



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO
NO NEWTONIANO Y FLUJO TRIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO-LÍQUIDO
NO NEWTONIANO EN UNA TUBERÍA INCLINADA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ING. PETROLERA Y GAS NATURAL – PRODUCCIÓN

P R E S E N T A :

MONICA YANET MERAZ MERAZ

TUTOR:

DR. YURI FAIRUZOV VALERIEVICH

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. 2011





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Samaniego Verduzco Fernando.**

Secretario: **Dr. Domínguez Vargas Guillermo Cruz.**

Vocal: **Dr. Fairuzov Yuri Valerievich.**

1^{er}. Suplente: **Dr. Rodríguez Valdés Alejandro.**

2^{do}. Suplente: **Dr. Rangel Germán Edgar René.**

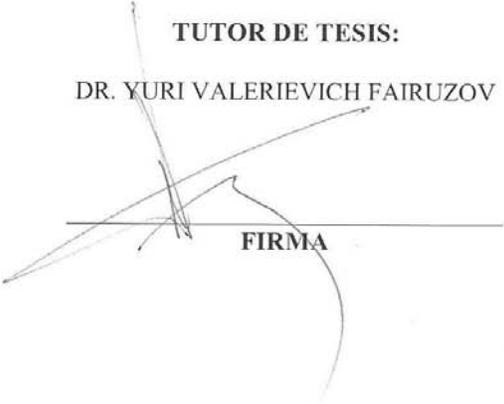
Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

México D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. YURI VALERIEVICH FAIRUZOV

FIRMA

A handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be 'YURI VALERIEVICH FAIRUZOV'. The line is labeled 'FIRMA'.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco Dios por acompañarme en mi camino, por fortalecer mi espíritu, por iluminar mente y porque cada día me brinda la oportunidad de crecer como persona y tratar de ser un mejor ser humano.

A mis padres Bertha y Ciriaco por ser ejemplos de perseverancia, por confiar en mí al apoyarme en esta etapa de mi vida, por tener paciencia y porque de alguna forma me fortalecen en los momentos difíciles.

A mis hermanos Mercedes, Daniel, Alejandra y Cristina porque siempre cuento con ustedes para todo, por tenerme confianza y sobre todo por ser mis amigos.

A mi sobrino Abraham Adair, que con su inocencia llena de alegría mi vida y porque su continua inquietud por aprender me motiva a seguir adelante, te quiero mucho.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Yuri Fairuzov por su apoyo en dirección de este trabajo y por el invaluable conocimiento que me transmitió.

Mi especial agradecimiento los doctores Fernando Samaniego Verduzco, Guillermo Domínguez Vargas, Alejandro Rodríguez Valdés y Edgar Rangel Germán, por la disponibilidad, por la atención y el tiempo que dedicaron en la tesis. Gracias por formar parte del jurado.

Agradezco a todos los amigos que me apoyaron de manera directa e indirecta en la realización de esta tesis, a todos aquellos que me impulsaron para continuar, soy afortunada por contar con ustedes, gracias por su amistad desde lo más profundo de mi corazón.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	v
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 1. Marco teórico	4
1.1 Importancia del flujo líquidos-líquido no Newtoniano en ductos.....	4
1.2 Problemas ocasionados por el flujo líquidos-líquido no Newtoniano en ductos	6
1.3 Propiedades de los lodos y posibles causas de su formación	11
1.4 Comportamiento reológico de los lodos.....	14
1.5 Clasificación de los fluidos No Newtonianos.....	16
1.6 Estudios experimentales donde se emplean fluidos no Newtonianos	19
1.6.1 Flujo monofásico.....	19
1.6.2 Flujo bifásico.....	20
1.6.3 Flujo trifásico.....	24
1.7 Justificación.....	25
1.8 Objetivo.....	27
1.8.1 Objetivo general.....	27
1.8.1 Objetivos particulares	27
CAPÍTULO 2. Instalación experimental	28
2.1 Descripción de la instalación experimental	28
2.2 Sistema de almacenamiento de fluidos y bombeo	29
2.3 Equipo de compresión y almacenamiento de aire	31
2.4 Sistema de separación y sección de pruebas.....	33
2.5 Dispositivos de medición y adquisición de datos	36

CAPÍTULO 3. Desarrollo experimental	38
3.1 Equipo empleado en el aforo y la calibración de los transmisores de flujo.....	38
3.1.1 Procedimiento de calibración	39
3.2 Propiedades de los fluidos experimentales.....	42
3.3 Reología del fluido no Newtoniano	43
3.3.1 Principio y método de operación de viscosímetro Fann	43
3.3.2 Modelos reológicos	46
3.3.3 Cálculo del punto de cendecia y la viscosidad del fluido no newtoniano	49
3.4 Procedimiento experimental en el laboratorio de flujo multifásico	52
CAPÍTULO 4. Pruebas y análisis de resultados	55
4.1 Datos experimentales para el sistema aceite-fluido no Newtoniano	55
4.2 Datos experimentales para el sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano	62
CAPÍTULO 5 Conclusiones, aportaciones y recomendaciones	70
5.1 Conclusiones.....	70
5.1.1 Sistema bifásico con flujo aceite-fluido no Newtoniano	70
5.1.2 Sistema trifásico con flujo aceite-fluido no Newtoniano	71
5.2 Aportaciones	72
5.3 Recomendaciones.....	73
Anexo A Registros obtenidos de los aforos de calibración	75
A.1 Registros de los gastos volumétricos del agua en los aforos	75
A.2 Registros de los gastos volumétricos del aceite en los aforos.....	78
Anexo B Procedimiento para el cálculo de la fracción volumétrica de los fluidos	80
Nomenclatura	82
Bibliografía	84

Lista de figuras

Fig. 1.1	Incrustación y acumulación de lodos en ductos.	7
Fig. 1.2	Daños provocados por la corrosión.	8
Fig. 1.3	Distribución de las fases en el ducto.	9
Fig. 1.4	Transporte de hidrocarburos en ductos.	12
Fig. 1.5	Clasificación de los fluidos según su relación $\tau = f(\dot{\gamma})$	18
Fig.1. 6	Vista esquemática de patrones de flujo definidos experimentalmente por Doron y Barnea	22
Fig.1.7	Dispositivos de limpieza en ductos.	25
Fig. 2.1	Esquema de la instalación experimental.	29
Fig. 2.2	Tanques de almacenamiento de agua (izquierda) y aceite (derecha).	30
Fig. 2.3	Equipo de bombeo para agua y aceite.	30
Fig. 2.4	Variadores de frecuencia.	31
Fig. 2.5	Compresor (izquierda) y tanque de aire (derecha).	32
Fig. 2.6	Manómetro, rotámetro y válvulas reguladoras de presión.	33
Fig. 2.7	Separador trifásico y mampara de choque.	34
Fig. 2.8	Sección de pruebas.	35
Fig. 2.9	Tramo inclinado en la sección de pruebas.	35
Fig. 2.10	Sensores de flujo para el agua y aceite.	36
Fig. 2.11	Transmisores de flujo, agua (izquierda) y aceite (derecha).	37
Fig. 3.1	Equipo empleado en la calibración.	38
Fig. 3.2	Relación gasto vs variación de frecuencia.	40
Fig. 3.3	Gasto de aforo vs gasto de medido por el sensor de aceite.	41
Fig. 3.4	Gasto de aforo vs gasto medido por el sensor de agua.	41
Fig. 3.5	Viscosímetro Fann 35 A.	43
Fig. 3.6	Procedimiento de medición del esfuerzo de corte.	45
Fig. 3.7	Modelo de ley de potencia sistema cartesiano (izquierda) y escala Log-Log (derecha).	47
Fig. 3.8	Modelo gráfico del plástico de Bingham.	48
Fig. 3.9	Comportamiento reológico del fluido no Newtoniano.	50
Fig. 3.10	Sección de prueba	52

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Fig. 3.11	Perfil de la sección de prueba.	53
Fig. 3.12	Método de medición del colgamiento del fluido no Newtoniano.....	53
Fig. 3.13	Inyección del fluido no Newtoniano en la tubería.....	54
Fig.4.1	Patrón de flujo estratificado.	57
Fig.4.2	Patrón de flujo ondulado.	57
Fig.4.3	Colgamiento del fluido no newtoniano para la velocidad de 0.423 [m/s].	60
Fig.4.4	Sistema trifásico de la sección inclinada en equilibrio.	63
Fig.4.5	a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz. b) Flujo estratificado con lecho inmóvil	64
Fig.4.6	a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz. b) Flujo estratificado con lecho móvil (generación de dunas de FNN)	65
Fig.4.7	a) Flujo disperso agua en aceite. b) Flujo estratificado con lecho móvil (generación de dunas de FNN).....	65
Fig.4.8	Propagación de las olas o dunas durante el arrastre del fluido no Newtoniano	66
Fig. B.1	Representación geométrica de los fluidos en un sistema bifásico.....	80

Lista de tablas

Tabla 2.1	Dimensiones de la tubería transparente de PVC cédula 40	28
Tabla 3.1	Valores de "K" ajustados para el agua y aceite	39
Tabla 3.2	Propiedades físicas del aceite.....	42
Tabla 3.3	Combinación de velocidades para el viscosímetro.	45
Tabla 3.4	Valores obtenidos en el viscosímetro Fann 35A.....	49
Tabla 3.5	Propiedades reológicas del fluido no Newtoniano seleccionado.....	51
Tabla 3.6	Parámetros reológicos reportados por Ahmed	51
Tabla 4.1	Prueba No.1 del sistema aceite fluido no Newtoniano.....	56
Tabla 4.2	Prueba No. 2 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.....	58
Tabla 4.3	Prueba No. 3 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.....	59
Tabla 4.4	Prueba No. 4 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.....	60
Tabla 4.5	Datos iniciales de la prueba experimental para el sistema trifásico	62
Tabla 4.6	Datos obtenidos en la prueba No. 1 para el sistema trifásico	63
Tabla 4.7	Datos obtenidos en la prueba No. 2 para el sistema trifásico.	67
Tabla 4.8	Datos obtenidos en la prueba No. 3 para el sistema trifásico.	68
Tabla A.1.1	Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz.....	75
Tabla A.1.2	Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz.....	76
Tabla A.1.3	Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz.....	76
Tabla A.1.4	Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.....	76
Tabla A.1.5	Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.....	76
Tabla A.1.6	Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz.....	77
Tabla A.1.7	Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz.....	77
Tabla A.1.8	Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz.....	77
Tabla A.1.9	Datos de aforo y calibración para agua a 9 Hz.....	77
Tabla A.2.1	Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz.....	78
Tabla A.2.2	Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz.....	78
Tabla A.2.3	Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz.....	78
Tabla A.2.4	Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.....	78
Tabla A.2.5	Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.....	79
Tabla A.2.6	Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz.....	79

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Tabla A.2.7	Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz.....	79
Tabla A.2.8	Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz.....	79
Tabla A.2.9	Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.....	79

RESUMEN

En el trabajo presente, se reportan resultados de un estudio experimental que consiste de dos pruebas. La primera se trata de un sistema bifásico de aceite-fluido no Newtoniano y la segunda de un sistema trifásico de agua-aceite-fluido no Newtoniano en tuberías inclinadas. El fluido no Newtoniano seleccionado para las pruebas posee propiedades similares a los lodos acumulados en oleoductos. En la primera parte de este trabajo, se describe de forma general, la importancia, causas y consecuencias del flujo multifásico cuando una de las fases es un fluido no Newtoniano, se describe la clasificación de los fluidos no Newtonianos y las características particulares del fluido empleado en la experimentación. Se resumen los trabajos experimentales realizados con flujo multifásico y que se relacionan con estas pruebas. En la segunda parte se realiza una descripción detallada del equipo utilizado así como también las pruebas realizadas para la calibración del equipo y el procedimiento desarrollado durante la operación experimental. En los experimentos se observaron dos patrones de flujo diferentes en el sistema bifásico y 3 patrones de flujo en el sistema trifásico. En la transición de éstos, fue posible apreciar el desplazamiento del fluido no Newtoniano de la sección inclinada de la tubería a una velocidad de aceite mayor 0.423 [m/s] mientras que para la mezcla trifásica la velocidad es mayor o igual a 0.347 [m/s] . La velocidad requerida para desplazar un fluido no Newtoniano en una tubería inclinada es aproximadamente 40% mayor que en una tubería horizontal. Los datos obtenidos pueden ser considerados como referencia en la remoción de lodos en los sistemas reales de transporte de hidrocarburos.

INTRODUCCIÓN

El flujo multifásico es definido como el flujo simultáneo de numerosas fases, siendo el flujo bifásico el caso más simple.

En la actualidad el flujo simultáneo de varias fases es de gran importancia para la industria química, farmacéutica, petrolera así como en los sistemas de generación de energía nuclear y geotérmica.

El transporte de flujo multifásico en tuberías es más complejo que el flujo monofásico (una sola fase), las propiedades de cada una de las fases tales como la densidad o viscosidad hacen que el esfuerzo de corte en la tubería sea distinto para cada una de las fases, lo que origina pérdidas de presión mayores a las que se presentan en el flujo monofásico (Brill y Mukherjee, 1999).

En la industria petrolera el flujo multifásico se presenta durante la producción y el transporte de aceite y gas, tanto en líneas horizontales, como en inclinadas y verticales. En muchas ocasiones el petróleo extraído se transporta como una mezcla compleja de hidrocarburo, gas, agua y arena por medio de tuberías. En los sistemas de producción costa fuera se utilizan grandes longitudes de tubería antes de que el petróleo llegue a las instalaciones de separación.

La existencia y los problemas asociados con el flujo multifásico se identificaron en el año 1797, sin embargo, las contribuciones más importantes fueron desarrolladas desde el año 1945. El problema del flujo multifásico se divide en tres categorías (Brown y Beggs, 1977):

- Flujo multifásico vertical.
- Flujo multifásico horizontal.
- Flujo multifásico inclinado.

El manejo de flujo multifásico en las líneas de transporte de hidrocarburos es muy común en la industria petrolera. Se pueden encontrar sistemas de flujo multifásico del tipo (Fairuzov, 2009):

- Gas-líquido (Gas-Crudo).
- Líquido-Líquido (Crudo-Agua).
- Líquido-Sólido (Crudo-Arena)
- Gas-Sólido (Gas-Arena; Gas-Hidratos).
- Gas-Líquido-Líquido (Gas-Crudo-Agua).
- Líquido-Líquido-Líquido No Newtoniano (Crudo-Agua-Lodo).

La formación de lodos en oleoductos representa un serio problema para los ingenieros petroleros, debido a que la acumulación de lodos en las líneas de transporte genera pérdidas de presión, disminución en la producción así como problemas de crecimiento bacteriano y corrosión por la acumulación del lodo en ciertas zonas de tubería.

El estudio de la formación de lodos es difícil debido a su naturaleza transitoria y a que el flujo multifásico con fluidos no Newtonianos es muy complejo e inestable, por lo que es difícil predecir las caídas de presión. Los métodos ingenieriles para flujo bifásico con fluidos no Newtonianos son inexistentes y en muchas ocasiones son modelados asumiendo un comportamiento Newtoniano (Kaminsky, 1998).

La configuración de la tubería juega un papel importante en el comportamiento del flujo, por lo que en este trabajo se realizó el estudio experimental del sistema bifásico (líquido- líquido no Newtoniano) y trifásico (líquido-líquido-líquido no Newtoniano) en tuberías inclinadas.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Importancia del flujo líquidos-líquido no Newtoniano en ductos

El flujo multifásico puede encontrarse en áreas industriales diversas, tales como la industria química, refinación, sistemas de generación de energía, industria petrolera, entre muchas otras (Brill y Mukherjee, 1999)

En producción uno de los aspectos más importantes que debe tener en cuenta el ingeniero de operación, es el aseguramiento de flujo, por lo que el estudio del flujo multifásico en tuberías ha cobrado gran importancia en los últimos años dado que provoca pérdidas de presión importantes y hacen ineficiente el transporte de hidrocarburos.

Los fluidos producidos y encontrados en la industria petrolera a menudo se comportan como fluidos no Newtonianos. Estos incluyen lodos de perforación, cemento, fluidos utilizados en la terminación de pozos y algunas mezclas de aceite y agua-aceite que son producidas (Brill y Beggs, 1998).

El hidrocarburo es distinto en su composición y ocurre que durante su transporte del yacimiento al centro de separación, algunas fracciones del crudo se precipitan debido a los cambios en las condiciones de operación (presión y temperatura). En el aceite extraído del yacimiento además de compuestos orgánicos contiene materiales contaminantes insolubles en el crudo, tales como arenas, arcillas, sales, productos de la corrosión y agua de producción entre otros (Gómez, Ancheyta, y Cols., 2003). La mezcla de las sustancias antes descritas tiene un comportamiento similar a un fluido no Newtoniano.

El lodo se comporta como un fluido no Newtoniano y es una mezcla de sedimentos provenientes de la formación y/o de las intervenciones a los pozos, fracciones pesadas del crudo y agua.

Uno de los tipos de flujo multifásico que se presentan en las tuberías es el de líquidos (agua-aceite)-líquido No Newtoniano (lodo), sin embargo se tienen pocos datos de cómo se comportan estos fluidos en las tuberías.

En las líneas de transporte de hidrocarburos se forman lodos debido a la precipitación y el depósito de parafinas, asfáltenos, etc., los cuales causan serios inconvenientes técnicos y económicos a la industria petrolera, tales como corrosión, obstrucción del flujo, pérdidas de presión en las líneas y disminución en la producción.

Los fluidos son transportados en ductos que fueron diseñados hace muchos años bajo condiciones de operación muy distintas a las actuales, la declinación de la producción a través de los años provoca una disminución en la velocidad de transporte, lo que favorece la acumulación de agua y la precipitación de sedimentos que forman lodos en la parte baja de los ductos.

En el futuro la disminución en la producción y el incremento en el corte de agua provocarán que el flujo multifásico no Newtoniano sea más frecuente en los ductos, por lo que los problemas relacionados con el transporte de hidrocarburos se incrementarán, por estas razones es importante el estudio de este tipo de flujo, a fin de buscar las condiciones óptimas de operación que permitan minimizar los problemas que se puedan presentar durante el transporte del hidrocarburo.

1.2 Problemas ocasionados por el flujo líquidos-líquido no Newtoniano en ductos

Los sistemas costa fuera, son actualmente la forma más común de extracción de petróleo y existen claros signos de que en las próximas décadas esta forma de extracción se extenderá aun más. La demostrada fiabilidad del uso de tuberías de gran longitud para conectar directamente las unidades submarinas (pozo-plataforma-batería de separación) con las plantas de proceso en tierra hace probable que siga empleándose este medio de transporte en un futuro (Havre, Ole, y Stray, 2000).

Los mayores retos plateados para este tipo de sistemas, es el control de las perturbaciones de alimentación al proceso de separación es decir; la reducción o eliminación de las variaciones de flujo a la salida de las tuberías que conectan los pozos y las instalaciones remotas con las unidades de proceso en tierra.

La precipitación y el depósito de los fluidos no Newtonianos causan serios inconvenientes técnicos en la industria petrolera, lo que se traduce en pérdidas económicas, ya que se acumulan en las tuberías obstruyendo el flujo del aceite, reduciendo los ingresos asociados con la producción y costando cantidades significativas de tiempo y dinero en lo que respecta a la limpieza. Si bien el costo es difícil de cuantificar, los especialistas coinciden en que la acumulación de sólidos en las tuberías genera costos a la industria petrolera de decenas de miles de millones de dólares por año (Acock, ORourke y cols., 2004)

La **Fig. 1.1** muestra la incrustación y acumulación de sólidos en los ductos, así como los sedimentos removidos después de una corrida de diablos, en algunas ocasiones la acumulación de lodo en la tubería puede llegar a obstruir el diámetro del ducto hasta en un 80% (Fragoso, 2007).



Fig. 1.1 Incrustación y acumulación de lodos en ductos.

La inestabilidad del comportamiento del flujo con lodo en los oleoductos tiene un efecto negativo sobre el funcionamiento de las instalaciones de producción costa fuera, la presencia abundante de lodo puede producir disparos en las plataformas e incluso parar la planta de proceso, en algunos casos puede ocasionar una reducción de operación en las unidades de separación y compresión (Havre, Ole, y Stray, 2000)

Los lodos existen desde hace muchos años y representan un serio problema cuando se llegan a acumular en las tuberías, provocan problemas de corrosión cuando se acumulan en la parte inferior de la tubería, con la presencia de agua libre puede albergar bacterias sulfato reductoras; incrementando el riesgo de corrosión interna y corrosión bacteriana provocando un daño severo a la tubería.

La **Fig. 1.2** muestra el daño producido a la tubería por acción de la corrosión formada a partir de la acumulación de lodos.



Fig. 1.2 Daños provocados por la corrosión.

Es común que el hidrocarburo transportado contenga emulsiones de agua en aceite, que pueden romperse bajo determinadas condiciones de operación y depositarse en parte baja del ducto. El agua generalmente arrastra sedimentos como las arenas, estos sedimentos al romperse la emulsión agua en aceite se precipitan en el fondo del ducto formando una capa de lodo cubierta por una capa de agua lo que favorece el crecimiento bacteriano. Se han encontrado bacterias extremófilas que pueden vivir en ambientes con temperaturas mayores a los 60°C (Meraz, 2008).

La rapidez de acumulación de agua y lodo en el ducto se incrementa cuando se inyectan desemulsificantes o algún otro químico que rompa la emulsión; cuando la formación es de origen arenosa ó bien cuando se tiene implementado algún equipo de levantamiento artificial.

De los principales problemas que se pueden presentar debido a la acumulación de lodo en el ducto están: pérdida de presión, reducción en el área de flujo, corrosión interior, crecimiento bacteriano, que originan problemas económicos que en el mejor de los casos provocan una disminución en la producción.

La **Fig. 1.3** muestra la distribución de las fases en el ducto cuando el flujo es trifásico, se observa que el lodo se acumula en la parte baja de la tubería, el lodo es cubierto por una capa de agua que a su vez está en contacto con el hidrocarburo, el colgamiento de cada una de las fases depende de la velocidad de las mismas. Si la velocidad de la fase disminuye entonces se aumenta la fracción volumétrica de la misma.

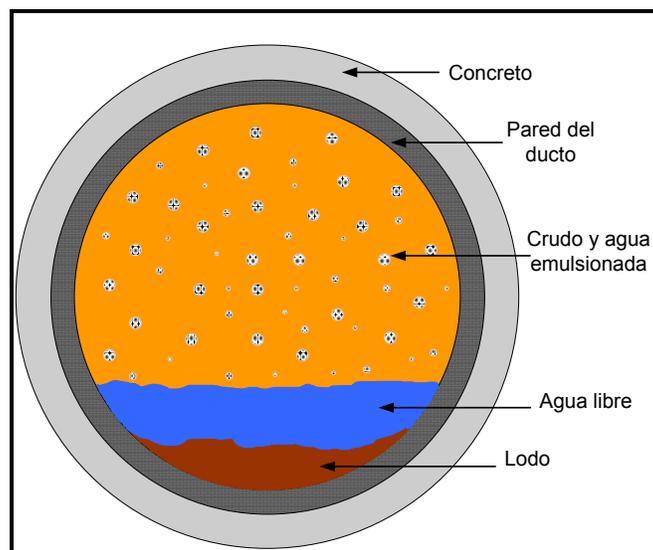


Fig. 1.3 Distribución de las fases en el ducto.

El fluido (líquido ó gas) que se transporta por el ducto es sometido a varios procesos para la eliminación de impurezas, no obstante aún conservan contaminantes que pueden incrementar la corrosión interna. Entre los agentes residuales agresivos o contaminantes más frecuentes que es posible detectar en los flujos de transporte por ducto, resaltan, bióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y los microorganismos (NRF-005-Protección interior de ductos con inhibidores-PEMEX-2000).

Para evitar o controlar el fenómeno de corrosión interna, se inyecta inhibidores de corrosión en las líneas transporte de gas o aceite sin embargo, para implementar un programa de inyección de inhibidores, es necesario conocer las condiciones de operación imperantes en el ducto tales como: tipo de flujo, si es laminar o turbulento, continuo o intermitente, la temperatura, presión, volumen, pH, calidad del fluido transportado, topografía del terreno, perfil y dimensiones del ducto.

De las razones principales que pueden provocar el paro de ductos, la corrosión ocupa el 30% (Rumiche e Indacochea, 2007). Este tipo de problemas puede causar grandes pérdidas económicas un ejemplo es el problema que se presentó la compañía British Petroleum en el campo Prudhoe Bay en el 2006 que tuvo que suspender el transporte de la mitad de su producción, debido a problemas de corrosión, aproximadamente 400 000 [B/D] dejaron de transportarse, en ese tiempo equivalió al 8% del total de la producción de Estados Unidos (www.crisisenergetica.org).

La compañía British reportó que los problemas que originaron la corrosión se debieron a la cantidad de agua y material orgánico (lodos) que se transportaban en la tubería (www.crisisenergetica.org).

Se ha encontrado que en gran parte de los accidentes la contaminación por ruptura de oleoductos se debe a defectos de diseño y mantenimiento de los mismos. Un ejemplo de lo anterior ocurrió en octubre de 1994 en la Antigua Unión Soviética donde debido a problemas de corrosión y abandono de los oleoductos, se vertieron aproximadamente 60 000 toneladas de hidrocarburo cerca de Usinsk, al sur del círculo polar ártico (www.estrucplan.com.ar).

En la Amazonia ecuatoriana se produjo contaminación en suelos y causes de agua debido a que las disfunciones en los separadores petróleo-agua, la mala separación del petróleo y agua aceleraron la acumulación de lodos y la corrosión interna, lo que provocó la ruptura del ducto (www.estrucplan.com.ar).

Si bien los inhibidores de corrosión pueden ayudar a disminuir los problemas de corrosión, no solucionan el problema bajo ninguna circunstancia, alguna modificación, alteración o cambio en las condiciones de operación, disminuye la eficiencia de los inhibidores. Para que éstos puedan ser efectivos se requiere entre otras cosas que los ductos mantengan una limpieza interior aceptable y constante, por lo que, la existencia de óxido, arena o lodos favorece la corrosión interna.

En conclusión el estudio del flujo con lodos es importante debido a que provocan pérdidas económicas y aceleran el proceso de corrosión entre otros.

1.3 Propiedades de los lodos y posibles causas de su formación

El crudo extraído de los yacimientos costa fuera recorre grandes distancias para llegar a los centros de procesamiento y distribución en tierra, en ocasiones el hidrocarburo recorre cientos de kilómetros a través de tuberías que se extienden en el lecho marino, un ejemplo es el oleoducto que conecta una plataforma ubicada en el mar del Norte con la Isla Setland donde el ducto se extiende por 94 [mi] (151 km) (Liu, 2005).

La **Fig. 1.4** muestra sistemas de transporte de hidrocarburos más comúnmente utilizados en tierra y costa fuera. Se observa que los ductos recorren largas distancias y las líneas de transporte se ajustan a la forma de la superficie terrestre o en el lecho marino en el caso de los sistemas costa fuera.

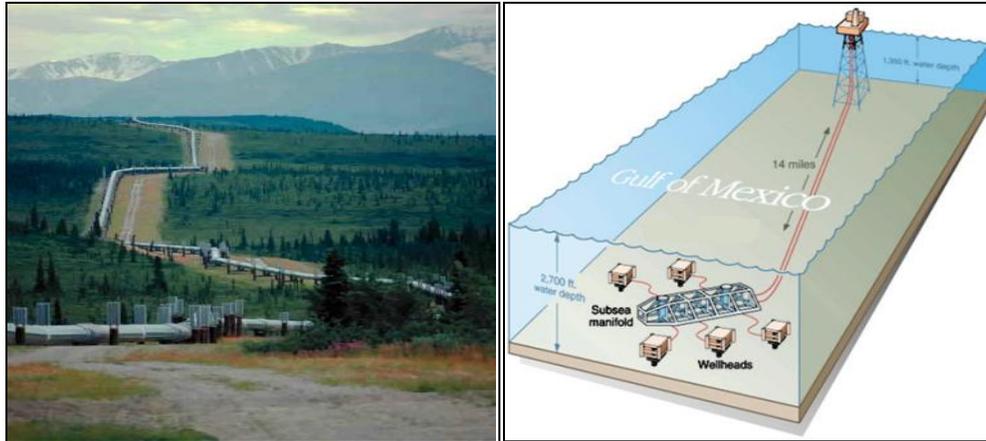


Fig. 1.4 Transporte de hidrocarburos en ductos.

En los sistemas costa fuera el hidrocarburo extraído del yacimiento pasa por un sistema de separación donde los fluidos extraídos (gas-aceite-agua) son separados, para facilitar la operación y evitar las perturbaciones en el flujo a la llegada de las baterías de separación, se pueden inyectar bactericidas, antioxidantes, antiespumantes y desemulsificantes (la mayoría compuestos derivados del benceno) en el fondo o cabeza del pozo.

En el transporte de hidrocarburos, es común que se formen emulsiones de crudo-agua. Estas emulsiones generalmente van acompañadas de sedimentos provenientes del yacimiento. Los sedimentos que se pueden encontrar presentes en sólidos tales como: arenas, carbonatos, precipitados orgánicos en caso de crudos pesados y también algunos residuos de los lodos de perforación.

El agua que proviene de la formación geológica contiene sólidos suspendidos además de sales como: calcio, magnesio, sodio y algunos de gases disueltos como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico.

En los sistemas de producción costa fuera la deshidratación o separación del agua es poco eficiente, por lo que una buena cantidad de agua emulsionada es conducida a través de los oleoductos hacia los centros de procesamiento en tierra.

La formación de lodo y sedimentos se presenta como alguna de las siguientes formas (Gómez, Ancheyta, y Cols., 2003):

- Material disuelto en el líquido.
- Material precipitado.
- Material emulsificado en el líquido.

Bajo condiciones favorables, el lodo y sedimentos se disolverán en el líquido con un incremento potencial de la viscosidad; el lodo y sedimentos que son insolubles en el crudo y pueden permanecer formando una emulsión.

Existe una suposición frecuente pero no siempre real de que los sedimentos se originan de los componentes inorgánicos del petróleo; sin embargo, éstos se pueden formar a partir de los componentes inherentes del aceite crudo o bien cuando se introducen contaminantes como el fierro u otros metales y que el crudo puede arrastrar durante su transporte por ductos y bombas (Mushrush y Speight, 1995).

Los crudos pesados presentan una tendencia a la formación de lodo, lo cual se refleja como un incremento en la viscosidad. La formación de lodo y sedimentos es el resultado de varios factores uno de ellos es la precipitación de asfáltenos (Gómez, Ancheyta, y Cols., 2003).

Si bien la formación de los sedimentos no es totalmente entendible y no se tiene un mecanismo claro de su formación; se sabe que el lodo que se acumula en los oleoductos que van de las baterías de separación costa fuera a los centros de

proceso y distribución en tierra, tiene distinta composición química, las propiedades y las causas de su formación varía dependiendo la ubicación y condiciones de transporte, contenido de agua emulsionada, sedimentos proveniente del yacimiento, propiedades del mismo aceite, así como las sustancias que se adicionen al crudo (bactericidas, antioxidantes, antiespumantes, etc.). Las características de los lodos involucran propiedades físicas, químicas, biológicas y reológicas (Slatter, 1997)

En general los lodos que se acumulan en las tuberías de transporte son una masa aglomerada de agua, arcilla, precipitados de parafinas y asfáltenos, así como material orgánico. Esta masa aglomerada es un fluido No Newtoniano cuyo comportamiento es similar al plástico de Bingham.

1.4 Comportamiento reológico de los lodos

El problema de formación y transporte de lodos no es exclusivo de la industria petrolera; su estudio cobró mayor importancia en el tratamiento de aguas residuales, debido a que las propiedades de estos lodos influyen en su comportamiento y provocan pérdidas de presión debido a la fricción cuando los lodos son bombeados (Babbit y Caldwell, 1939). En la industria petrolera la formación de lodos y su acumulación en las tuberías provocan daños como la corrosión, disminución en la presión y disminución en el transporte de hidrocarburo.

Se tiene pocos datos acerca del comportamiento de los lodos, no obstante se sabe que las propiedades reológicas del lodo dependen de factores como: forma (tamaño), grado de dispersión, contenido de sólidos composición química y afinidad química con partículas de la fase dispersa (Krylow y Fryzlewics, 2007).

Se ha demostrado que los lodos tal como mezclas de agua y arcilla usadas en la perforación de pozos profundos, lodos de aguas residuales, lodos de plantas suavizadoras de agua y otras suspensiones acuosas de partículas finas, obedecen a la formula fundamental de un plástico de Bingham (Babbit y Caldwell, 1939; Gardea, 2008).

Los estudios de flujo multifásico asociados con fluidos no Newtonianos reportan un comportamiento pseudoplástico y plástico de Bingham con un punto de cedencia específico (Kaminsky, 1998; Ruiz-Viera y Cols., 2006; Xu y Cols., 2007; Firouzi y Hashemabadi, 2008)

En flujo multifásico con lodos se podría considerar que los aspectos que tienen mayor relevancia son el punto de cedencia y la viscosidad del fluido no Newtoniano. El punto de cedencia varía con la concentración, el tamaño y características de las partículas sólidas; se incrementa con el aumento de la concentración de sólidos. La viscosidad varía de acuerdo a la composición del lodo (Krylow y Fryzlewics, 2007).

El punto de cedencia y la viscosidad del lodo son independientes de las dimensiones del ducto y de la velocidad de fluido, el cambio en sus propiedades se debe a la concentración y origen de los sólidos (Babbit y Caldwell, 1939).

En conclusión los lodos son fluidos que no obedecen a la ley de la viscosidad de Newton; su comportamiento reológico obedece a los modelos de plástico de Bingham y fluido pseudoplástico ambos con punto de cedencia.

1.5 Clasificación de los fluidos No Newtonianos

Un fluido Newtoniano es aquél cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión de corte que se le aplica. Como resultado un fluido no Newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido Newtoniano (Ibarrola, 2008).

La Ley de la viscosidad de Newton establece que en los fluidos laminares existe una relación lineal entre las tensiones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad una propiedad física del fluido llamada viscosidad dinámica o absoluta μ (Shames, 1995):

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Se observa que el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la deformación del fluido. En los fluidos no Newtonianos el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación y se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir:

- Dependientes del tiempo.
- Independientes del tiempo.
- Visco-elásticos.

Los fluidos no Newtonianos dependientes del tiempo son muy complejos dado que su viscosidad aparente depende de la velocidad de deformación ($\partial u/\partial y$) y del tiempo (t) en que actúa la tensión de corte, se clasifican de la siguiente forma:

- Fluidos tixotrópicos: la tensión de corte disminuye con el tiempo.
- Fluidos reopécticos: la tensión de corte se incrementa con el tiempo.

Los fluidos visco-elásticos como su nombre lo dice exhiben tanto propiedades viscosas como elásticas, la deformación del fluido depende del tiempo que se aplique el esfuerzo de corte y en el caso de los líquidos obedecen a la ley de Maxwell.

En fluidos no Newtonianos independientes del tiempo: el esfuerzo de corte depende únicamente de la velocidad de deformación:

$$\tau = f\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad \tau = f\left(\frac{d\gamma}{dt}\right) \quad \tau = f(\dot{\gamma}). \quad (\text{Ec. 1.2})$$

La mayoría de los fluidos no Newtonianos que tienen aplicaciones en problemas de ingeniería caen dentro de esta categoría y en ciertos casos algunos fluidos dependientes del tiempo pueden ser aproximados o modelados como fluidos independientes del tiempo (Ibarrola, 2008):

- **Pseudos plásticos.** La gráfica de la tensión de corte contra el gradiente de velocidad se encuentra por encima de la línea recta, de pendiente constante. La curva inicia abruptamente, lo que indica una alta viscosidad aparente. Luego la pendiente disminuye al aumentar el gradiente de velocidad.
- **Fluidos dilatantes.** La curva empieza con una pendiente baja, lo que indica una baja viscosidad aparente. Luego la pendiente aumenta al aumentar el gradiente de velocidad.
- **Fluidos de Bingham.** Estos requieren el desarrollo de un nivel significativo de tensión de corte antes de que empiece el flujo.

Para entender el comportamiento de los fluidos no Newtonianos la **Fig. 1.5** muestra de manera grafica el comportamiento de los fluidos independientes del tiempo con respecto a la velocidad de corte y el esfuerzo de corte.

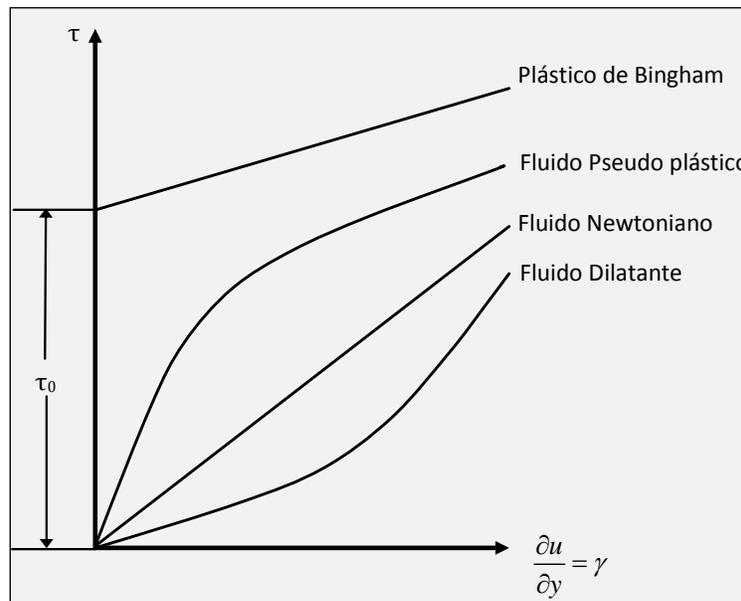


Fig. 1.5 Clasificación de los fluidos según su relación $\tau = f(\dot{\gamma})$.

El plástico de Bingham es el fluido que para tensiones tangenciales menores a un valor de τ_0 , se comporta elásticamente y superando ese valor (punto de cedencia) se comporta como un fluido Newtoniano. La relación que denota el comportamiento de los plásticos de Bingham es la siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{ó} \quad \tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} . \quad (\text{Ec. 1.3})$$

El comportamiento de fluidos como emulsiones, pinturas, lodos de perforación y sólidos en suspensión en líquidos o en agua, se aplican al modelo del plástico de Bingham.

1.6 Estudios experimentales donde se emplean fluidos no Newtonianos

A pesar de que en los últimos años el estudio de flujo multifásico se han incrementado, la mayor parte de los experimentos son realizados con fluidos inmiscibles de origen Newtoniano debido a que por su naturaleza son más sencillos de resolver nos solo numéricamente sino analíticamente. Sin embargo la aplicación de estos fluidos Newtoniano es limitada, ya que muy pocos fluidos presentan este comportamiento. En la actualidad se dispone de poca información con estudios de flujo que involucren en una de sus fases un fluido no Newtoniano (Firouzi y Hashemabadi, 2008).

1.6.1 Flujo monofásico

El estudio del flujo de un líquido no Newtoniano comenzó a ser de gran interés debido a que las pérdidas de presión por fricción son mayores. Anteriormente no existía información suficiente para realizar estimaciones precisas de la pérdida de presión por fricción, entonces el problema del flujo de un lodo fue tratado como el flujo de agua (Babbit y Caldwell, 1939).

El diseño correcto de las líneas que transportaban dichos fluidos debía contar con la información que permitiera estimar las pérdidas de presión, por tal motivo, uno de los propósitos de Babbit y Caldwell (1939), fue formular experimentalmente diversos factores que influyen en las pérdidas de presión por fricción, cuando un lodo sea bombeado a través de una tubería. Además, demostraron que los lodos, obedecen a un comportamiento de un plástico de Bingham.

Otros estudios se enfocaron a reproducir de forma experimental el flujo de un líquido no Newtoniano por medio de la mezcla de algún fluido con partículas sólidas de tamaños muy pequeños.

Hill y Shook estudiaron el transporte de partículas (esferas de cristal de 2.47 [gr/cm³] de 1.7 y 4 [mm] de diámetro por medio de agua y de fluidos con punto de cedencia (arcillas) en tuberías de 52 [mm] de diámetro. El fluido no Newtoniano utilizado fue principalmente Kaolin con pequeñas cantidades de bentonita sódica para incrementar el punto de cedencia (Hill y Shook, 1998).

Los depósitos de partículas acumulados en el fondo de la tubería se apreciaron a velocidades inferiores a 0.8 [m/s] en el caso donde el agua funcionó como fase móvil, la generación de dunas sobre el lecho de partículas inmóviles se observó a partir de una velocidad del agua de 1 hasta 1.6 [m/s]. Por otra parte, la velocidad de las suspensiones de arcilla para que exista un lecho de partículas acumuladas en la parte baja de la tubería fue menor a 0.87 [m/s].

1.6.2 Flujo bifásico

La primera investigación experimental documentada sobre el flujo líquido-líquido en tuberías data a finales de 1950. Varios trabajos experimentales han sido propuestos en la literatura para incrementar el entendimiento de flujo líquido-líquido, algunos de los cuales tienen el propósito general de crear una base de datos de experimentos para explorar el comportamiento de dos líquidos con determinadas propiedades cuando fluyen juntos en un dominio determinado (Grassi, Strazza y Poesio, 1998).

En 1959 se desarrollo una serie de experimentos de flujo de aceite-agua y se propuso la primera clasificación de patrones de flujo observados. Se establecieron las bases para el estudio de flujo líquido-líquido, durante muchos años éstos datos fueron la principal fuente de información (Russell y Cols., 1959).

Aún cuando el trabajo el Russel y cols. fue de cuantiosa ayuda, estos trabajos demostraron la incompatibilidad de los modelos gas-líquido para predecir el

comportamiento del flujo líquido-líquido, por lo que se abrió un nuevo camino a la investigación para este sistema.

Por otra parte, Fairuzov investigó de forma experimental las transiciones de patrones de flujo de aceite-agua en tuberías horizontales de 16 pulgadas de diámetro (Fairuzov, Arenas y Cols., 2000).

Con el paso de los años, el interés por estudiar el flujo bifásico de líquidos en donde uno de estos sea no Newtoniano ha sido mayor ya que este sistema no se puede tratar como un flujo bifásico de líquidos Newtonianos, por tal motivo, fue indispensable el comienzo de pruebas experimentales concernientes al nuevo sub-sistema de flujo multifásico.

La cantidad de información disponible concerniente al flujo de dos fases con un líquido no Newtoniano es muy limitada (Firouzi y Hashemabadi, 2008), por lo que algunos investigadores han desarrollado pruebas experimentales del flujo bifásico líquido-sólido. Esta última fase representa a los sedimentos o partículas densas que forman parte de un lodo, sin embargo, debe quedar claro que aunque no se trate de un fluido con ciertas propiedades reológicas tal como los lodos que se acumulan en oleoductos de la industria petrolera, dichos estudios sirven como base para el análisis de sistemas más reales.

Doron y Barnea estudiaron experimentalmente los patrones de flujo líquido-sólido (Doron y Barnea, 1996). La fase líquida fue agua, mientras que la sólida se trató de pequeñas esferas de acetal de 3 mm de diámetro cuya densidad fue de 1.24 gr/cm³. Los patrones de flujo definidos en este trabajo son los siguientes:

- Flujo suspendido completamente (*Fully suspended flow*): Se presenta cuando la velocidad de la mezcla es alta; de tal forma que permite que todas las

partículas estén suspendidas. Este tipo de patrón de flujo se puede dividir en 2 sub-patrones de flujo:

- Suspensión pseudohomogénea: Los sólidos se distribuyen casi de forma uniforme a través de la sección transversal de la tubería. Las velocidades de la mezcla requeridas para que se presente este flujo son normalmente muy altas y no se consideran factibles.
- Flujo en suspensión heterogénea: Existe un gradiente de concentración mayor de partículas transportadas, en la parte inferior de la sección transversal de la tubería (**Fig. 1.6a**).

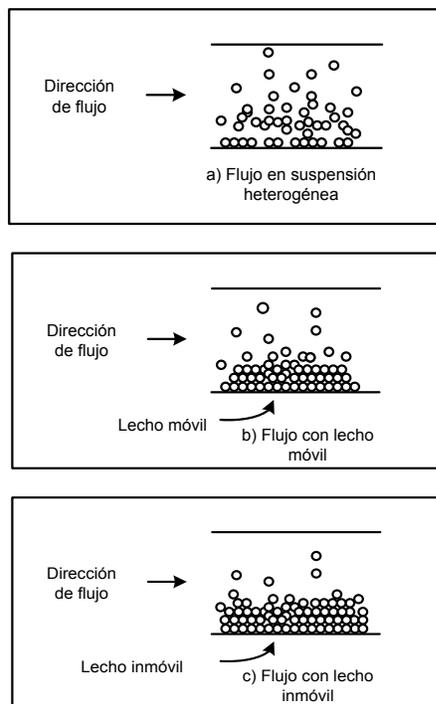


Fig.1.6 Vista esquemática de patrones de flujo definidos experimentalmente por Doron y Barnea

- Flujo con lecho móvil (*Flow with a moving bed*): A velocidades de flujo menores, las partículas sólidas se acumulan en las partes bajas de la línea (**Fig. 1.6b**). En estas condiciones se forma una capa de lecho empacado que

se mueve a lo largo del fondo de la tubería mientras que la parte superior de la sección transversal de la tubería es ocupada por mezcla heterogénea.

- Flujo con lecho inmóvil (Flow with a stationary bed): Se observa un depósito de partículas inmóvil en el fondo de la tubería ya que la velocidad de la mezcla es muy baja para provocar el movimiento de todas las partículas inmersas (**Fig. 1.6c**). En muchos casos se observan dunas en la parte superior del lecho inmóvil, a este fenómeno se le conoce como “*saltation*”. El área restante de la tubería es ocupada también por mezcla heterogénea.

Doron y Barnea (1996) reportaron que el flujo estratificado con lecho inmóvil se origina a velocidades de la fase móvil que van de 0.1 a 0.6 [m/s], por lo que a velocidades superiores de 0.6 [m/s], se comienza a generar el movimiento del lecho acumulado en la parte inferior de la tubería.

Un sistema diferente a los mencionados con anterioridad es el flujo bifásico de líquido no Newtoniano (fluidos pseudoplásticos) - gas. El objetivo de estudiar estos sistemas se relaciona con el fenómeno conocido como “*drag reduction*” o reducción fricción. La inyección de gas reduce el área mojada de la superficie de la tubería y también el esfuerzo cortante con la pared de la tubería.

Los fluidos no Newtonianos que se han utilizado en las pruebas experimentales desarrolladas por diversos autores son soluciones poliméricas tal como carboximetil celulosa (CMC), caolín, suspensiones de arcilla y grasas lubricantes de densidad alta (Ruiz-Viera y Cols., 2006; Xu, Wu y Cols., 2007). De forma general, los resultados de las investigaciones concernientes a este fenómeno demuestran que la reducción de fricción más efectiva ocurre cuando el índice de comportamiento de flujo se mantiene en valores bajos ($n < 0.6$).

1.6.3 Flujo trifásico

Muchos procesos industriales, tal como la producción y procesamiento de hidrocarburos involucran flujos multifásicos complejos de aceite y/o agua, gas y mezclas de arenas. Entender el mecanismo del transporte de arenas por tuberías representa un impacto importante en el diseño de pozos horizontales. Por ejemplo, un incremento en el volumen de arenas en tuberías horizontales resulta en depósitos inmóviles los cuales ocasionan caídas de presión mayores y afectan las velocidades de producción de los hidrocarburos.

A la fecha, no existen trabajos experimentales referentes al flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano, sin embargo, Goharzadeh y Rodgers (2009) estudiaron el flujo de líquido-gas-sólido, investigaron la influencia de flujo bache, específicamente la longitud del bache, sobre el transporte de partículas sólidas (perlas de vidrio) en una tubería de plexiglás de 2.5 [cm] de diámetro. La fase líquida empleada fue agua con un gasto de 3 a 5 [L/min] mientras que el gasto del aire fue de 3 a 11 [L/m].

Para desarrollar el experimento, se fijó un lecho de partículas denominado como “longitud inactiva del frente del tapón” (SNIL) cuya longitud fue de 4 [m] con una altura de 5 [mm]. Se observó que la SNIL depende significativamente de la relación de flujo aire-gas, es decir, para cierta velocidad de agua, las dimensiones de la capa de partículas disminuye con el incremento del gasto de gas. Por otra parte, se concluyó también que a medida que se incremente el diámetro de las partículas, la longitud inactiva es mayor (Goharzadeh y Rodgers, 2009).

Goharzadeh y Rodgers concluyeron que el gas influye grandemente en el transporte de las partículas precipitadas en el fondo de la tubería por lo que la inyección de éste puede ser una alternativa de desplazamiento del lodo en los oleoductos

1.7 Justificación

La manera más sencilla y económicamente rentable de transportar hidrocarburo en sistemas costa fuera es por medio de tuberías usualmente denominadas oleoductos. Con frecuencia se forman lodos en interior de los ductos lo que provoca pérdidas de presión, crecimiento bacteriano y corrosión interna.

Generalmente se tienen establecidos programas de limpieza en forma periódica para tratar de evitar la acumulación de impurezas que puedan perjudicar la integridad del ducto (la **Fig. 1.7** muestra los dispositivos que se emplean en la limpieza de los ductos), no obstante por cuestiones económicas las maniobras de mantenimiento a estos sistemas de transporte son escasas debido a que suspender la producción representa pérdidas económicas millonarias.



Fig.1.7 Dispositivos de limpieza en ductos.

El principal problema del flujo con lodo es la acumulación que se forma en las zonas bajas de la tubería, y su almacenamiento provoca daños en el ducto tales como:

- Pérdidas de presión en la tubería.
- Corrosión debido a que el lodo lleva una cantidad de agua

- Reducción en el área de flujo
- Disminución de la producción
- Crecimiento bacteriano que favorece la corrosión

Los lodos pueden provocar accidentes que causan pérdidas económicas, generan daño al medio ambiente y en ocasiones en el peor de los casos se pierden vidas humanas, por lo que hay que obtener datos para comprender su comportamiento para evitar su formación en las tuberías.

Si bien en la actualidad se ha desarrollado varios métodos aproximados para calcular la hidrodinámica de la acumulación de lodos los modelos solo consideran flujo estacionario y generalmente son correlaciones por lo que, la característica intermitente e irregular de lodo no se encuentra muy bien descrita.

En la actualidad hay muy pocos estudios de este tipo de flujo multifásico en tuberías inclinadas por lo que, no se cuenta con datos experimentales que permitan conocer el comportamiento del flujo.

La obtención de datos experimentales permitirá la validación de los modelos existentes para este tipo de flujo, el conocimiento de la velocidad de flujo requerida para exceder el esfuerzo de corte crítico (punto de cedencia) requerido para evitar la acumulación de sedimentos en tuberías inclinadas.

1.8 Objetivo

1.8.1 Objetivo general

Obtener datos experimentales de flujo multifásico empleando un fluido no Newtoniano en tuberías inclinadas.

1.8.1 Objetivos particulares

- Seleccionar un fluido con propiedades reológicas similares a los lodos que se acumulan en los ductos.
- Obtener el punto de cedencia del fluido no Newtoniano.
- Medir el colgamiento del líquido no Newtoniano a distintos gastos de aceite en el caso de flujo bifásico y aceite-agua para el sistema trifásico.
- Observar el comportamiento del fluido no Newtoniano con respecto al cambio en la velocidad en cada uno de los sistemas.
- Observar el efecto que tiene el ángulo de inclinación sobre el comportamiento del flujo.
- Determinar la velocidad o gasto requerido para superar el punto de cedencia del fluido no Newtoniano para lograr su desplazamiento.
- Generar una base de datos experimentales con los resultados de las pruebas.

CAPÍTULO 2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

2.1 Descripción de la instalación experimental

El sistema que se utilizó en la experimentación es una instalación a escala de un sistema costa-fuera.

El diseño de la instalación experimental de flujo, permite simular algunos fenómenos que ocurren en tuberías de flujo multifásico como ocurre en las líneas que transportan hidrocarburos. El sistema de flujo multifásico empleado en la experimentación (**Fig. 2.1**) se conforma básicamente del siguiente equipo:

- 1 tanque separador trifásico.
- 1 tanque de almacenamiento para agua.
- 1 tanque de almacenamiento para aceite.
- 2 bombas de cavidades progresivas.
- 1 compresor de aire.
- 1 tanque acumulador de aire.
- 1 tanque de aforo para calibración de los medidores de flujo.

La sección experimental de flujo o sección de pruebas consiste en un conjunto de tuberías de PVC (poli-cloruro de vinilo) transparente de 3[pg] de diámetro nominal, cédula 40, con capacidad de soportar presiones de hasta 13 [kg/cm²]. La tabla 2.1 muestra las especificaciones de la tubería (www.harvel.com).

Tabla 2.1 Dimensiones de la tubería transparente de PVC cédula 40

Diámetro nominal [pg]	Diámetro externo [pg]	Diámetro interno [pg]	Presión máxima [PSI]
3	3.5	3.042	130

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

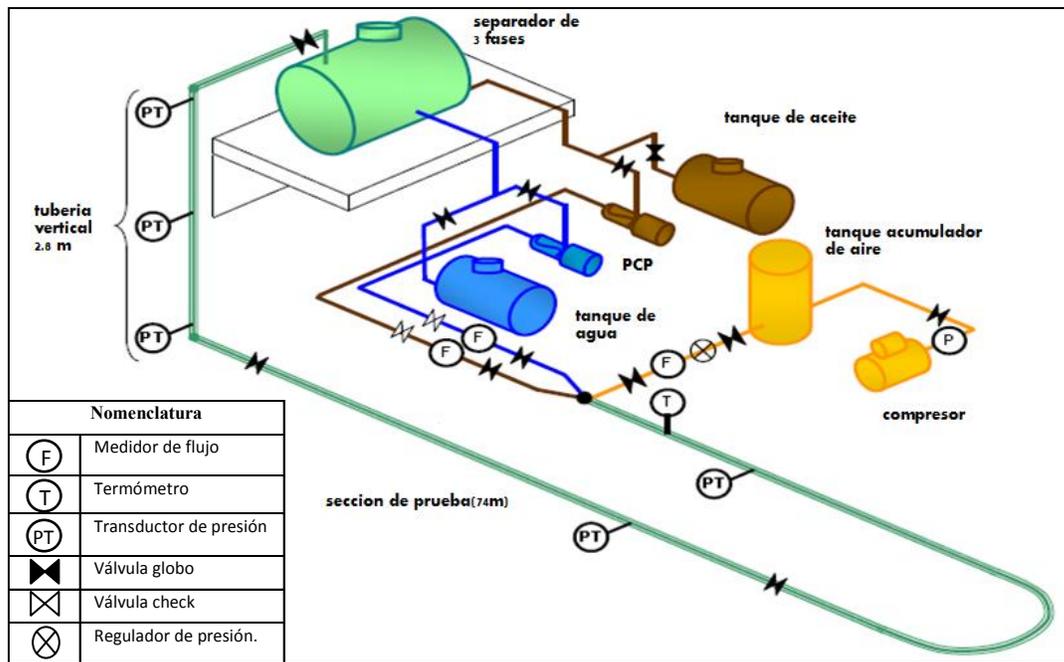


Fig. 2.1 Esquema de la instalación experimental.

La instalación experimental se conforma por tramos tubería 3[m] de longitud, unidas mediante bridas, lo que facilita la modificación de la instalación y permite experimentar con algunos grados de inclinación; el ángulo que se empleó en las pruebas fue 3° ascendente. La longitud total de la tubería en la sección de pruebas es de 75 [m] desde el punto de inyección de fluidos hasta la base del “riser”. La sección vertical ascendente (“riser”) tiene una longitud 2.8 [m].

2.2 Sistema de almacenamiento de fluidos y bombeo

El sistema de bombeo para las pruebas de flujo multifásico está constituido por dos tanques de almacenamiento (uno para agua y otro para aceite mineral) con capacidad de 3000 [L]. Estos tanques se encuentran conectados a bombas de cavidades progresivas de 7.5 [HP] para impulsar los fluidos a la sección de pruebas.

En la **Fig. 2.2** se observan los tanques de almacenamiento instalados en la sección de pruebas.



Fig. 2.2 Tanques de almacenamiento de agua (izquierda) y aceite (derecha).

Las bombas cuentan con motores trifásicos a 220 [V] y 19.5 [A]. Tienen la capacidad de manejar gastos desde 30 hasta 360 [L/min] y pueden alcanzar una presión de 50 [kg/cm²]. La **Fig. 2.3** muestra las bombas de cavidades progresivas.



Fig. 2.3 Equipo de bombeo para agua y aceite.

El control de velocidad de las bombas se efectúa por medio de variadores de frecuencia integrados a sus correspondientes circuitos de potencia. Los semiconductores de los componentes electrónicos están protegidos mediante interruptores termomagnéticos y fusibles de ultra-alto desempeño. Asimismo, el diseño del sistema de potencia contempla el balance trifásico de las cargas eléctricas y protección contra sobrecorrientes lo que permite variar la frecuencia de 5 a 60 [Hz]. La **Fig. 2.4** muestra los variadores de frecuencia correspondientes para cada bomba.



Fig. 2.4 Variadores de frecuencia.

2.3 Equipo de compresión y almacenamiento de aire

En las pruebas de flujo multifásico se emplea aire para simular el gas presente en la tubería por ello se cuenta con un compresor que puede manejar $17.5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$, con capacidad de hasta 450 [L] .

El aire proveniente del compresor es almacenado en un tanque acumulador de 2000 [L] y está diseñado para manejar presiones de hasta $20 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$. El equipo

de compresión y almacenamiento de aire con los que cuenta el sistema experimental se muestran en la **Fig. 2.5**.



Fig. 2.5 Compresor (izquierda) y tanque de aire (derecha).

El sistema hidroneumático cuenta con dispositivos de regulación para la acumulación de aire y su inyección en la sección de pruebas.

La acumulación de aire en tanque es registrada por medio de un manómetro, para la inyección de bajos gastos de aire se utiliza un rotámetro de flujo cuyo intervalo va de 50 a 1400 [L/min]. Para flujos volumétricos mayores se hace circular el aire por un circuito paralelo dotado de una placa de orificio que permite mediciones de hasta 4,000 [L/min]. La **Fig. 2.6** muestra el manómetro y el rotámetro de flujo así como las válvulas reguladoras de presión, las cuales disminuyen la presión que se alimenta al sistema.



Fig. 2.6 Manómetro, rotámetro y válvulas reguladoras de presión.

La presión de inyección de aire es controlada mediante dos reguladores de presión manuales (conectados en paralelo) que permiten hacer ajustes continuos en el intervalo de 0.0 a 2.5 [kgf/cm²]. Dado que la presión máxima en la línea es del mismo orden que el peso de la columna hidrostática en el tramo vertical, los reguladores son ajustados para que la presión de inyección se efectúe con una relación mínima de 2:1. Esta relación de regulación garantiza una inyección de gas en condiciones críticas (en la válvula de mezclado) e impide oscilaciones en los instrumentos de medición ocasionadas por la propagación de “información” proveniente de la línea. En otras palabras se obtiene flujo crítico.

2.4 Sistema de separación y sección de pruebas

La instalación cuenta con un separador trifásico de 5000 [L], en el diseño interno el separador cuenta con dos mamparas. La primera tiene por objeto controlar la turbulencia del flujo a la entrada del separador y la segunda mampara tiene la función de verter la fase menos densa al extremo derecho del separador. En la **Fig. 2.7** del lado izquierdo se observa la primer mampara (de impacto) del

separador y del lado derecho el separador trifásico que se encuentra en la instalación y el cual ha sido instalado a una altura de 1.8 [m].



Fig. 2.7 Separador trifásico y mampara de choque.

El mecanismo de operación del separador es el siguiente: el aire de la mezcla es desalojado inmediatamente a la atmósfera a través de una ventilación en la parte superior del tanque, mientras que los líquidos pasan a un segundo compartimiento en el que ocurre una separación por diferencia de densidad. Debido al tamaño de este compartimiento, el tiempo de residencia de los fluidos se prolonga lo necesario para garantizar su completa segregación.

El tercer compartimiento tiene una mampara de menor altura que permite la decantación del aceite estratificado. Cabe aclarar que los fluidos de trabajo han sido seleccionados para evitar la formación de emulsiones estables por lo que se garantiza que en el tercer compartimiento se tenga solo aceite.

La sección de pruebas está conformada por una serie de tuberías de PVC transparente de 3[pg] de diámetro (cedula 40). La longitud de la sección de prueba medida desde el punto de inyección de la mezcla trifásica hasta la base del tramos vertical ascendente (“riser”) es de 75[m]. Esta sección está montada sobre estructuras metálicas que permiten ajustar la inclinación de la tubería para el estudio del flujo multifásico.

En la **Fig. 2.8** se observa la configuración de la sección de pruebas y el punto de mezclado trifásico (gas-aceite-agua).



Fig. 2.8 Sección de pruebas.

Para el estudio experimental de flujo líquidos-líquido no Newtoniano en tuberías inclinadas se configuró la instalación con 3° de inclinación ascendente. La **Fig. 2.9** presenta las inclinaciones de la sección de pruebas.



Fig. 2.9 Tramo inclinado en la sección de pruebas.

2.5 Dispositivos de medición y adquisición de datos

La instalación experimental se instrumentó para medir y registrar variables de proceso como: la presión, temperatura y flujo volumétrico (gasto). La fracción volumétrica de una fase (colgamiento) puede ser medida de manera directa por una serie de marcas dispuestas sobre la tubería transparente.

Para la medición del flujo volumétrico se instaló un sensor de flujo de alto rendimiento tipo turbina de acero inoxidable marca GF SIGNET, modelo 2540, a la entrada del circuito experimental y sus terminales se conectaron a un transmisor de flujo, el cual transforma la señal enviada por el sensor a una señal digital y se puede obtener el gasto volumétrico del agua y del aceite. En la **Fig. 2.10** se observa el sensor de flujo instalado en la tubería.



Fig. 2.10 Sensores de flujo para el agua y aceite.

La **Fig.2.11** muestra los transmisores de flujo modelo 8550-1 de la marca GF SIGNET para el agua y el aceite respectivamente



Fig. 2.11 Transmisores de flujo, agua (izquierda) y aceite (derecha).

El equipo cuenta también con tres transductores de presión instalados en la sección ascendente vertical (“riser”). La medición de las presiones se realiza mediante transductores de presión (colocados en distintos puntos de la sección de pruebas) que transmiten una señal análoga de corriente directa que varía entre 0.0 y 20.0 [mA]

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Equipo empleado en el aforo y la calibración de los transmisores de flujo

Se realizó un aforo volumétrico con la finalidad de establecer una relación entre la frecuencia a la que opera la bomba y el gasto volumétrico, de esta forma minimizar el error de los datos leídos en los transmisores de flujo. La medición se llevo a cabo un tanque con capacidad de 200 [L], cuyo diámetro interno es de 0.565 [m], para llevar un control volumen se adaptó un medidor de nivel de 0.50 [m], como se muestra en la **Fig. 3.1**.



Fig. 3.1 Equipo empleado en la calibración

Los transmisores de flujo están instalados en tuberías de PVC cedula 80 cuyo diámetro nominal es 1.5 [pg], conforme al manual de calibración de los dispositivos se introdujo una contante de medición (“K”) que, para éstas condiciones de instalación fue de 42.877 [pulsos/litro] para ambos sensores (agua-aceite).

3.1.1 Procedimiento de calibración

A continuación se describe el procedimiento que se realizó para llevar a cabo la calibración de los transmisores de flujo:

- Los aforos se realizaron en un rango de frecuencia de 5 a 25 [Hz] en intervalos de 5 [Hz] los datos gasto obtenidos en la calibración de los transmisores de flujo se muestran en el anexo A.
- De acuerdo a la desviación mostrada entre los valores reales del aforo y los leídos en el transmisor, se obtuvo una nueva constante de medición ajustara la desviación de los valores reales con los medidos. Se encontró la constante de medición ajustada era prácticamente la misma a frecuencias mayores a los 10[Hz], por lo que, el promedio de “K” se realizó con las frecuencias de 10, 15, 20 y 25 [Hz]. La tabla 3.1 muestra los valores de “K” obtenidos en cada aforo.

Tabla 3.1 Valores de "K" ajustados para el agua y aceite

Frecuencia [Hz]	Agua	Aceite
	Constante de medición “K” [pulsos/litro]	Constante de medición “K” [pulsos/litro]
5	48.7025	39.3578
10	51.0290	42.5605
15	51.7224	43.6070
20	51.9296	45.3474
25	51.4368	46.3799
Promedio	51.5294	44.4737

- Con el nuevo valor de “K” se realizaron aforos para corroborar que el gasto real corresponde al valor medido por el transmisor de flujo, La **Fig. 3.2** muestra la relación del gasto con respecto a la variación de frecuencia.

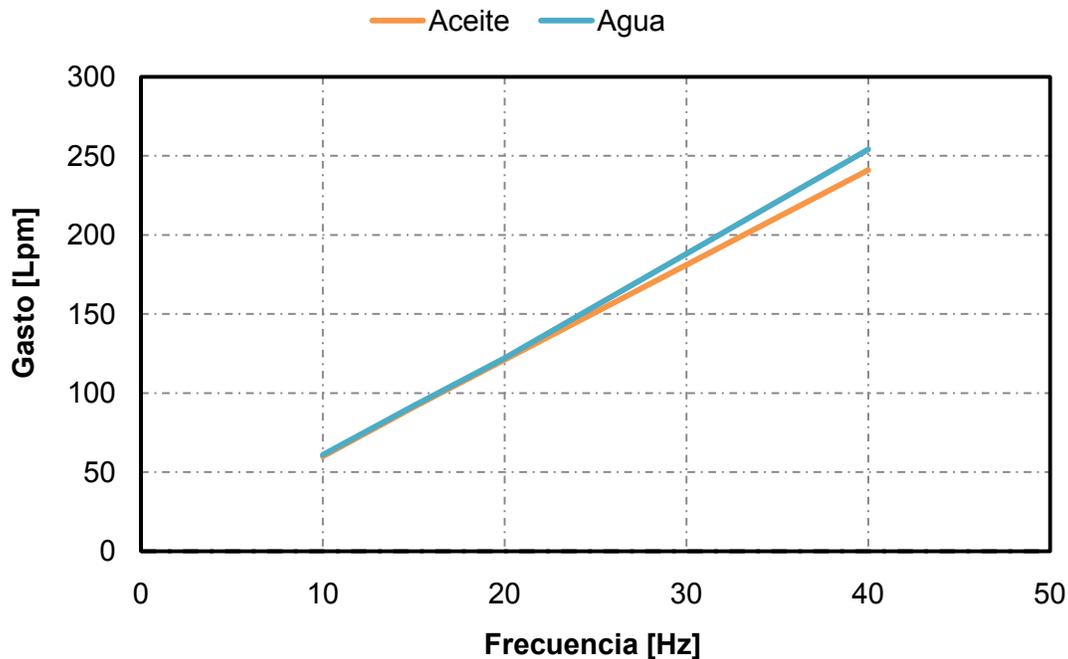


Fig. 3.2 Relación gasto vs variación de frecuencia.

- Como el valor ajustado de “ K ” no correspondía a en frecuencias menores a 10 [Hz], se realizaron aforos para 5, 6, 7, 8 y 9 [Hz] para encontrar una función que ajuste el gasto medido con el transmisor y valor real obtenido por el aforo (las tablas de los resultados obtenidos a frecuencias menores de 10[Hz] se muestran el anexo A)

La **Fig. 3.3 y 3.4** muestra la relación entre el gasto de medido y el gasto de aforo, así como, la ecuación que ajusta dichos valores. La calibración se llevo a cabo tanto para los sensores de aceite como para los de agua por lo y en ambos casos se obtuvo un factor de ajuste.

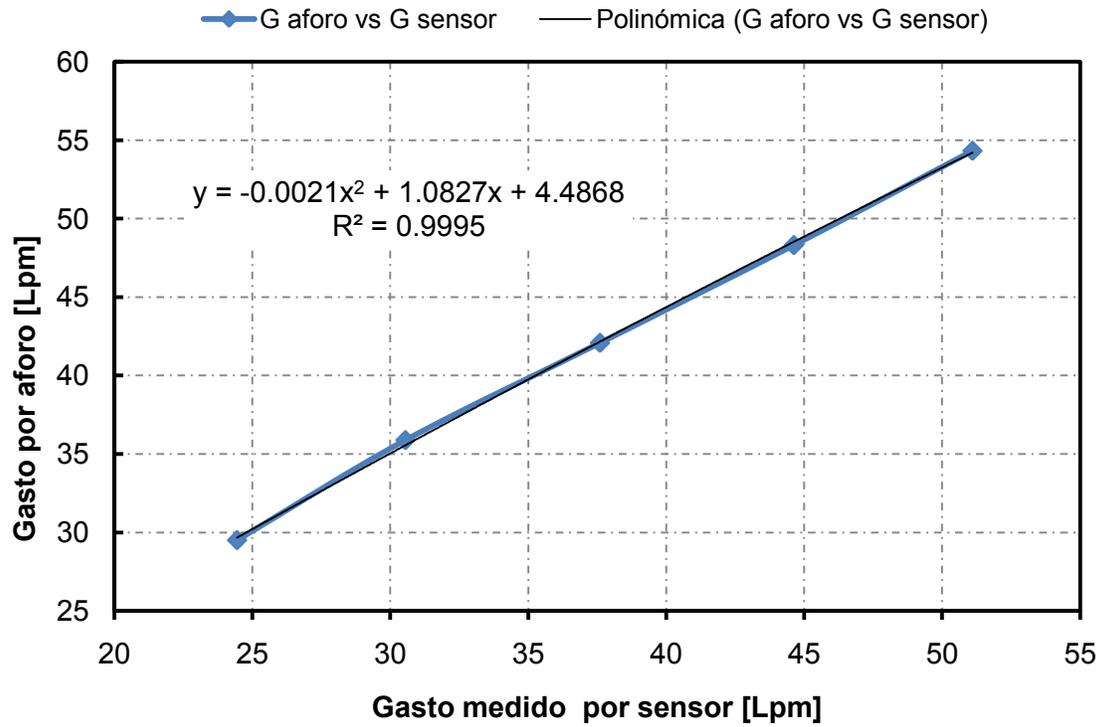


Fig. 3.3 Gasto de aforo vs gasto de medido por el sensor de aceite.

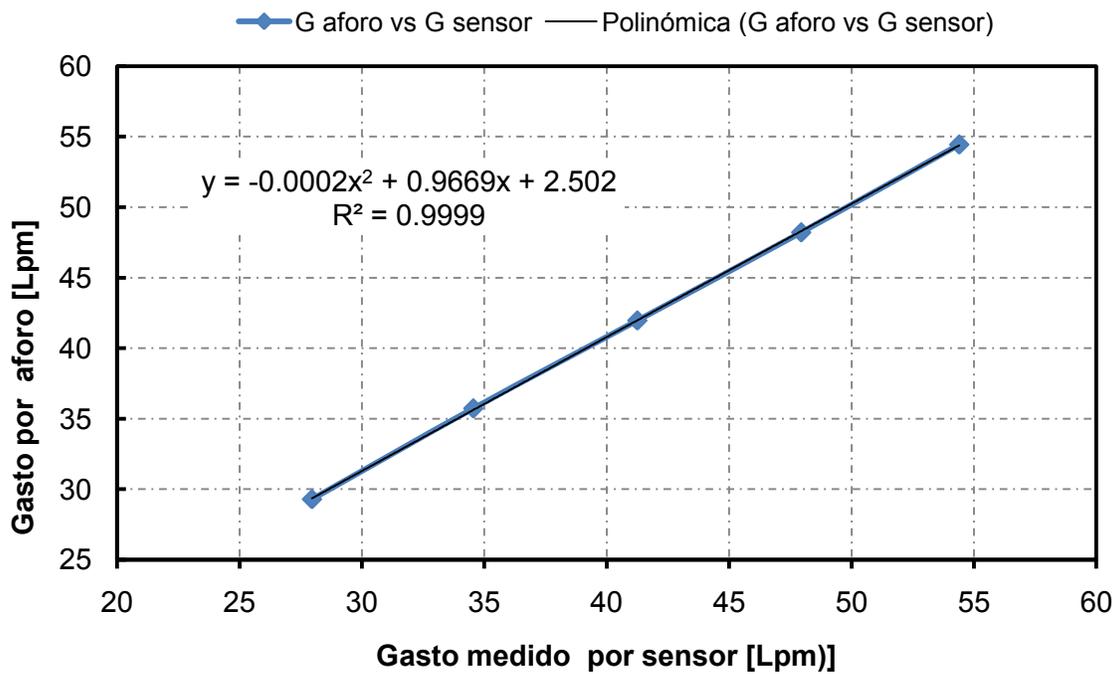


Fig. 3.4 Gasto de aforo vs gasto medido por el sensor de agua.

3.2 Propiedades de los fluidos experimentales

Para el desarrollo experimental y para la simulación del flujo líquidos-líquido no Newtoniano en tuberías inclinadas, se emplearon agua, aceite mineral cristal 50R y un fluido no Newtoniano de la industria alimenticia con las características de los lodos mencionados en el capítulo 1.

Las propiedades del aceite empleado se muestran en la tabla 3.2, estos datos fueron proporcionados por el proveedor del aceite.

Tabla 3.2 Propiedades físicas del aceite.

Propiedad física	Método de referencia	Resultado
Gravedad específica @ 20 °C	ASTM D-1298	0.8368
Viscosidad @ 100 °C, [cSt]	ASTM D-445	1.544
Viscosidad @ 40 °C, [cSt]	ASTM D-445	4.392
Viscosidad @ 210°F [SSU]	ASTM D-88	7.20
Viscosidad @ 100 °F, [SSU]	ASTM D-88	20.34
Punto de Inflamación [°C]	ASTM D-92	172
Punto de Ignición [°C]	ASTM D-92	194
Índice de Viscosidad	ASTM D-2270	---
Color	ASTM D-1500	7.0 Rojo

Para determinar el fluido no Newtoniano empleado en la experimentación se llevaron a cabo pruebas reológicas a diversos fluidos. El fluido seleccionado se proviene de la industria alimenticia.

3.3 Reología del fluido no Newtoniano

Es importante tener una buena caracterización del fluido no Newtoniano ya que como se mencionó anteriormente los lodos que se forman en las tuberías son tienen un comportamiento similar a un plástico de Bingham.

En la selección del fluido no Newtoniano se buscó que éste se comportara con un plástico de Bingham y que tuviera un punto de cedencia bajo para que se pudieran alcanzar los objetivos de la tesis.

Las propiedades reológicas del fluido no Newtoniano como la viscosidad y el punto de cedencia se determinaron en un viscosímetro Fann 35 en colaboración con el Laboratorio de Cementación de la División de Ciencias de la Tierra y el Instituto Mexicano del Petróleo.

3.3.1 Principio y método de operación de viscosímetro Fann

El viscosímetro Fann 35 es un instrumento rotativo de lectura directa disponible en 6 y 12 velocidades que trabaja a frecuencias de 50 y 60 [Hz]. La **Fig. 3.5** muestra el viscosímetro Fann 35 A de 6 velocidades.

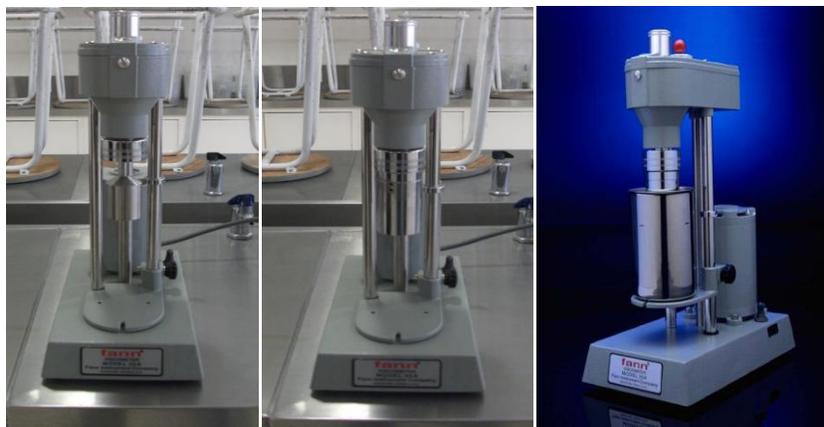


Fig. 3.5 Viscosímetro Fann 35 A.

Las partes que integran el viscosímetro Fann modelo 35 de 6 velocidades son:

- Cubeta.
- Bob o balanza de torsión.
- Rotor o camisa de revestimiento.
- Eje de cojinetes del cilindro interno.
- Resorte de torsión.

La muestra del fluido que va a analizar se confina entre dos cilindros concéntricos de radios R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$). La muestra se almacena en el espacio anular que se forma entre el bob y el cilindro coaxial rotacional (rotor). Las mediciones de son hechas cuando cilindro exterior gira a una velocidad conocida constante N [rpm], el movimiento del rotor en presencia de la mezcla provoca una resistencia de torque debido a la viscosidad del fluido el bob, esta resistencia es transmitida a un resorte de precisión donde es medido como grados deflexión (grados Fann). Este sistema permite la simulación real muchas de las condiciones de flujo importantes encontradas en el procesamiento industrial.

Las velocidades de torque del viscosímetro Fann modelo 35 A de 6 velocidades son: 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm. El rango de la velocidad de corte se puede cambiar seleccionando la velocidad del rotor y usando varias combinaciones de rotor/bob. Una variedad de resortes de torsión están disponibles y diseñados para facilitar su intercambio dependiendo del esfuerzo de corte (τ), esto también permite la medición de la viscosidad de una amplia variedad de fluidos. De acuerdo a la relación rotor/bob empleado en la experimentación la velocidad y el esfuerzo de corte se puede calcular de la siguiente forma:

$$\gamma = 1.7023N \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\tau = 5.11F\theta \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El cambio en las velocidades se logra combinando el botón de engrane y el cambio de velocidades del motor (2 velocidades, alta-baja). La combinación de velocidades se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Combinación de velocidades para el viscosímetro.

Velocidad [rpm]	Cambio velocidad	Botón de engrane
600	Alta	Abajo
300	Baja	Abajo
200	Alta	Arriba
100	Baja	Arriba
6	Alta	Centro
3	Baja	Centro

Procedimiento de operación:

La **Fig. 3.6** muestra de manera grafica el método empleado para medir el esfuerzo de corte del fluido no Newtoniano.



Fig. 3.6 Procedimiento de medición del esfuerzo de corte.

1. Llenar la copa o el vaso con el fluido que se requiere analizar (aproximadamente 350 ml) hasta la línea ó marca.
2. Colocar la camisa de revestimiento al Bob.
3. Colocar la copa a la plataforma del viscosímetro Fann y sujetar.
4. Subir la plataforma (hasta que el nivel del líquido alcance la línea grabada en la camisa) con una velocidad de 6[rpm] para desplazar el aire del espacio anular.
5. El cambio de velocidad en el torque se realiza cada 10 segundos.
6. Tomar la lectura del grado de deflexión (θ).
7. Graficar la velocidad de corte en rpm vs grados de deflexión [θ].
8. Determinar el modelo reológico obtenido conforme a la grafica.
9. Calcular el punto de cedencia, la viscosidad aparente

Nota: Al subir la plataforma se debe cuidar que la profundidad de inmersión sea la adecuada si la distancia es excedida, los cojinetes del eje del bob pueden ser dañados. Por lo que la distancia entre la marca del la copa y la marca que tiene rotor nunca debe ser menor a 1.27 [cm]. En mediciones donde la muestra tiene que calentarse nunca mayores de 93 [°C] debido a que el bobo es hueco.

3.3.2 Modelos reológicos

Los modelos reológicos que se pueden obtener con el viscosímetro Fann en base a la relación velocidad de corte y esfuerzo de corte son:

- Modelo de ley de potencias.
- Modelos de plástico de Bingham.

3.3.2.1 modelo de ley de potencias

Al graficar la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema cartesiano de coordenadas rectangulares, el modelo producirá una curva con un valor de corte igual a cero para una velocidad de corte igual a cero sin embargo al graficar en papel doble logarítmico resultará una línea recta como se muestra en la **Fig. 3.7**.

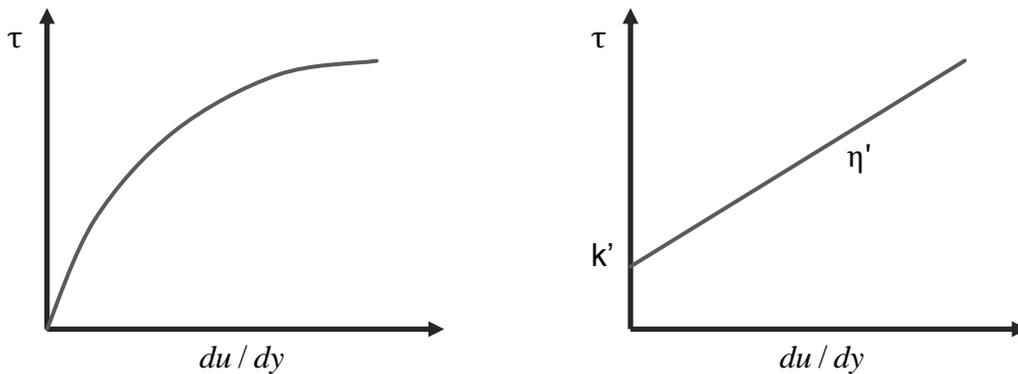


Fig. 3.7 Modelo de ley de potencia sistema cartesiano (izquierda) y escala Log-Log (derecha)

En este modelo, los parámetros se obtienen realizando un análisis de regresión sobre la forma logarítmica de la ecuación que describe el modelo, dicha ecuación se presenta a continuación:

$$\log(\tau) = \log(k) + n \log(\gamma) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde el índice de comportamiento de flujo η' es el valor de la pendiente y k' es el índice consistencia.

3.3.2.2 Modelo de plástico de Bingham

Este modelo de plástico de Bingham se identifica porque al graficar el esfuerzo de corte contra la velocidad de corte en un sistema cartesiano de coordenadas rectangulares se forma una línea recta. Como ya se mencionó en el capítulo 1 el plástico de Bingham es muy parecido al fluido Newtoniano y se observa en su modelo reológico, la diferencia es que el plástico de Bingham tiene una constante conicidad como punto de cedencia, el movimiento de este fluido se origina a partir de que se supera el punto de cedencia como se muestra en la **Fig. 3.8**. La expresión matemática que describe el comportamiento es la siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{ó} \quad \tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

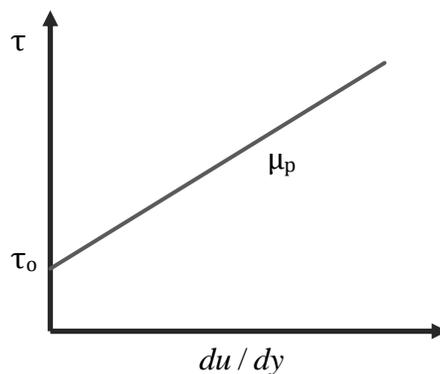


Fig. 3.8 Modelo gráfico del plástico de Bingham.

La viscosidad plástica (μ_p) se obtiene a partir de la pendiente de la recta, mientras que el punto de cedencia (τ_0) se obtiene al prolongar la línea hasta cruzar el eje de las ordenadas.

3.3.3 Cálculo del punto de cendecia y la viscosidad del fluido no newtoniano

Para obtener el punto de cedencia del fluido No Newtoniano se graficaron las lecturas de esfuerzo de corte obtenidas con el viscosímetro Fann modelo 35A.

Antes de las mediciones se cambio el resorte de torsión con el fin de ampliar el rango de medición del esfuerzo de corte (convencionalmente el viscosímetro Fann modelo 35A tiene un resorte de torsión F1, para los datos obtenidos se empleó un resorte de torsión F5).

Se obtuvieron dos valores a las velocidades de 3 y 6 [rpm]. La tabla 3.4 muestra las lecturas promedio de los grados de deflexión que se obtuvieron con el viscosímetro Fann 35A.

Tabla 3.4 Valores obtenidos en el viscosímetro Fann 35A

Velocidad de corte [rpm]	Lecturas [θ]
3	13
6	25.8

La **Fig. 3.9** muestra de manera grafica los datos obtenidos de las mediciones así como el grado de deflexión [θ] del punto de cedencia. De acuerdo al modelo del plástico de Bingham es posible obtener el punto de cedencia y la viscosidad plástica con 2 datos de medición. El punto de cedencia se obtuvo prolongando la línea recta que se forma de las lecturas hacia el eje vertical, que sería correspondiente a una velocidad de corte de cero. La viscosidad plástica se puede obtuvo con el cálculo la pendiente que tiene la línea recta.

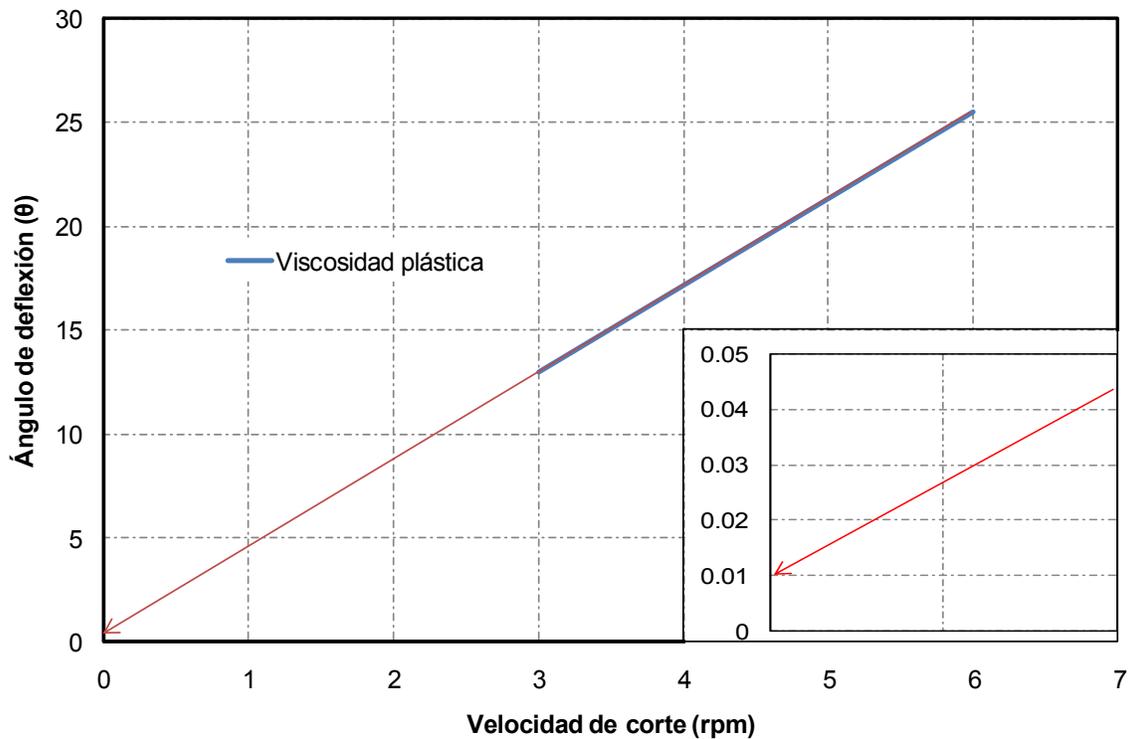


Fig. 3.9 Comportamiento reológico del fluido no Newtoniano.

En la grafica es posible observar que prolongando la línea recta hacia el eje vertical se obtiene un esfuerzo de fluencia o punto de cedencia de 0.01 [θ]. Este esfuerzo de fluencia puede ser expresado en pascales [Pa] de la siguiente forma:

$$\theta = 1^\circ Fann = 5.11 \frac{dinas}{cm^2} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$\tau_0 = 5 \left[0.01^\circ Fann \times \frac{5.11 \text{dinas}/cm^2}{1^\circ Fann} \times \frac{1 Pa}{10 \text{dinas}/cm^2} \right] = 0.0255 Pa \quad (\text{Ec. 3.6})$$

El resorte empleado en la medición fue F5 por lo que el resultado de la medición se afecta por el número 5.

La densidad del fluido no Newtoniano se obtuvo de manera directa en el laboratorio mediante un densímetro mientras que la viscosidad plástica obtuvo por medio del cálculo de la pendiente. La tabla 3.5 muestra de forma resumida las propiedades reológicas del fluido no Newtoniano empleado en la experimentación.

Tabla 3. 5 Propiedades reológicas del fluido no Newtoniano seleccionado.

Punto de cedencia [Pa]	Densidad [gr/cm²]	Viscosidad [Pa·s]
0.025	1.37	6.25

Ahmed y Cols. publicaron algunos estudios reportando las propiedades reológicas de fluidos que tienen la misma procedencia que el fluido seleccionado. La tabla 3.6 muestra los datos obtenidos de las pruebas realizadas por Jasim Ahmed (Ahmed, Prabhu, y Cols., 2007).

Tabla 3.6 Parámetros reológicos reportados por Ahmed

Punto de cedencia [Pa]	Densidad [gr/cm²]	Viscosidad [Pa·s]
0.005- 0.04	1.33-1.56	0.7-50

Los parámetros reológicos obtenidos para el fluido no Newtoniano empleado en la experimentación de flujo multifásico se encuentran dentro del intervalo reportado por Jasim Ahmed. La existencia de un punto de cedencia indica que el fluido es un plástico de Bingham.

3.4 Procedimiento experimental en el laboratorio de flujo multifásico

Se realizaron pruebas experimentales en dos sistemas de flujo multifásico en una tubería inclinada, en el sistema bifásico se empleó aceite-fluido no Newtoniano y en el sistema trifásico aceite-agua-fluido no Newtoniano

Se montó una sección de prueba con inclinación ascendente (**Fig. 3.10**), se ubico de forma que se pudiera observar el comportamiento del fluido no Newtoniano en cada uno de los sistemas.



Fig. 3.10 Sección de prueba

Se obtuvo el perfil de las sección de pruebas realizando mediciones en el cambio de elevación cada 50 [cm], el objetivo fue tener una mayor precisión en los datos experimentales. El ángulo promedio obtenido a través de las mediciones del perfil fue de 2.9° de inclinación.

Para introducir el fluido no Newtoniano en la sección de prueba se realizó una perforación de 0.013 [m] de diámetro en la parte superior de la tubería, la ubicación de la perforación se indican con color rojo en la grafica del perfil. La inyección se realizó por medio de una bomba de transmisión.

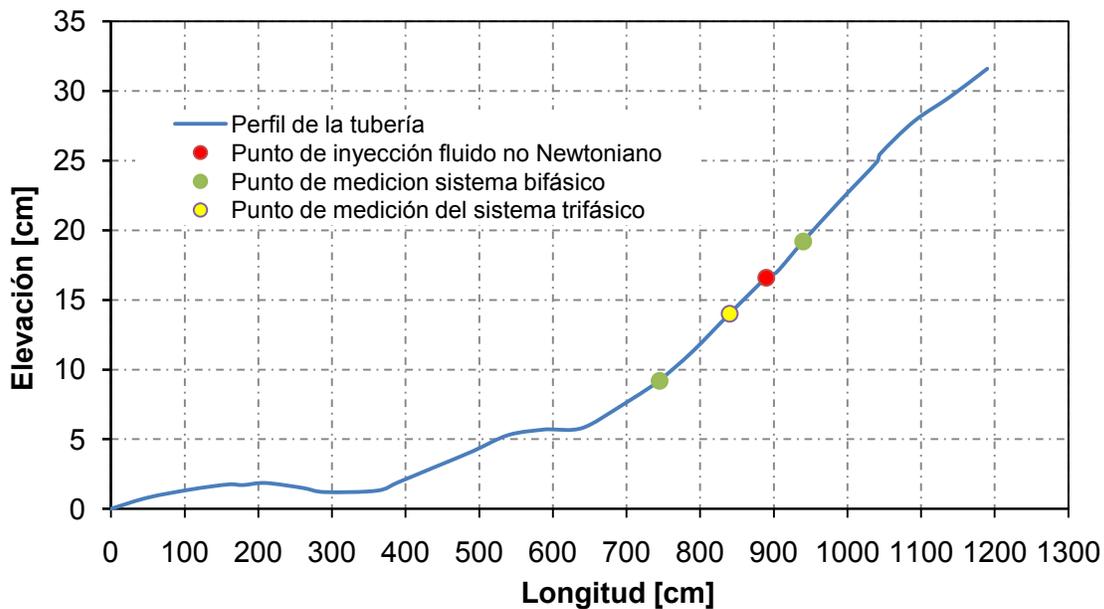


Fig. 3.11 Perfil de la sección de prueba.

En el sistema bifásico la medición del colgamiento se llevó a cabo dos puntos los cuales se ubican a los 745 y 910 [cm] de la sección inclinada mientras que, la medición en el sistema trifásico se llevó a cabo en un punto ubicado a los 840 [cm], como se muestra en la Fig. 3.11.

Para realizar la medición del colgamiento se instalaron segmentos de acetato partiendo de la parte media superior hacia la parte media inferior del tubo, de tal forma que se obtuvieran 180° (mitad de la circunferencia) como se muestra en la Fig. 3.12.



Fig. 3.12 Método de medición del colgamiento del fluido no Newtoniano.

El cálculo del colgamiento expresado en fracción volumétrica se realizó conforme al método de Taitel y Dukler (Taitel y Dukler, 1976). El desarrollo de los cálculos se muestra en el Anexo B.

El procedimiento experimental para ambos sistemas es el siguiente:

1. Inyectar y medir el colgamiento inicial del fluido no Newtoniano en la sección de prueba (**Fig. 3.13**).



Fig. 3.13 Inyección del fluido no Newtoniano en la tubería.

2. Abrir la válvula de inyección de los fluidos para llenar la tubería con aceite por acción de la gravedad si es necesario se pueden accionar las bombas a una frecuencia baja de tal forma que no se arrastre el fluido no Newtoniano. En el caso del sistema trifásico llenar la tubería con agua y aceite procurando una relación 1:10.
3. Se midió la temperatura de los fluidos en la tubería.
4. Variar la frecuencia de las bombas para incrementar el gasto.
5. Observar el comportamiento del fluido no Newtoniano con el incremento del gasto en cada sistema.
6. Si se muestran variaciones en el colgamiento del fluido no Newtoniano debido al incremento del gasto esperar a que el sistema se estabilice.
7. Leer y registrar el valor del colgamiento después de la estabilización.

CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas experimentales se realizaron con un fluido no Newtoniano cuyo modelo reológico corresponde a un plástico de Bingham con punto de cedencia de 0.025 [Pa]. En ambos sistemas el fluido no Newtoniano se inyecta en la sección inclinada ubicada a los 890[cm] como se muestra en la **Fig. 3.11** del capítulo anterior.

En las pruebas realizadas se observó el comportamiento del fluido No Newtoniano respecto al cambio del gasto, se registraron los valores y se calculó el colgamiento en del fluido no Newtoniano (FNN) en cada uno de los sistemas, parte de los cálculos se basaron en el trabajo de Taitel y Dukler. Las expresiones empleadas y la secuencia de cálculos se muestran en el Anexo B.

4.1 Datos experimentales para el sistema aceite-fluido no Newtoniano

Para cuantificar las fracciones volumétricas del fluido no Newtoniano en el sistema bifásico, se establecieron dos puntos de medición los cuales se ubicaron a los 745 y 910 [cm], antes y después del punto de inyección respectivamente.

Con el FNN dentro de la tubería, se comenzó a llenar el circuito de pruebas con aceite para ello se abrió la válvula de inyección y el aceite comenzó a circular por acción de la gravedad el gasto que registraron los transmisores de flujo fue de 39.4 [L/min] y una velocidad de 0.14 [m/s], sin embargo, se observó que en la zona de prueba el fluido no Newtoniano comenzó a deslizarse muy lentamente hacia la parte baja (flujo contracorriente) hasta que, una fracción del FNN se concentró en la horizontal de la tubería, aproximadamente a los 400[cm] (**Fig. 3.11**). Lo anterior ocurrió debido al bajo punto de cedencia que tiene el fluido empleado (0.025 Pa) y el grado de inclinación que tiene la tubería, por lo que, no se observó fracción volumétrica en los puntos de medición.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Una vez estabilizado el sistema se accionaron las bombas y se comenzó a circular aceite incrementado el gasto hasta encontrar una velocidad de equilibrio o velocidad contracorriente, que permitiera leer el nivel del fluido no Newtoniano en los puntos de medición. La tabla 4.1 muestra los datos obtenidos para el primer punto de medición, tales como: gasto y velocidad del aceite, el colgamiento del FNN y algunos parámetros adimensionales de Teitel y Dukler, empleados para el cálculo del colgamiento (ver anexo B).

Tabla 4.1 Prueba No.1 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto del aceite [m ³ /dia]	Velocidad aceite [m/s]	Frecuencia [Hz]
1	Aceite-FNN	745	2.29	9.2	156	129.6	0.320	15
2	Aceite-FNN	910	2.8	17	0			
Punto de medición	h_1	h_2	h_{FNN}	\hat{h}_{FNN}	factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN}	Colgamiento FNN
1	4.0607	0.3842	-0.1973	-0.0255	-1.0510	Sin valor de colgamiento		
2	-4.4450	8.8900	8.3083	1.0752	1.1505			

Como se puede observar a pesar de haber obtenido un punto de medición a la longitud de 745 [cm], el valor fue tan bajo que no se obtuvo un valor de colgamiento para el fluido no Newtoniano. La velocidad y el gasto a la que se obtuvo este dato fueron de 0.320 [m/s] y 129.6 [m³/d] respectivamente. Cabe destacar que el fluido FNN continuó desplazándose en contracorriente al flujo aceite.

Salinas realizó un trabajo experimental con flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano en tuberías horizontales en el que reportó que la velocidad del aceite requerido para desplazar por completo el FNN de la tubería es 0.33 [m/s] (Salinas, 2011).

Se incremento el gasto de aceite con la finalidad de encontrar una velocidad de equilibrio donde el aceite no fluyera contracorriente y que permitiera leer el colgamiento del fluido no Newtoniano. Durante el incremento de la velocidad fue posible observar dos patrones de flujo. Las **Figs. 4.1** y **4.2** muestran el patrón de flujo estratificado y el patrón de flujo ondulado respectivamente.



Fig.4.1 Patrón de flujo estratificado.



Fig.4.2 Patrón de flujo ondulado.

La tabla 4.2 muestra los datos obtenidos con el incremento del gasto en un 15%, en la prueba dos fue posible medir un valor de colgamiento en el punto en primer punto de medición. Con el incremento en el gasto se encontró la velocidad de

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

equilibrio, es decir la velocidad a la cual el fluido no Newtoniano dejó de desplazarse en contracorriente al flujo del aceite. Durante esta prueba se observó un movimiento circular al frente del tapón del fluido no Newtoniano.

Tabla 4.2 Prueba No. 2 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto del aceite [m ³ /día]	Velocidad aceite [m/s]	Frecuencia [Hz]
1	Aceite-FNN	745	2.29	9.2	134	151.2	0.373	17
2	Aceite-FNN	910	2.8	17	153			
Punto de medición	h_1	h_2	h_{FNN}	\hat{h}_{FNN}	factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN}	Colgamiento FNN
1	3.0877	1.3572	0.7755	0.1003	-0.7992	0.04110	2.45385	0.05233
2	3.9605	0.4844	-0.0971	-0.0125	-1.0251	Sin valor de colgamiento		

En la tabla 4.2 se observa un valor de colgamiento del fluido no Newtoniano (H_{FNN}) de 0.05233 en el primer punto de medición a los 745 [cm]. El gasto empleado en esta prueba fue de 151 [m³/d]. La velocidad del aceite fue de 0.373 [m/s].

Lo anterior indica que el gasto del aceite fue suficiente para mover el FNN pero no logró desplazarlo por completo.

El gasto del aceite se incrementó 6% con respecto a la prueba anterior, los datos obtenidos de la prueba se muestran en la tabla 4.3, se observa que con la variación en el gasto del aceite se obtuvo un valor de colgamiento para el punto de medición 2 el cual tiene una inclinación de 2.8°. Las mediciones para cada incremento se llevaron a cabo en lapsos de tiempo de 30 [min] lo que permitió estabilizar el flujo y observar el comportamiento del FNN.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Tabla 4.3 Prueba No. 3 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto del aceite [m ³ /dia]	Velocidad aceite [m/s]	Frecuencia [Hz]
1	Aceite-FNN	745	2.29	9.2	138	162.432	0.401	17
2	Aceite-FNN	910	2.8	17	140			
Punto de medición	h ₁	h ₂	h _{FNN}	ĥ _{FNN}	factor C	Ã _{FNN}	A _{FNN}	Colgamiento
1	3.3032	1.1417	0.5600	0.0724	-0.8550	0.02545	1.51919	0.0324
2	3.4050	1.0399	0.4582	0.0593	-0.8813	0.01891	1.12912	0.0240

En la prueba No. 3 se observó que con el incremento del gasto del aceite a 162.432 [m³/d] con una velocidad de 0.401 [m/s], el colgamiento en el primer punto de medición ubicado a los 745 [cm] disminuyó, mientras que, el colgamiento del segundo punto de medición ubicado a los 910 [cm] mostró un aumento significativo. En esta prueba se observó que el fluido no Newtoniano se desplazó en dirección del flujo sin embargo, no fue removido de la sección inclinada de la tubería.

En la siguiente prueba se incrementó el gasto del aceite en un 5 % con respecto al gasto empleado en la prueba anterior, el sistema entró en régimen permanente 20[min] después del incremento en el gasto. Los resultados obtenidos en la prueba No.4 se muestran en la tabla 4.4, en ellos se observa una disminución del colgamiento en los dos puntos de medición.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Tabla 4.4 Prueba No. 4 del sistema aceite-fluido no Newtoniano

Punto de medición	Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto del aceite [m ³ /dia]	Velocidad aceite [m/s]	Frecuencia [Hz]
1	Aceite-FNN	745	2.29	9.2	140	171.216	0.423	17
2	Aceite-FNN	910	2.8	17	144			
Punto de medición	h ₁	h ₂	h _{FNN}	ĥ _{FNN}	factor C	Ã _{FNN}	A _{FNN}	Colgamiento
1	3.4051	1.0399	0.4583	0.0593	-0.8814	0.0189	1.1291	0.0240
2	3.5961	0.8489	0.2673	0.0346	-0.9308	0.0085	0.5067	0.0108

El incremento en el gasto logró disminuir el colgamiento del aceite en 25 % para el primer punto de medición ubicado a los 745[cm] y en 50% para el segundo punto de medición ubicado a los 910 [cm]. No obstante a pesar de que se removió una cantidad considerable del fluido no Newtoniano a una velocidad de 0.423[m/s], es necesario incrementar el gasto del aceite el gasto para que se puedan superar los efectos de la inclinación y por lo tanto desplazar por completo el FNN. La Fig. 4.3 muestra el colgamiento del fluido no Newtoniano después del incremento del gasto.



Fig.4 3 Colgamiento del fluido no newtoniano para la velocidad de 0.423 [m/s].

En conclusión se encontró que:

- La velocidad de equilibrio a la cual el fluido no Newtoniano dejó de moverse en contracorriente al flujo del aceite fue 0.373 [m/s].
- Con el incremento en los gastos volumétricos de aceite fue posible observar dos patrones de flujo para el sistema líquido-líquido no Newtoniano.
- Los patrones de flujo que se visualizaron fueron: patrón de flujo estratificado y patrón de flujo ondulado.
- Para desplazar por completo un fluido no Newtoniano con punto de cedencia de 0.025 [Pa] en una tubería que tiene 2.9° de inclinación ascendente es necesario aplicar una velocidad mayor a 0.423 [m/s].
- El gasto mínimo requerido para remover el fluido no Newtoniano en un sistema bifásico aceite-líquido no Newtoniano es 40% mayor que el gasto empleado en una tubería horizontal con el mismo sistema bifásico.

4.2 Datos experimentales para el sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano

Se realizaron 3 pruebas experimentales para el sistema de flujo trifásico aceite-agua-líquido no Newtoniano. Para cuantificar las fracciones volumétricas de cada uno de los fluidos se estableció un punto de medición ubicado a los 840 [cm] poco antes del punto de inyección. Durante la experimentación se trato de mantener una relación de gastos agua aceite 1:10 respectivamente.

La tabla 4.5 muestra los datos del colgamiento inicial medido después de que se inyectó el fluido no Newtoniano en la tubería. Como se observa en la tabla el colgamiento inicial del FNN fue de 0.1128.

Tabla 4.5 Datos iniciales de la prueba experimental para el sistema trifásico

Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto aceite [m ³ /día]	Gasto agua [m ³ /día]	Velocidad aceite [m/s]	Velocidad agua [m/s]	Frecuencia [Hz]
FNN	840	3	14	125	0	0	0	0	0
Interface	h1	h2	h _{FNN}	ĥ _{FNN}	factor C	Ã _{FNN}	A _{FNN}	colgamiento	colgamiento real
FNN	2.5495	1.8955	1.3138	0.1700	-0.6599	0.0886	5.2872	0.1128	0.1128

EL procedimiento para iniciar con la experimentación fue similar al del sistema bifásico de tal modo que se abrió la válvula de inyección del aceite y posteriormente se abrió la válvula de inyección del agua para que ambos fluyeran por efecto de la gravedad, cuando el sistema quedó en equilibrio se procedió a incrementar el gasto de los fluidos procurando la relación antes mencionada.

Al igual que en el sistema bifásico se encontró una velocidad de equilibrio lo que permitió leer las variaciones en el colgamiento del fluido no Newtoniano y observar su comportamiento con el incremento del gasto. La Fig. 4.4 muestra el momento en que se alcanza la velocidad de equilibrio.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

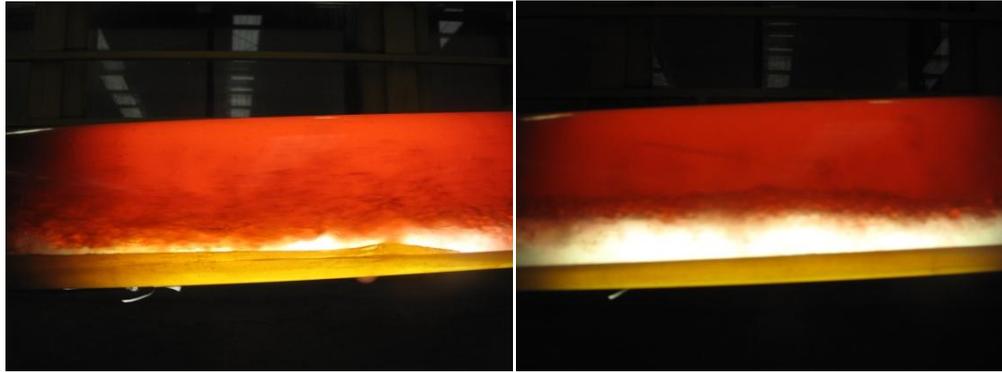


Fig.4.4 Sistema trifásico de la sección inclinada en equilibrio.

La tabla 4.6 muestra los datos a los cuales se encontró la velocidad de equilibrio a la cual el FNN dejó de desplazarse contracorriente, fue a la velocidad de mezcla 0.298 [m/s]. La velocidad de la mezcla se obtiene a partir de la suma de las velocidades superficiales de cada fase la cuales se calcularon a partir de los gasto volumétricos del agua y aceite.

Tabla 4.6 Datos obtenidos en la prueba No. 1 para el sistema trifásico

Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto aceite [m ³ /dia]	Gasto agua [m ³ /dia]	Velocidad aceite [m/s]	Velocidad agua [m/s]	Frecuencia [Hz]	Velocidad de la mezcla [m/s]
FNN-agua	840	3.09	14	130	103.9824	16.9344	0.257	0.042	14	
agua-aceite				108					8	
Interfaz	h_1	h_2	h_w	\hat{h}_w	factor C	\tilde{A}_w	A_w	Colgamiento	Colgamiento real	0.298
FNN-agua	2.8572	1.5878	1.0061	0.1302	-0.7396	0.0601	3.5908	0.0766	0.0766	
agua-aceite	1.3736	3.0714	2.4898	0.3222	-0.3555	0.2187	13.0596	0.2785	0.2019	

El colgamiento del FNN en la velocidad de equilibrio fue de $H_{FNN}=0.0766$ alrededor de un 50% mayor que el colgamiento obtenido en el sistema bifásico, por lo que, el agua favorece la acumulación del fluido no Newtoniano, igual que en los sistemas reales donde el agua favorece la acumulación del lodo. Tomando en cuenta que en inclinaciones ascendentes la velocidad del agua disminuye por acción de la gravedad provocando que se estanque en la parte inferior de la tubería, por lo que,

el colgamiento del fluido no Newtoniano es mayor en el sistema trifásico donde la presencia de agua forma una capa que cubre al FNN originando un estancamiento de la fase.

Durante el incremento del gasto se fue posible visualizar los patrones de flujo generados por el cambio en la velocidad superficial de los líquidos, a continuación se muestran los patrones de flujo observados:

La **Fig. 4.5** muestra los patrones de flujo que se visualizaron en las dos interfaces (FNN-agua y agua-aceite) equilibrio al encontrar la velocidad de equilibrio, se puede observar que el patrón de flujo en la interfaz FNN-agua es estratificado con lecho inmóvil mientras que, para la interfaz agua-aceite el patrón de flujo es estratificado con mezclado en la interfaz.

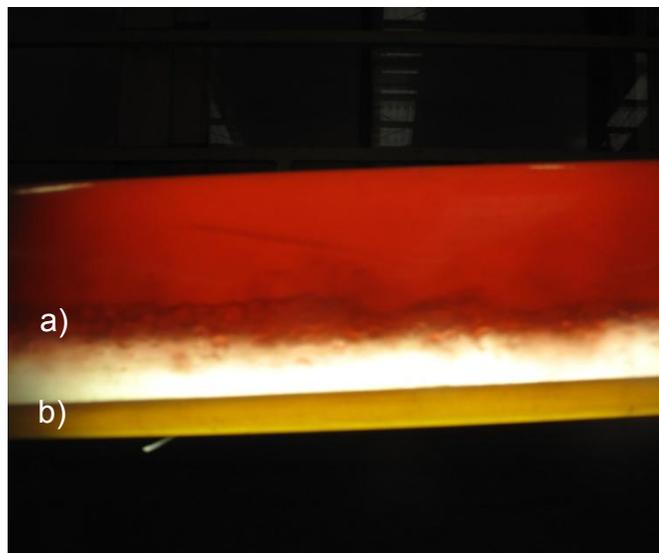


Fig.4.5 a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz. b) Flujo estratificado con lecho inmóvil

En la **Fig. 4.6** se muestra otro patrón visualizado en la experimentación el cual para la interfaz FNN-agua fue estratificado con lecho móvil (se formaron dunas en

el fluido no Newtoniano). La interfaz agua-aceite mostró un patrón de flujo estratificado con mezclado en la interfaz.



Fig.4.6 a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz. b) Flujo estratificado con lecho móvil (generación de dunas de FNN)

La **Fig. 4.7** muestra la configuración geométrica de las fases cuando el fluido no Newtoniano es arrastrado. Se observa que interfaz FNN-agua es estratificado con lecho móvil mientras que la interfaz agua-aceite muestra flujo disperso agua en aceite.

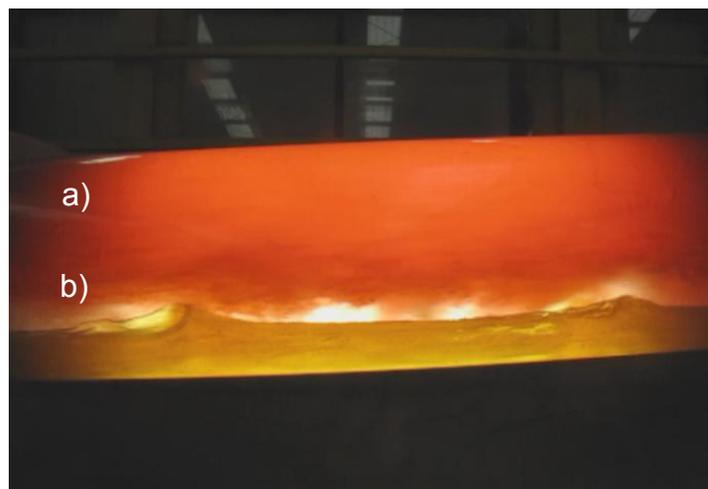


Fig.4.7 a) Flujo disperso agua en aceite. b) Flujo estratificado con lecho móvil (generación de dunas de FNN)

La propagación de las olas durante el arrastre del fluido no Newtoniano se muestran en la **Fig. 4.8**. Las olas se generaron debido a que la velocidad de la mezcla fue suficiente para provocar el movimiento del FNN hasta que el sistema entra en equilibrio nuevamente por acción de la gravedad. La secuencia es la siguiente a) se generó una ola de propagación, b) la ola se propagó de manera elongada en dirección del flujo durante un lapso de tiempo, c) la frecuencia de las olas disminuye hasta desaparecer por acción de la gravedad, d) finalmente el sistema entró en equilibrio hasta que se vuelva a incrementar el gasto.

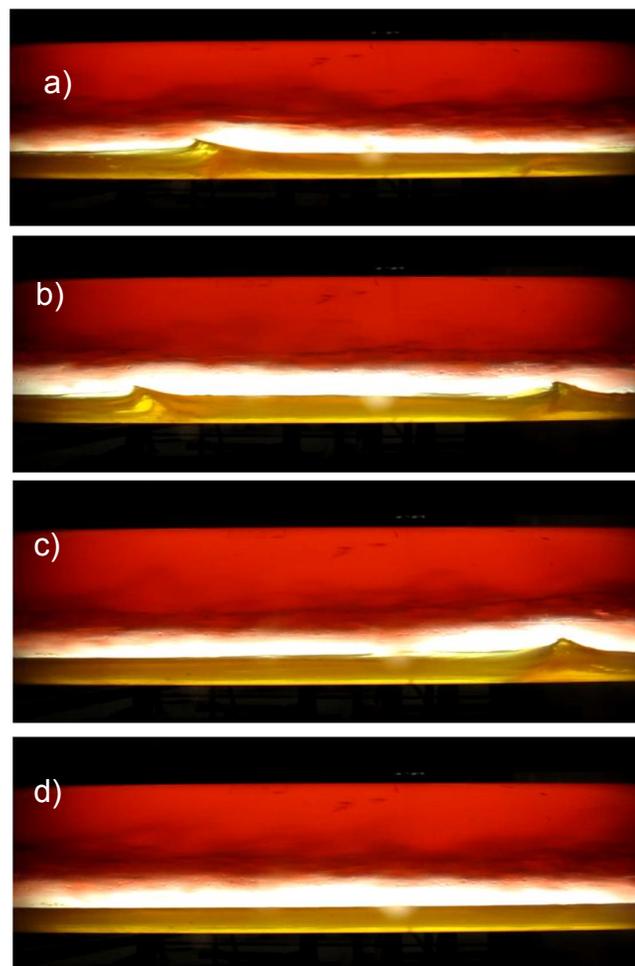


Fig.4.8 Propagación de las olas o dunas durante el arrastre del fluido no Newtoniano

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Salinas reportó dos patrones de flujo en el estudio experimental de flujo trifásico de líquido-líquido-líquido no Newtoniano (Salinas, 2011).

Se observó el comportamiento del fluido no Newtoniano cuando el gasto del aceite se incrementó a 123.552 [m³/d] manteniendo constante el gasto del agua, los datos obtenidos de la prueba se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.7 Datos obtenidos en la prueba No. 2 para el sistema trifásico.

Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto aceite [m ³ /día]	Gasto agua [m ³ /día]	Velocidad aceite [m/s]	Velocidad agua [m/s]	Frecuencia [Hz]	Velocidad de la mezcla [m/s]
FNN-agua	840	3.09	14	142	123.552	16.9344	0.305	0.042	14	
agua-aceite				108					8	
Interfaz	h ₁	h ₂	h _{FNN}	ĥ _{FNN}	factor C	Ā _{FNN}	A _{FNN}	Colgamiento	Colgamiento real	0.347
FNN-agua	3.5027	0.9423	0.3606	0.0467	-0.9067	0.0133	0.7913	0.0169	0.0169	
agua-aceite	1.3736	3.0714	2.4898	0.3222	-0.3555	0.2187	13.0596	0.2785	0.2616	

Con el incremento en el gasto del aceite en 20%, la velocidad de la mezcla aumento a 0.347 [m/s], originando la disminución del colgamiento en un 80% obteniéndose un valor de $H_{FNN}=0.169$, mientras que, la fracción volumétrica del agua aumento en 20% ($H_w=0.02616$) contenida colgamiento del agua aumento en un 20%.

En un trabajo experimental donde realizaron pruebas de flujo multifásico en un sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano en tuberías horizontales, se reportó que la velocidad de la mezcla requerida para remover por completo el fluido no newtoniano con punto de cedencia de 0.025 [Pa] fue de 0.18 [m/s] (Salinas, 2011).

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Durante el desarrollo de la prueba No. 2 el patrón de flujo que se visualizó fue estratificado con lecho móvil (se formaron dunas en el fluido no Newtoniano) en la interfaz FNN-agua, mientras que la interfaz agua-aceite mostró un patrón de flujo estratificado con mezclado en la interfaz.

En la prueba No. 3 se incrementó el gasto del aceite a 142.56 [m³/d], con la finalidad de desplazar el agua de la tubería y a su vez arrastrar el fluido no newtoniano, la velocidad de la mezcla resultante en ésta prueba fue de 0.384 [m/s]. Los valores obtenidos de la prueba se muestran en la tabla 4.8.

Con el incremento en el gasto del aceite en 15% fue posible remover el fluido no Newtoniano de la tubería inclinada, no obstante la mayor parte de la remoción se debió al flujo disperso del agua y aceite, ya que la fase dispersa golpeaba la superficie de la interfaz con el fluido no Newtoniano, lo que aceleró el barrido de fluido.

Tabla 4.8 Datos obtenidos en la prueba No. 3 para el sistema trifásico.

Interfaz	Longitud [cm]	Ángulo de inclinación	Elevación [cm]	Ángulo de medición	Gasto aceite [m ³ /día]	Gasto agua [m ³ /día]	Velocidad aceite [m/s]	Velocidad agua [m/s]	Frecuencia [Hz]	Velocidad de la mezcla [m/s]
FNN-agua	840	3.09	14	0	142.56	12.96	0.352	0.320	14	
agua-aceite				108					8	
Interfaz										0.384
	h_1	h_2	h_{FNN}	\hat{h}_{FNN}	factor C	\bar{A}_{FNN}	A_{FNN}	Colgamiento	Colgamiento real	
FNN-agua	-4.4450	8.8900	8.3083	1.0753	1.1506					
agua-aceite	1.3736	3.0714	2.4898	0.3222	-0.3555	0.2187	13.0596	0.2785	-	

En conclusión se encontró que:

- La velocidad de equilibrio a la cual el FNN dejó de fluir en contracorriente en el sistema trifásico aceite-agua-líquido no Newtoniano fue 0.298 [m/s].
- Se visualizaron dos patrones de flujo en la interfaz fluido no newtoniano-agua, ambos estratificados con uno con lecho inmóvil y otro con lecho móvil (formación de dunas u olas en la superficie).
- Con el incremento en el gasto del aceite, la interfaz agua-aceite mostró dos patrones de flujo, a bajos gastos de aceite el flujo fue estratificado con mezclado en la interfaz, a gastos mayores de aceite el patrón de flujo que se visualizó fue disperso agua en aceite.
- La velocidad requerida para desplazar el fluido no Newtoniano en el sistema trifásico fue 0.347 [m/s].
- La velocidad para remover el fluido no Newtoniano en el sistema bifásico es mayor por lo menos en un 30% con respecto al sistema trifásico.
- La presencia de agua favorece el desplazamiento del fluido no Newtoniano.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- 1) Se seleccionó un fluido no Newtoniano con características similares a los lodos que se acumulan en los ductos.
- 2) El modelo reológico del fluido no Newtoniano fue plástico de Bingham con punto de cedencia de 0.025 [Pa].
- 3) Se recopilaron datos experimentales de flujo en un sistema bifásico y trifásico empleando un fluido no Newtoniano que se comporta como plástico de Bingham.
- 4) Se generó una base de datos experimentales con pruebas que se han realizado por primera vez.

5.1.1 Sistema bifásico con flujo aceite-fluido no Newtoniano

- 1) La velocidad de equilibrio a la cual el fluido no Newtoniano dejó de moverse contracorriente al flujo del aceite y que permitió llevar a cabo mediciones de colgamiento en una tubería inclinada fue de 0.373 [m/s].
- 2) El incremento en el gasto volumétrico de aceite permitió observar dos patrones de flujo para la interfaz FNN.
- 3) Los patrones de flujo observados en el sistema bifásico fueron estratificado y ondulado.
- 4) La velocidad requerida para desplazar por completo un fluido no Newtoniano con punto de cedencia de 0.025 [Pa] en una tubería que tiene 2.9° de inclinación ascendente tiene que ser mayor a 0.423 [m/s].

- 5) El gasto mínimo requerido para remover el fluido no Newtoniano en un sistema bifásico aceite-líquido no Newtoniano es 40% mayor que el gasto empleado en una tubería horizontal con el mismo sistema bifásico.
- 6) El ángulo de inclinación en un sistema bifásico tiene efecto sobre el desplazamiento del fluido no Newtoniano.

5.1.2 Sistema trifásico con flujo aceite-fluido no Newtoniano

- La velocidad de equilibrio de la mezcla a la cual el FNN dejó de fluir en contracorriente en el sistema trifásico aceite-agua-líquido no Newtoniano fue 0.298 [m/s].
- 1) Se visualizaron dos patrones de flujo en la interfaz fluido no newtoniano-agua, ambos estratificados con uno con lecho inmóvil y otro con lecho móvil (formación de dunas u olas en la superficie del FNN).
 - 2) Con el incremento en el gasto del aceite, la interfaz agua-aceite mostró dos patrones de flujo: a bajos gastos de aceite el flujo fue estratificado con mezclado en la interfaz; a gastos mayores de aceite el patrón de flujo que se visualizó fue disperso agua en aceite.
 - 3) La velocidad requerida para desplazar el fluido no Newtoniano en el sistema trifásico fue 0.347 [m/s].
 - 4) La velocidad para remover el fluido no Newtoniano en el sistema bifásico es mayor por lo menos en un 30% con respecto al sistema trifásico.
 - 5) La presencia de agua favorece el desplazamiento del fluido no Newtoniano.
-

5.2 Aportaciones

- 1) Fue posible visualización de patrones de flujo líquido-líquido no Newtoniano y líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.
- 2) La velocidad requerida para desplazar por completo al fluido no Newtoniano es mayor a 0.423 [m/s] en el sistema bifásico mientras que en el sistema trifásico fue de 0.347 m/s.
- 3) Se comprobó que la velocidad para desplazar un fluido no Newtoniano en una tubería inclinada es aproximadamente 40% mayor que una tubería horizontal.
- 4) Se demostró que se requiere mayor velocidad para desplazar el fluido no Newtoniano en el sistema bifásico respecto al trifásico.
- 5) El incremento en la velocidad del aceite resulta en una transición de flujo estratificado a ondulado en el sistema bifásico, de tal forma que se provoca el movimiento del fluido no Newtoniano, dicho movimiento ocasiona una disminución en el colgamiento del mismo.
- 6) En la interfaz agua-aceite se produce la transición del patrón de flujo estratificado con mezclado en la interfaz al patrón de flujo agua disperso en aceite, antes de que el lodo se remueva por completo de la tubería.

5.3 Recomendaciones

- 1) Es recomendable reproducir los patrones de flujo generando en cada uno de los sistemas anteriormente analizados, con el fin de recopilar datos de operación que permitan generar mapas de patrones de flujo.
- 2) Se debe considerar realizar estudios experimentales en sistemas de flujo cuatrifásico empleando gas-aceite-agua-FNN en tuberías horizontales e inclinadas.
- 3) Debido a que en la industria las propiedades de los lodos varían conforme a la naturaleza del mismo lodo es importante realizar pruebas con fluidos que tengan puntos de cedencia mayores al que se empleó.
- 4) Resulta importante desarrollar un modelo analítico que permita representar el fenómeno de colgamiento en sistemas bifásicos y trifásicos, así como validar el modelo con los datos reportados en este trabajo.

ANEXOS

Anexo A Registros obtenidos de los aforos de calibración

La calibración de los transmisores de flujo se llevó a cabo mediante una serie de aforos, en los cuales se comparó el valor del gasto medido en el transmisor de flujo (sensor) contra el valor de gasto calculado a partir de un volumen definido de líquido y el tiempo en que se alcanzó dicho volumen (aforo).

Las frecuencias empleadas en la calibración para obtener la constante de medición corregida “K” fueron 10, 15, 20 y 25 [Hz], en ambos transmisores de flujo.

Se realizaron aforos en el intervalo de frecuencias de 5 a 9 [Hz] para encontrar una ecuación que ajuste el valor de gasto medido por el sensor empleando la misma constante de medición corregida “K”.

A.1 Registros de los gastos volumétricos del agua en los aforos

En las tablas A.1.1, A.1.2, A.1.3 y A.1.4 se muestran los datos obtenidos de los aforos para el transmisor de flujo del agua a las frecuencias de 10, 15, 20 y 25 [Hz] respectivamente.

Tabla A.1.1 Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	122.75	50	72.59	61.2755	1.1847	50.7943
2	42.877	124.09	50	72.6	60.6138	1.1977	51.3558
3	42.877	122.78	50	72.7	61.2605	1.1867	50.8837

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Tabla A.1.2 Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	81.75	50	111.3	92.0069	1.2097	51.8680
2	42.877	81.41	50	111.3	92.3911	1.2047	51.6523
3	42.877	81.12	50	111.3	92.7214	1.2004	51.4683

Tabla A.1.3 Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	61.22	50	148.6	122.8612	1.2095	51.8595
2	42.877	61.56	50	148.61	122.1826	1.2163	52.1510
3	42.877	61.29	50	148.6	122.7209	1.2109	51.9188

Tabla A.1.4 Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	47.22	50	188.8	159.2876	1.1853	50.8211
2	42.877	48.28	50	188.6	155.7904	1.2106	51.9069
3	42.877	47.85	50	187.9	157.1904	1.1954	51.2537

En las Tablas A.1.5, A.1.6, A.1.7, A.1.8 y A.1.9 se reportan los valores para frecuencias de 5, 6, 7, 8 y 9 [Hz] respectivamente, estos valores son afectados con la correlación mostrada en la 3.4.

Tabla A.1.5 Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	252.19	50	33.48	29.8250	1.1225	48.1315
2	42.877	257.38	50	33.6	29.2236	1.1498	49.2981
3	42.877	252.97	50	33.59	29.7330	1.1297	48.4390

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

Tabla A.1.6 Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	210.34	50	34.5	35.7591	35.6220
2	42.877	210.69	50	34.6	35.6997	35.7173

Tabla A.1.7 Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	179.13	50	41.1	41.9894	41.9037
2	42.877	179.35	50	41.4	41.9379	42.1889

Tabla A.1.8 Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	156.38	50	48.01	48.0980	48.4619
2	42.877	155.66	50	47.88	48.3205	48.3387

Tabla A.1.9 Datos de aforo y calibración para agua a 9 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	138.09	50	54.2	54.4685	54.3205
2	42.877	138.25	50	54.6	54.4055	54.6985

A.2 Registros de los gastos volumétricos del aceite en los aforos

Las Tablas A.2.1, A.2.2, A.2.3 y A.2.4 muestran los datos obtenidos para las frecuencias de 10,15, 20 y 25 Hz respectivamente, para estos datos es posible realizar un valor promedio de cada una y obtener una constante nueva “K” corregida. La constante nueva “K” corregida es el resultado del producto del factor K establecido inicialmente y el factor de corrección equivalente al valor leído en el sensor dividido entre el valor leído por aforo.

Tabla A.2.1 Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	123.43	50	60	60.9379	0.9846	42.2171
2	42.877	124.53	50	60.3	60.3996	0.9984	42.8063
3	42.877	124.72	50	60	60.3076	0.9949	42.6583

Tabla A.2.2 Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	81.07	50	93.4	92.7786	1.0067	43.1642
2	42.877	82.32	50	93.1	91.3698	1.0189	43.6889
3	42.877	82.13	50	93.7	91.5812	1.0231	43.8690

Tabla A.2.3 Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	61.72	50	128.2	121.8659	1.0520	45.1056
2	42.877	62.02	50	128.2	121.2764	1.0571	45.3248
3	42.877	62.34	50	128.35	120.6539	1.0638	45.6120

Tabla A.2.4 Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	50.31	50	163.2	149.5043	1.0916	46.8048
2	42.877	49.5	50	163.4	151.9507	1.0753	46.1077
3	42.877	49.75	50	163	151.1872	1.0781	46.2271

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

En las Tablas A.2.5, A.2.6, A.2.7, A.2.8 y A.2.9 se reportan valores para frecuencias de 5, 6, 7,8 y 9 [Hz] respectivamente, tales valores se afectan por la correlación mostrada en la **Fig. 3.3**.

Tabla A.2.5 Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	252.25	50	25.5	29.8179	0.8552	36.6680
2	42.877	255.32	50	25.4	29.4594	0.8622	36.9688
3	42.877	255.03	50	25.6	29.4929	0.8680	37.2175

Tabla A.2.6 Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	209.13	50	30.3	35.9660	35.3646
2	42.877	210.06	50	30.8	35.8067	35.8418

Tabla A.2.7 Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	179.1	50	37.5	41.9964	42.1349
2	42.877	178.35	50	37.7	42.1730	42.3199

Tabla A.2.8 Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	155.47	50	44.6	48.3795	48.5980
2	42.877	155.91	50	44.65	48.2430	48.6427

Tabla A.2.9 Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz

PRUEBA	K	TIEMPO	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	CORRELACION
1	42.877	137.91	50	51	54.5396	54.2424
2	42.877	139	50	51.2	54.1120	54.4160

Anexo B Procedimiento para el cálculo de la fracción volumétrica de los fluidos

Para el cálculo de la fracción volumétrica de las fases presentes en cada uno de sistemas que se presentan en el capítulo 5, se emplearon algunas de las expresiones utilizadas por Taitel y Dukler, básicamente aquellas donde se calcula el área transversal que ocupa de cada fase (Taitel y Dukler, 1976). A continuación se presenta desarrollo del cálculo del colgamiento para el sistema bifásico aceite-fluido no Newtoniano. El colgamiento del agua en el sistema trifásico se realizó de la misma forma.

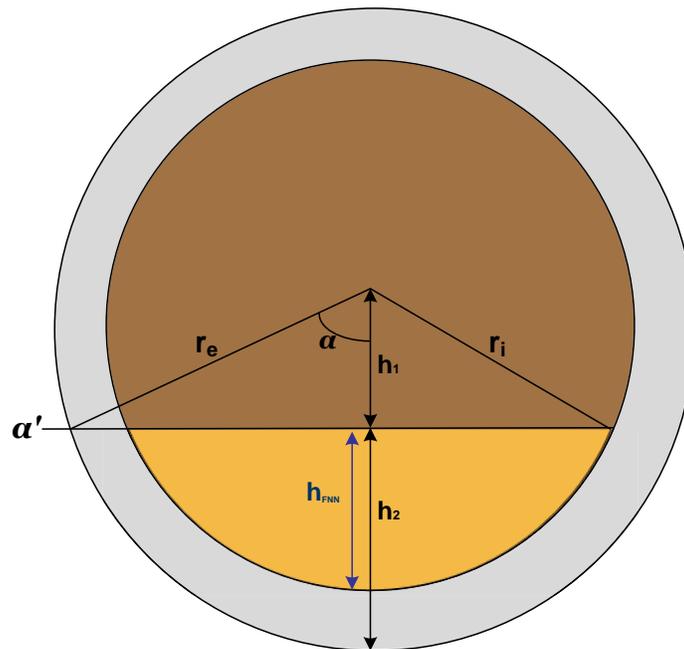


Fig. B.1 Representación geométrica de los fluidos en un sistema bifásico.

Con base en las funciones trigonométricas se cálculo el valor de la altura h_1 de por medio de la siguiente expresión:

$$h_1 = r_e \cos \alpha ; \quad (\text{B.1})$$

$$h_1 = r_e \cos(180 - \alpha') , \quad (\text{B.2})$$

La altura de h_2 está considerada desde el radio externo hasta la interfaz del aceite y el fluido no Newtoniano por lo que se puede calcular de la siguiente forma:

$$h_2 = r_e - h_1, \quad (B.3)$$

El nivel del fluido no Newtoniano h_{FNN} en la sección transversal de la tubería se cálculo como sigue:

$$h_{FNN} = h_2 - (r_e - r_i), \quad (B.4)$$

En base al trabajo presentado por Taitel y Dukler se cálculo el área transversal de fluido no Newtoniano a partir de la altura de su interfaz (h_{FNN}), de esta forma se obtuvo la fracción volumétrica o colgamiento de FNN. Las expresiones adimensionales empleadas son las siguientes:

Se cálculo una altura adimensional en función del diámetro interno

$$\tilde{h}_{FNN} = \frac{h_{FNN}}{D_i}, \quad (B.5)$$

El área adimensional se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\tilde{A}_{FNN} = 0.25[\pi - \cos^{-1} C + C\sqrt{1-C^2}]. \quad (B.6)$$

Donde C es equivalente a:

$$C = 2h_{FNN} - 1. \quad (B.7)$$

Con el valor del área adimensional se calcula el área dimensional de la siguiente forma:

$$A_{FNN} = (\tilde{A}_{FNN})(D_i^2), \quad (B.8)$$

La fracción volumétrica del fluido no Newtoniano se calcula de la con la siguiente expresión:

$$H_{FNN} = \frac{A_{FNN}}{A_{Ti}}. \quad (B.9)$$

Nomenclatura

Símbolo	Definición	Unidades
\tilde{A}_{FNN}	Área adimensional del fluido no Newtoniano	(adim)
A_{Ti}	Área total interna de la tubería	(cm ²)
A_w	Área por el agua	(cm ²)
C	Factor correspondiente a $2h_{FNN}-1$	(adim)
D_i	Diámetro interno de la tubería	(cm)
F	Factor de torsión del instrumento, con un valor de 5	(adim)
h_1	Altura o nivel del aceite desde la interface de los fluidos hasta la parte central de la tubería	(cm)
h_2	Altura o nivel del fluido no Newtoniano más el espesor	(cm)
h_{FNN}	Altura o nivel real del fluido no Newtoniano	(cm)
\tilde{h}_{FNN}	Altura adimensional real del fluido no Newtoniano	(adim)
H_{FNN}	Colgamiento real del fluido no newtoniano	(adim)
k	Índice consistencia del modelo de potencias	(adim)
K'	Punto de cedencia del plástico de Bingham en gráfica	(Pa)
" K "	Factor para calibración de sensores de flujo	(adim)
N	Velocidad de corte del viscosímetro Fann 35 ^a	(rpm)
r_i	Radio interno de la tubería	(cm)
r_e	Radio externo de la tubería	(cm)

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería inclinada.

t	tiempo	(s)
u	Velocidad del fluido en dirección y	(m/s)
α'	Ángulo leído en la prueba experimental	(°)
α	Ángulo real para el cálculo de h_l	(°)
μ_p	Viscosidad plástica del fluido	(Pa·s)
θ	Lectura del viscosímetro en grados de deflexión	(adim)
τ	Esfuerzo tangencial de corte	(Pa)
τ_0	Esfuerzo de cedencia o punto de cedencia	(Pa)
γ	Velocidad nominal de corte	(1/s)

Bibliografía

1. Acock, A., ORourke, T., Shinnboh, D., Alexander, J., Andersen, G., Kaneko, T., Venkitaraman, A. et al. 2004. Métodos Prácticos de Manejo de la Producción de Arena. *Oilfield Review* (verano): 10-29, http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish04/sum04/p10_29.ashx. [Fecha de acceso 24 mayo 2010].
2. Ahmed, J., Prabhu, S. T., Raghavan, G. y Ngadi M. 2007. Physico-Chemical, Reological, Calorimetric and Dielectric Behavior of Selected Indian Honey. *Journal of Food Engineering* **79** (4): 1207-1213. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2006.04.048](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.048)
3. Babbitt, H. y Caldwell, D. H. 1939. *Laminar Flow of Sludges in Pipes With Special Reference to Sewage Sludge*. Urbana, Illinois: Boulletin Series University of Illinois, Engineering Experiments Station.
4. Brill, J. P. y Beggs, H. D. 1998. *Two Phase Flow in Pipes*, fifth edition, Tulsa. Oklahoma: University of Tulsa.
5. Brill, J. y Mukherjee, H. 1999. *Multiphase Flow in Wells*. Monograph Series, SPE, Richardson, Texas **17**.
6. Brown, K. E. y Beggs, H. D. 1977. *The Technology of Artificial Lift Methods* Volumen 1. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Co.
7. Doron, P. y Barnea, D. 1996. Flow Pattern Maps for Solid-Liquid Flow in Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **22** (2), 273-283. doi: [10.1016/0301-9322\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00071-2)
8. Fairuzov, Y. V. 2009. Apuntes de Clase "Flujo Multifásico Transitorio". UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Ingeniería Petrolera y de Gas Natural, México, D.F.
9. Fairuzov, Y. V., Arenas-Medina, P., Verdejo-Fierro, J. y González-Islas, R. 2000. Flow Pattern Transitions in Horizontal Pipelines Carryng Oil-Water Mixtures: Full-Scale Experiments. *Journal Energy Resources Technology* **122** (4): 169-176. doi: [10.1115/1.1318204](https://doi.org/10.1115/1.1318204)
10. Firouzi, M. y Hashemabadi, S. H. 2008. Analytical Solution for Newtonian-Bingham Plastic Two-Phase Pressure Driven Stratified Flow Through the

- Circular Ducts. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **35** (5): 666-673. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.12.003](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.12.003)
11. Fragoso Rivera, E. E. 2007. Estudio Numérico de la Corrida de Diablos para el Mantenimiento de la Producción en Oleoductos. Tesis de Licenciatura, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, D.F.
 12. Gardea Villegas, H. 2008. Dos Propuestas para el Proyecto de Bombeo de Fluidos No Newtonianos. Caso de los Lodos Residuales de las Plantas de Tratamiento de Aguas Negras. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* **9** (2): 87-97. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/13489> [Fecha de acceso 10 de enero de enero de 2011].
 13. Goharzadeh, A. y Rodgers, P. 2009. Experimental Characterization of Solid Particle Transport by Slug Flow Using Image Velocimetry. *Journal Physics: Conference Series* **147** (1). doi: [10.1088/1742-6596/147/1/012069](https://doi.org/10.1088/1742-6596/147/1/012069)
 14. Gómez, M.T., Ancheyta, J., Marroquín, G., Alonso, F., Betancourt, G. y Centeno, G. 2003. Formación de Sedimentos Durante la Hidrodesintegración de Residuos del Petróleo. *Revista de la Sociedad de Química de México* **47** (3): 260-266.
 15. Grassi, B., Strazza, D. y Poesio, P. 1998. Experimental Validation of Theoretical Models in Two-Phase High-Viscosity Ratio Liquid-Liquid Flows in Horizontal and Slightly Inclined Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **34** (19): 950-965. doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.03.006)
 16. Havre, K., Ole, S.K. y Stray, H. 2000. Regulación del Flujo de Lodo en Tuberías. *Revista ABB* (4): 55-63.
 17. Hill, K. B. y Shook, C.A. 1998. Pipeline Transport of Coarse Particles by Water and by Fluids With Yield Stresses. *Particulate Science and Technology* **16** (2): 163-183. doi: [10.1080/02726359808906793](https://doi.org/10.1080/02726359808906793)
 18. Ibarrola, E. 2008. *Introducción a los Fluidos No Newtonianos*. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.pdf.
 19. Kaminsky, R. D. 1998. Predicting Single-Phase and Two-Phase Non-Newtonian Flow Behavior in Pipes. *Journal of Energy Resources Technology* **120** (1-2): 1-6. doi: [10.1115/1.2795006](https://doi.org/10.1115/1.2795006)
 20. Krylow, M. y Fryzlewics, K. 2007. Rheological Properties of Wastewater Sludge. *Proc.*, Polish-Swedish Seminars, Cracow, March 17-18, Report no. 13
-

- <http://www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/index.htm>. [Fecha de acceso 1 de febrero de 2011].
21. Liu, H. 2003. *Pipeline Engineering*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
 22. Meraz, M. 2008. Recuperación Mejorada de Hidrocarburos Vía Microbiana. Tesis de Licenciatura, IPN, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, México, D.F.
 23. Mushrush, G., y Speight, J. 1995. *Petroleum Products: Instability and Incompatibility*. Washington, DC: Taylor & Francis.
 24. NRF-005-PEMEX-2000. Protección Interior de Ductos con Inhibidores. 2000. México, D.F.: PEMEX, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.
 25. Ruiz-Viera, M., Delgado, M.A., Franco, J.M., Sánchez, M.C. y Gallegos, C. 2006. On the Drag Reduction for the Two-Phase Horizontal Pipe Flow of Highly Viscous No-Newtonian Liquid/Air Mixtures: Case of Lubricating Grease. *International Journal of Multiphase Flow* **32** (2): 232-247. doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.09.003)
 26. Rumiche, P. F., e Indacochea, B. (2007). Estudio de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos, <http://claridadpuertorico.com/documents/articles/01%20Gasoductos%20y%20oleoductos-%20estudio%20fallas.pdf>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].
 27. Russell, T. W., Hodgson, G. W. y Govier, G. 1959. Horizontal Pipelines Flow of Mixture of Oil and Water. *The Canadian Journal Chemical Engineering*. **37** (1): 9-17. doi: 10.1002/cjce.5450370104.
 28. Salinas, F. P. 2011. Estudio Experimental de Flujo Bifásico Líquido-Líquido No Newtoniano y Flujo Trifásico Líquido-Líquido-Líquido No Newtoniano en una Tubería Horizontal. Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, D.F.
 29. Shames, I. 1995. *Mecánica de Fluidos*. Santa Fé de Bogotá: Mc Graw-Hill.
 30. Slatter, P. 1997. The Rheological Characterisation of Sludges. *Water Science and Technology* **36** (11): 9-18.
 31. Taitel, Y. y Dukler, A. E. 1976. A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AlchE Journal* **22** (1): 47-54. doi: [10.1016/j.petrol.2007.03.002](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2007.03.002).
-

32. La Corrosión de un Oleoducto Suspende el 8% de la Producción de los EE.UU. Crisis Energética: Respuesta a los Retos Energéticos del SXXI, <http://www.crisisenergetica.org/article.php?story=20060807094828630>. [Fecha de acceso 25 de agosto de 2009].
33. Derrame de Hidrocarburos en el Mar. Estructplan On Line, <http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=764>. [Fecha de acceso 26 de noviembre de 2009].
34. *Harvel Plastic, Inc.* 2011. <http://www.harvel.com>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].
35. Xu, J.-y., Wu, Y.-x., Shi, Z.-h., Lao, L.-y. y Li, D.-h. 2007. Studies on Two-Phase Co-Current Air/Non-Newtonian Shear-Thinning Fluid Flows in Inclined Smooth Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **33** (9): 948-969. doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.008)
36. Xu, J.-y., Wu, Y.-x., Li, D.-h. y Dong, H.-i. 2007. Effects of Non-Newtonian Liquid Properties on Pressure Drop During Horizontal Gas-Liquid Flow. *Journal Central South University of Technology* **14** (Supl. 1): 112-115. doi: [10.1007/s11771-007-0225-7](https://doi.org/10.1007/s11771-007-0225-7)