMIS:

Salud: 1

Inflamabilidad: 1

Peligro Físico: 0

Clave de Peligros de WHMIS: 4=Severo, 3=Grave, 2=Moderado, 1=Ligero, 0=Mínimo.

2. COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS COMPONENTES

Componentes (Nombre Químico)	Concentración
Copolímero anionico de acrilamida	90 - 100 Ningún comentario.

3. IDENTIFICACION DE PELIGROS

PANORAMA GENERAL-EMERGENCIA:

CUIDADO! PUEDE CAUSAR IRRITACION MECANICA EN OJOS, PIEL Y TRACTO RESPIRATORIO.

La inhalación de partículas por largos periodos puede causar daños a los pulmones.

EFFECTOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Este producto puede liberar amoníaco o aminos al ser calentado o expuesto a un alto pH. El amoníaco es un irritante grave para los ojos, la piel y el aparato respiratorio. El amoníaco tiene un olor muy fuerte y puede ser detectado a niveles tan bajos como 5 ppm. Muchas aminos también son irritantes para los ojos, la piel y el aparato respiratorio.

EFFECTOS AGUDOS:

OJOS : Puede causar irritación mecánica, lagrimeo e inflamación.
INHALACION : Puede causar irritación en nariz y garganta y causar tos y respiración con silbido.
INGESTION : Puede causar trastornos gástricos, náuseas y vómitos si es ingerido.
PIEL : Puede causar irritación mecánica, salpullido o sensación de ardor.

EFFECTOS CRONICOS:

La inhalación a largo plazo de material particulado puede causar irritación, inflamación y/o daños permanentes a los pulmones. Enfermedades como neumoconiosis ("dusty lung"), fibrosis pulmonar, bronquitis crónica, enfisema y asma bronquial pueden desarrollarse.

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**

JC PORTAL
DRILLING SUPPLIES

Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

Principales Vías de Exposición : Ojos. Dérmica - piel. Inhalación.
Efectos Órgano Afectado : Ojos. Piel. Sistema respiratorio.

4. PRIMEROS AUXILIOS

GENERAL: Las personas que requieren atención médica deberían llevar una copia de esta hoja MSDS con ellas.

INHALACIÓN: Mover la víctima al aire fresco inmediatamente. Proveer la respiración artificial si la respiración ha parado. Conseguir atención médica.

INGESTIÓN: Tomar un par de vasos de leche o agua. NO se debe inducir el vómito a menos que lo ordene un médico. Nunca se debe administrar nada por la boca a una persona inconsciente. Conseguir atención médica.

PIEL: Lavar la piel a fondo con jabón y agua. Quitar la ropa contaminada. Conseguir atención medica si continúa cualquier malestar.

OJOS: Lavar inmediatamente los ojos con mucha agua manteniendo abiertos los párpados. Continuar lavando durante al menos 15 minutos. Conseguir atención médica si persiste cualquier malestar.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

Propiedades Inflamables

Temperatura de Inflamación F(C) : NA
Límites Inflamables en Aire - Inferior (%) : ND
Límites Inflamables en Aire - Superior (%) : ND
Temperatura de Auto ignición F(C) : ND
Clase inflamable : NA

WEB SITE: www.jcpds.com.mx
MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-16618
PERÚ: (511) 255-1210
COLOMBIA: (574) 232-2998

Otras Propiedades Inflamables: El material particulado puede acumular electricidad estática. Los polvos en concentraciones suficientes pueden formar mezclas explosivas con el aire.

Medios de Extinción: Dióxido de carbono (CO2), químicos secos, espuma y atomización o fumigación de agua.

Protección Para Bomberos:

Procedimientos Especiales para la Lucha Contra el Fuego: No entrar en el área del incendio sin llevar el equipo de Protección personal apropiado, incluyendo un aparato autónomo de respiración aprobado por NIOSH/MSHA. Evacuar el área y combatir el incendio desde una distancia segura. Se puede usar agua pulverizada para enfriar los recipientes expuestos al incendio. Mantener el agua de escurrimiento fuera de las vías de desagüe y los cursos de agua.

Productos Peligrosos de la Combustión: Dióxidos de Carbono.

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**

JC PORTAL

DRILLING SUPPLIES

Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

PRECAUCIONES PERSONALES PARA DERRAMES:

Llevar equipos de protección personal adecuados.

MÉTODOS DE LIMPIEZA DE DERRAMES:

Evacuar el área de ser necesario. El producto mojado puede ser resbaladizo. Contenga el material derramado. Evite la generación de polvo. Barrer, absorber con aspiradoras o recoger con pala y colocar en un contenedor con cierre para su eliminación. No permita que el material derramado ingrese a las alcantarillas, el agua de lluvia o drenaje de aguas superficiales.

PRECAUCIONES AMBIENTALES:

No permita que el derrame ingrese a drenajes o cursos de agua. Los desechos deben disponerse de acuerdo a las leyes locales, estatales y federales.

7. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

PRECAUCIONES DE USO:

Usar el equipo de protección personal adecuado. Evitar el contacto con la piel y los ojos. Evite generar o respirar el polvo. El producto es resbaladizo cuando está mojado. Usar solo en un sitio bien ventilado. Lávese luego de la manipulación.

PRECAUCIONES DE ALMACENAJE:

Almacenar en un lugar seco y bien ventilado. Mantener el recipiente cerrado. Almacenar lejos de productos incompatibles. Observar prácticas seguras de almacenamiento para la embandejación, el zunchado, el embalaje por contracción y/o el apilamiento.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

NOMBRE DE INGREDIENTE:	% PESO:	ACGIH TLV:	OSHA PEL:	OTRO:	NOTAS:
Copolimero anionico de acrilamida	90-100	NA	NA	NA	(1)(6)

Notas:

(1) Control como material particulado no especificado de otra manera por ACGIH (PNOS): 10 mg/m³ (Inhalable); 3 mg/m³ (Respirable), y como material particulado no reglamentado de otra manera por OSHA (PNOR): 15 mg/m³ (Total); 5 mg/m³ (Respirable).

(6) Este componente puede liberar amoníaco o aminas al ser calentado o expuesto a un pH alto. Los límites de exposición recomendados para el amoníaco son 25 ppm para el TLV de ACGIH y 50 ppm para el PEL de OSHA. No hay ningún límite de exposición general recomendado para las aminas. Debería usarse un respirador aprobado por NIOSH/MSHA con cartuchos para amoníaco/metilamina para protegerse contra la exposición por inhalación de amoníaco o aminas.

WEB SITE: www.jcpds.com.mx
MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-16618
PERÚ: (511) 255-1210
COLOMBIA: (574) 232-2998

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**

JC PORTAL
DRILLING SUPPLIES

Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

EQUIPO DE PROTECCIÓN:



CONTROLES DE PROCESO:

Usar controles de ingeniería apropiados, tales como la ventilación aspirante y dispositivos de cerramiento del área de proceso, para reducir la contaminación del aire y mantener la exposición de los trabajadores por debajo de los límites aplicables.

PROTECCION RESPIRATORIA:

Todo equipo de protección respiratoria debería ser usado de acuerdo a un amplio programa de protección respiratoria que cumpla con los requerimientos 29 CFR 1910.134 (U.S. OSHA Respiratory Protection Standard) o requerimientos locales equivalentes.

Si esta expuesto a niebla o aerosol de este producto use como mínimo una NIOSH media máscara descartable aprobada N95 o un respirador para partículas que sea reusable. En medios que contengan niebla o vapores de aceite o petróleo use como mínimo máscara o respirador reusable aprobado según NIOSH P95.

Este producto contiene compuestos de nitrógeno los cuales, bajo ciertas circunstancias, forman amoníaco o compuestos de aminas. Si está expuesto a amoníaco o compuestos de amina de este producto use un respirador, aprobado por NIOSH/MSHA, con cartucho para amoníaco/metilaminas.

PROTECCION DE LA PIEL:

Usar ropa apropiada para prevenir contacto prolongado o repetido con la piel. Use guantes de seguridad quimiorresistentes de materiales tales como neopreno o nitrilo.

PROTECCION DE OJOS Y CARA:

Usar gafas de seguridad protectoras contra polvos, si existe la posibilidad de que se expongan los ojos. Se recomienda que haya en el área de trabajo un lavaojos.

CONSIDERACIONES GENERALES DE HIGIENE:

Lavarse rápidamente con jabón y agua si la piel ha sido contaminada. Cambiarse la ropa de trabajo diariamente si hay posibilidad de contaminación. La ropa descartable debe desecharse, si está contaminada con el producto.

9. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Color	: Blanco
Olor	: Inodoro
Estado Físico	: Polvo
pH	: N.D.
Gravedad Especifica (H2O=1)	: 0.8 - 1.0 68F (20C)
Solubilidad (Agua)	: Se hincha al contacto con el agua
Temperatura de Inflamación F(C)	: NA
Point de Fusión F (C)	: ND
Punto de Ebullición F (C)	: ND
Presión de Vapor	: NA
Densidad de Vapor (Aire=1)	: NA
Índice de Evaporación	: NA
Umbral De Olor Mínimo	: ND

WEB SITE: www.jcpds.com.mx
MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-16618
PERÚ: (511) 255-1210
COLOMBIA: (574) 232-2998

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**

JC PORTAL
DRILLING SUPPLIES

Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Datos de Estabilidad	: Estable
Condiciones a Evitar	: Mantener alejado del calor, chispas y llamas. Evitar el contacto con agua y aire húmedo - el producto es higroscópico.
Materiales Incompatibilidad	: Oxidantes.
Productos de la Descomposición	: Para productos de la combustión, ver la Sección 5.
Polimerización Peligrosa	: No ocurrirá polimerización.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA:

Datos Toxicológicos de los Componentes Cualquier efecto toxicológico componente adverso se enumera abajo. Si no se presenta ningunos datos, no se encontró ninguno.

Ingrediente	Datos Agudos
Copolimero anionico de acrilamida	Oral LD50: >5000 mg/kg (rat); Dermal LD50: >2000 mg/kg (rabbit)

Información Toxicológica del Producto:

La inhalación a largo plazo de material particulado puede causar irritación, inflamación y/o daños permanentes a los pulmones. Enfermedades como neumoconiosis ("dusty lung"), fibrosis pulmonar, bronquitis crónica, enfisema y asma bronquial pueden desarrollarse.

Este producto puede contener algunas trazas de acrilamida (<0.1%). La acrilamida está clasificada por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como un carcinógeno del Grupo 2A (probablemente carcinógeno en humanos) y como posible carcinógeno por el Programa Nacional de Toxicología (NTP). (LOLI)

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Información Eco toxicológica: Componente de la eco toxicidad de datos se enumeran a continuación. Si no hay datos que figuran, ninguno se encuentra en el componente de revisión.

Ingrediente	: Copolimero anionico de acrilamida
Especies	: LC50 96H: ~3600 mg/l (Leucidcus idus); LC50 96H: ~5000 mg/l (Brachydanio rerio)

Datos de Ecotoxicidad del Producto:		WEB SITE: www.jcpds.com.mx
Biodegradación	: ND	MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-16618
Bio-acumulacion	: ND	PERÚ: (511) 255-1210
Coefficiente de Partición Octanol/Agua	: ND	COLOMBIA: (574) 232-2998

13. CONSIDERACIONES SOBRE LA ELIMINACION

CLASIFICACION DE RESIDUO:

Este producto no cumple con el criterio de desecho peligroso si es eliminado en la forma en que fue comprado. Según RCRA el usuario del producto es responsable de determinar, en el momento de la eliminación, si el producto cumple con los criterios RCRA para desechos peligrosos. Esto se debe a que el uso, transformación, mezcla o procesos del producto pueden hacer que los materiales resultantes sean peligrosos.

**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(MSDS / MATERIAL SAFETY DATA SHEET)
POLY-XPAND**

JC PORTAL

DRILLING SUPPLIES

Última actualización: Agosto de 2015 – Depto. HSE – JCPDS

GENERAL/ LIMPIEZA:

Los recipientes vacíos contienen residuos. Todas las precauciones indicadas en la etiqueta deben ser observadas.

METODOS DE ELIMINACION:

Recuperar o reciclar, si es práctico. Si este producto se convierte en desecho, eliminarlo en un vertedero industrial autorizado. Asegurarse que los contenedores estén vacíos según los criterios de RCRA antes de eliminarlos en un vertedero industrial autorizado. Confirme el procedimiento de disposición con las autoridades locales. Recuperar o reciclar, si es práctico.

14. INFORMACION RELATIVA AL TRANSPORTE

DOT Nombre del Envío	: No reglamentado para transporte por DOT, TDG, IMDG, ICAO/IATA.
Canadá Nombre del Transport	: No reglamentado
UN PIN No	: No reglamentado
IMDG Nombre del Transporte	: No reglamentado
ICAO/IATA Nombre del Transporte	: No reglamentado

15. INFORMACION REGLAMENTARIA

Nota: Si no se enumera ninguno de los componentes, este producto está conforme a las regulaciones referidas de SARA y de CERCLA.

Inventarios Internacionales:

Australian AICS	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
Canada DSL	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
China Inventory	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
European Union EINECS	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
Japan METI ENCS	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
Korea TCCL ECL	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
Philippine PICCS	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
U.S. TSCA	- Los componentes se enumeran o eximen del listado.
U.S. TSCA	- No hay componentes conforme a requisitos de la notificación de la exportación de TSCA 12(b).

Reglamentos Canadienses:

Declaración de los Reglamentos sobre Productos Controlados: Este producto fue clasificado de acuerdo con los criterios de los CPR para definición de peligros y la MSDS contiene toda la información exigida por los CPR.

WHMIS Clasificación: No es un producto controlado.

WEB SITE: www.jcpds.com.mx

MÉXICO: (5233) 381-06099 / (5233) 156-1661

PERÚ: (511) 255-1210

COLOMBIA: (574) 232-2998

CLAUSULA DE EXENCION DE RESPONSABILIDAD

La información proporcionada en esta Ficha de Datos de Seguridad es la más correcta de que disponemos a la fecha de su publicación. La información suministrada está concebida solamente como una guía para la seguridad en el manejo, uso, procesado, almacenamiento, transporte, eliminación y descarga. Y no debe ser considerada como una garantía o especificación de calidad. El fabricante, no realiza expresamente ninguna aseveración ni garantía, ni garantiza su precisión, fiabilidad o integridad, ni asume ninguna responsabilidad derivada de su uso. Es responsabilidad del usuario verificar la adecuación y prolijidad de la información para cada uso particular.