



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 21 de febrero de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

YULIAN ALEJANDRO CAVIEDES LOSADA, con C.C. No. 1.075.295.207, DIEGO FERNANDO ARCE PÉREZ, con C.C. No. 1.075.287.188, autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado ESTUDIO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS EN TUBERÍAS ENROLLADAS presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de INGENIERO DE PETRÓLEOS;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Firma:

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: ESTUDIO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS EN TUBERÍAS ENROLLADAS

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ARCE PÉREZ	DIEGO FERNANDO
CAVIEDES LOSADA	YULIAN ALEJANDRO

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
BONILLA CAMACHO	LUIS FERNANDO

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO DE PETRÓLEOS

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

CIUDAD: NEIVA - HUILA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019

NÚMERO DE PÁGINAS: 89

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Vigilada mieducación



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Diagramas ___ Fotografías ___ Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X Grabados ___
Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos ___ Retratos ___ Sin ilustraciones ___
Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. No Newtoniano	Non-Newtonian	6. Factor de fricción	Friction factor
2. Fluidos	Fluids	7. Reynolds	Reynolds
3. Tubería enrollada	Coiled tubing	8. Viscosidad	Viscosity
4. Guar	Guar	9. Pseudoplástico	Pseudoplastic
5. Curvatura	Curvature	10. Correlaciones	Correlations

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La tubería enrollada se ha establecido en los últimos años como una de las herramientas más utilizadas en la industria debido a su amplia variedad de usos. Una de las limitantes de esta herramienta es la excesiva pérdida de presión por fricción, a causa de sus diámetros reducidos y la influencia de su curvatura, la cual genera un efecto de flujo secundario que es causado por las fuerzas centrífugas en las paredes de la tubería. Por tal motivo, predecir el factor de fricción con exactitud, se ha convertido en un reto para la industria y en la actualidad aún no se cuenta con una correlación que lo modele con precisión.

Adicional, el tipo de fluido que circula en esta clase de tubería, influye en la variación de los factores de fricción, ya sea de característica Newtoniana o no Newtoniana.

Se realizó una revisión literaria de las correlaciones existentes para el modelamiento del factor de fricción para el cálculo de las pérdidas de presión del flujo de fluidos no Newtonianos en tuberías enrolladas, analizando la precisión y la aplicabilidad de las mismas, comparando su comportamiento con datos obtenidos en investigaciones experimentales,



arrojando que la correlación de Willingham & Shah en comparación con la de otros autores fue la que mejor se ajustó a los datos experimentales para flujo turbulento. En flujo laminar, la correlación de Mashelkar & Devarajan fue la más acertada. Además, se determinó que la curvatura incrementa el factor de fricción en comparación con tuberías rectas.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Coiled tubing has been established in recent years as a tool. One of the limitations of this tool is the prolongation of the pressure by friction, the cause of its reduced diameters and the influence of its curvature, which generates a secondary flow effect which is that of the centrifugal forces in the walls of the pipe. For this reason, predicting the friction factor with accuracy, has become a challenge for the industry and nowadays there is still no correlation between the model and accuracy. Additionally, the type of fluid that circulates in this type of pipe influences the variation of friction factors, whether Newtonian or non-Newtonian. A literary revision of the existing correlations for the moderation of the friction factor for the calculation of the pressure losses of the flow of non-Newtonian fluids in coiled tubing was carried out, analyzing the accuracy and applicability of the same, comparing their behavior with the data in experimental investigations, showing that Willingham & Shah correlation compared to that of other authors was the one that best adjusted to the experimental data for turbulent flow. In laminar flow, the Mashelkar & Devarajan correlation was the most successful. In addition, it was determined that the curvature increases the friction factor compared to straight pipes.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: ERVIN ARANDA ARANDA

Firma:

Nombre Jurado: ANDRÉS JAVIER MARÍNEZ PÉREZ

Firma:

**ESTUDIO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS EN TUBERÍAS
ENROLLADAS**

DIEGO FERNANDO ARCE PÉREZ

YULIAN ALEJANDRO CAVIEDES LOSADA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

NEIVA, 2019

**ESTUDIO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS EN TUBERÍAS
ENROLLADAS.**

DIEGO FERNANDO ARCE PÉREZ

YULIAN ALEJANDRO CAVIEDES LOSADA

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO DE PETRÓLEOS**

DIRECTOR

LUIS FERNANDO BONILLA CAMACHO

INGENIERO DE PETRÓLEOS

DOCENTE UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

NEIVA, 2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL DIRECTOR

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

Primeramente, agradecer a Dios por guiar cada proyecto emprendido, por estar presente en cada instante y etapa de mi vida

A mis padres Ferney Caviedes y Smith Losada por el apoyo incondicional, siempre inculcándome valores para ser una persona de bien y sobre todo un profesional con ética, a mi tía Marly Losada por su respaldo, por enseñarme a siempre perseverar y nunca desistir a pesar de los problemas. A mi abuela o segunda madre para mí, Teresa Romero por siempre estar ahí conmigo en mis peores y mejores momentos, por ese apoyo indiscutible sobre cualquier decisión que tome, y por todo su amor brindado.

A mis hermanos, Andrés Caviedes por ser mi compañero de vida, de estudio y por el apoyo que recibí día a día, por todos los valores que inculco en mí como la responsabilidad, seriedad, respeto. A mis dos hermanas Sonia Caviedes y Daniela Caviedes por ser un motivo de salir adelante, por incentivar a esforzarme más cada día para ser un ejemplo para ellas.

A mi compañero de tesis y amigo Diego Arce, por su compañía y apoyo durante toda la carrera, por su tiempo y esfuerzo dedicado para la terminación de este proyecto de grado y además por la amistad que se generó durante esta etapa, de igual manera a todos los compañeros de carrera.

A los profesores que aportaron todo su conocimiento y esfuerzo para la formación ética y profesional como ingeniero de petróleos.

Yulian Alejandro Caviedes Losada

Agradezco a Dios y a la Virgen por bendecirme siempre, cuidar de mí, darme la salud, permitirme gozarme la vida y otorgarme la facultad para el constante aprendizaje como persona y profesional.

A mis padres Zulma Pérez y Héctor Arce por ser el pilar fundamental, por educarme, darme los valores y principios necesarios para afrontar la vida, demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional a pesar de las vicisitudes.

A mis familiares que me apoyaron de alguna manera durante el recorrido de estos años y me dispensaron su cariño siempre.

A mi compañero y amigo Yulian Caviedes por enseñarme el valor de la amistad, del trabajo en equipo, de la sinceridad, el respeto, humildad, por el apoyo y confraternidad en estos años de crecimiento personal y profesional; también a los compañeros de formación con los que asimismo viví cientos de anécdotas y momentos gratos.

A los maestros que impartieron su conocimiento para nuestra formación integral como ingenieros de petróleos.

Diego Fernando Arce Pérez

AGRADECIMIENTOS

Sentido de gratitud a la Universidad Surcolombiana, por brindarnos el espacio de aprendizaje y menesteres para formarnos como profesionales íntegros competentes en el área de ingeniería de petróleos.

Al ingeniero Luis Fernando Bonilla por guiarnos en el proceso de elaboración del proyecto de grado, por compartir su conocimiento y dedicar parte de su tiempo para culminarlo.

Al ingeniero Alex Orozco por su constante disposición, colaboración e información suministrada para el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
1. TUBERÍA ENROLLADA.....	4
1.1. Unidad de tubería enrollada.....	6
1.2. Reseña histórica sobre la tubería enrollada.....	10
1.3. Cantidades de unidades de tubería enrollada en el mundo.....	11
1.4. Ventajas de la tubería enrollada	12
1.5. Aplicación de tubería enrollada en la industria del gas y petróleo.....	13
1.5.1. Lavado de arena y solidos	13
1.5.2. Descarga de Pozo.....	14
1.5.3. Perforación con tubería enrollada.....	15
1.5.4. Fracturamiento con tubería enrollada.....	16
1.5.5. Cementación remedial	17
1.5.6. Registros con tubería enrollada.....	18
1.5.7. Pesca con tubería enrollada	19
2. GENERALIDADES DE FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS	21
2.1. Clasificación de fluidos no Newtonianos	23
2.1.1. Fluidos independientes del tiempo	23
2.1.2. Fluidos dependientes del tiempo.....	28
2.1.3. Fluidos viscoelásticos	32
3. MODELAMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	33
3.1. Modelos independientes del tiempo	33

3.2. Modelos dependientes del tiempo	36
3.3. Modelos viscoelásticos.....	37
4. CONCEPTOS IMPLÍCITOS EN EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN	38
5. CORRELACIONES PARA DETERMINAR EL FACTOR DE FRICCIÓN PARA TUBERÍA ENROLLADA.....	45
5.1. Correlaciones para el cálculo del factor de fricción.....	45
5.1.1. Factor de fricción para fluidos no Newtonianos en flujo laminar	46
5.1.2. Factor de fricción para fluidos no Newtonianos en flujo turbulento	47
5.2. Comparación de correlaciones modeladoras del factor de fricción	50
5.2.1. Comparación de correlaciones para flujo laminar	51
5.2.2. Comparación de correlaciones para flujo turbulento	52
6. COMPARACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES DE CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN DEL POLÍMERO GUAR	54
6.1. Guar a 20 lbm/Mgal	55
6.2. Guar a 30 lbm/Mgal	63
6.3. Guar A 40 lbm/Mgal	68
6.4. Resumen de comparación de datos experimentales y correlaciones graficadas.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Unidad de tubería enrollada (Stewart & Stevenson, 2017)	6
Figura 2. Carrete de tubería enrollada (German Oilfield Equipment & Services, GOES GmbH, 2018)	7
Figura 3. Inyector (HALLIBURTON, 2016)	7
Figura 4. B.O.P (HALLIBURTON, 2008).....	8
Figura 5. Fuente de energía (HALLIBURTON, 2016)	9
Figura 6. Cabina de control (HALLIBURTON, 2016)	9
Figura 7. Unidades de coiled tubing en el mundo, 1999 - 2018. (Intervention & Coiled Tubing Association (ICoTA), 2018)	12
Figura 8. Esquema lavado de arena (Montan Valverde, 2015)	14
Figura 9. Esquema descarga de pozo (Montan Valverde, 2015)	15
Figura 10. Perforación direccional con tubería enrollada (Jereh Energy Services Corporation, 2013)	16
Figura 11. Diagrama fracturamiento con tubería enrollada (Schlumberger, 2002)	17
Figura 12. Cementación remedial (Wild Well Control, 2014).....	18
Figura 13. Registros geofísicos con tubería enrollada (Alva Ramirez, Ramirez Cortes, & Rosales Acosta, 2011).....	19
Figura 14. Diagrama de pesca con tubería enrollada (PerfoBlogger, 2015).....	20
Figura 15. Comportamiento reológico de fluidos independientes del tiempo (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 6)	24
Figura 16. Representación esquemática de fluido Pseudoplástico (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 7)	25
Figura 17. Representación esquemática del fluido Viscoplastico (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 13)	26
Figura 18. Representación esquemática del fluido (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 15)..	27
Figura 19. Comportamiento de flujo de fluidos dependientes del tiempo (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 19)	29
Figura 20. Comportamiento tixotrópico de una suspensión de lodo (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 18)	30
Figura 21. Comportamiento reopéctico de un poliéster saturado (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 21)	31
Figura 22. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado supuesto, en tubería enrollada de OD 1.5 in ($a/R = 0.016$).	51
Figura 23. Factor de fricción vs Número de Reynolds Generalizado supuesto, en tubería enrollada de OD 1.5 in ($a/R = 0.016$).	52
Figura 24. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in, 1.5 in y 2.375 in, para guar a 20 lbm/Mgal a 1000 ft.	55
Figura 25. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 3000 ft para guar a 40 lbm/Mgal a 1 in, 1.5 in y 2.375 in.	56

Figura 26. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in para guar a 20 lbm/Mgal a 1000 ft, 2000 ft y 3000 ft. ($a/R = 0.016$).....	57
Figura 27. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 1500 ft de 1 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0112$).....	58
Figura 28. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0160$).....	59
Figura 29. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0187$).	60
Figura 30. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0187$).....	62
Figura 31. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in a 1500 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen turbulento ($a/R = 0.01125$).....	63
Figura 32. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1.5 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen Laminar ($a/R = 0.0164$).....	64
Figura 33. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1.5 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen Turbulento ($a/R = 0.0164$).	65
Figura 34. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 2.375 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen laminar ($a/R = 0.0187$).	66
Figura 35. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 2.375 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen turbulento ($a/R = 0.0187$).....	67
Figura 36. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 1500 ft de 1 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0109$).....	68
Figura 37. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0160$).	69
Figura 38. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0160$).....	70
Figura 39. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0187$).	71
Figura 40. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0187$).....	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sustancias comunes con flujo no Newtoniano.....	22
Tabla 2. Datos de n y K para guar de concentración de 20 lbm/Mgal.....	41
Tabla 3. Datos de n y K para guar de concentración de 30 lbm/Mgal.....	41
Tabla 4. Datos de n y K para guar de concentración de 40 lbm/Mgal.....	42
Tabla 5. Parámetros para la correlación de Mashelkar & Devarajan.....	48
Tabla 6. Dimensiones de carretes de tubería enrollada.....	51
Tabla 7. Comparación de data experimental y mejores correlaciones modeladoras	74

INTRODUCCIÓN

Actualmente los fluidos no Newtonianos son unos de los fluidos más utilizados en la industria debido a sus características únicas que permite desarrollar de manera más eficiente diversas operaciones de campo. A pesar de esto, es un fluido muy poco estudiado debido a su compleja reología que complica su modelamiento.

Cuando hablamos de fluidos en la industria petrolera, implícitamente se relaciona con actividades de bombeo del mismo a través de tuberías. Al fluir por medio de la tubería se generan caídas de presión por fricción. Hoy por hoy calcular dichas caídas de presión se ha convertido en un reto para las nuevas generaciones en su búsqueda constante por hallar correlaciones que permitan modelar el valor real de las pérdidas de presión por fricción.

En la última década la tubería flexible ha ganado un lugar importante en la industria petrolera incrementando cada vez más su uso en diversas operaciones de campo tales como perforación, completamiento, limpiezas de pozos, fracturamiento etc., no obstante, relacionar el bombeo de fluidos no Newtonianos a través de la tubería flexible, ha sido un reto aún mayor debido a un factor adicional que agrega la tubería enrollada que es la curvatura. Este factor modifica el régimen de flujo de cualquier fluido comparado con la tubería convencional, es por esto que para cálculos del flujo de fluidos no Newtonianos se han implementado nuevas ecuaciones que asocian dicha curvatura. De igual manera, modelar las pérdidas de presión por fricción en tubería flexible ha sido un constante desafío para los recientes investigadores, actualmente son muy pocas las correlaciones modeladoras del factor de fricción.

RESUMEN

La tubería enrollada se ha establecido en los últimos años como una de las herramientas más utilizadas en la industria debido a su amplia variedad de usos. Una de las limitantes de esta herramienta es la excesiva pérdida de presión por fricción, a causa de sus diámetros reducidos y la influencia de su curvatura, la cual genera un efecto de flujo secundario que es causado por las fuerzas centrífugas en las paredes de la tubería. Por tal motivo, predecir el factor de fricción con exactitud, se ha convertido en un reto para la industria y en la actualidad aún no se cuenta con una correlación que lo modele con precisión.

Adicional, el tipo de fluido que circula en esta clase de tubería, influye en la variación de los factores de fricción, ya sea de característica Newtoniana o no Newtoniana.

Se realizó una revisión literaria de las correlaciones existentes para el modelamiento del factor de fricción para el cálculo de las pérdidas de presión del flujo de fluidos no Newtonianos en tuberías enrolladas, analizando la precisión y la aplicabilidad de las mismas, comparando su comportamiento con datos obtenidos en investigaciones experimentales.

ABSTRACT

Coiled tubing has been established in recent years as a tool. One of the limitations of this tool is the prolongation of the pressure by friction, the cause of its reduced diameters and the influence of its curvature, which generates a secondary flow effect which is that of the centrifugal forces in the walls of the pipe. For this reason, predicting the friction factor with accuracy, has become a challenge for the industry and nowadays there is still no correlation between the model and accuracy.

Additionally, the type of fluid that circulates in this type of pipe influences the variation of friction factors, whether Newtonian or non-Newtonian.

A literary revision of the existing correlations for the moderation of the friction factor for the calculation of the pressure losses of the flow of non-Newtonian fluids in coiled tubing was carried out, analyzing the accuracy and applicability of the same, comparing their behavior with the data in experimental investigations.

1. TUBERÍA ENROLLADA

La tubería enrollada o coiled tubing es una de las herramientas hoy por hoy más utilizada en la industria del petróleo, que va en crecimiento continuo en cuanto a su uso y avances tecnológicos que proveen un mejor servicio para la industria.

Actualmente, la tubería enrollada es popular debido a su versatilidad en desarrollo de operaciones de campo, brindando una amplia cobertura de servicios de manera eficiente, operaciones tales como perforación, completamiento, estimulación, limpieza de pozo, entre otros. Debido a que se trata de una tubería continua, permite que se pueda correr dentro de un pozo mucho más rápido que la tubería convencional, conllevando a la optimización de tiempo, que en otras palabras es reducir costos de operación; adicionalmente, el fluido puede circular mientras el tubo se está insertando en el pozo, permitiendo así, la intervención a un pozo presurizado sin necesidad de matar el pozo evitando daños al reservorio.

Unos de los trabajos más comunes de tan multifacética herramienta es la limpieza de pozo, a pesar que es considerada como una de las operaciones más sencillas, representa más de tres cuartos de los ingresos generados por trabajos de la tubería flexible. En los últimos años, las operaciones de perforación y fracturamiento han crecido de manera espontánea, en la reciente década surtió un aumento de un 0% a un 15% aproximadamente (Zhou Y. , 2006). De igual manera, los beneficios son significativos en estas operaciones, por ejemplo, en un procedimiento de fractura, un aproximado de 20 intervalos pueden ser fracturados por día.

En vista de las diversas aplicaciones de la tubería flexible, se observa que en todas las operaciones se involucra el bombeo de fluidos, en la mayoría de casos la excesiva pérdida de presión por fricción hace que esta herramienta sea limitada en aplicaciones de tubería enrollada. Estas altas

pérdidas de presión por fricción se deben a los pequeños diámetros y la curvatura de la tubería enrollada. Estos diámetros reducidos son necesarios para permitir que la tubería se enrolle en el carrete y evitar tensiones excesivas; por lo general, los diámetros más utilizados de tubería enrollada son de 1-1/2 in y 2-3/8 in, que comparados con la tubería convencional son muchos más pequeños. Cuando un fluido pasa a través de tuberías de bajos rangos de diámetro, allí ocurre un flujo secundario debido al efecto de las fuerzas centrifugas que generan una resistencia adicional al flujo.

El efecto de la curvatura de la tubería enrollada es más pronunciado aún con el flujo de fluidos no Newtonianos debido su compleja reología, estos fluidos son muy utilizados actualmente en operaciones como perforación, completamiento o fractura. La diferencia del factor de fricción de estos fluidos entre la tubería enrollada y la tubería convencional, se estima que es de un 185% (Zhou Y. , 2006). Predecir con exactitud dichas pérdidas de presión por fricción ha sido un reto para los ingenieros de diseño de operaciones de tubería flexible; los software actuales son inexactos a la hora de predecir dichas pérdidas de fricción, es por esto que los ingenieros deben confiar en la experiencia y agregar algunos factores de corrección a las predicciones del software.

1.1. Unidad de tubería enrollada

La tubería enrollada es un tubular continuo fabricado en longitudes necesarias o requeridas para ser adaptada en el carrete durante el proceso de fabricación. En la aplicación de trabajos con tubería enrollada, la tubería se endereza mientras va entrando al pozo, y al extraerla es enrollada nuevamente una vez la operación haya finalizado. Una de las principales ventajas que tiene la tubería enrollada sobre la tubería convencional, es que el tubo es continuo y no tiene conexiones, optimizando así el tiempo en las operaciones. Para correr la tubería flexible dentro del pozo o retirarla después de la operación, se cuenta con una configuración que será mostrada a continuación.



Figura 1. Unidad de tubería enrollada (Stewart & Stevenson, 2017)

- **Carrete de tubería**



Figura 2. Carrete de tubería enrollada (*German Oilfield Equipment & Services, GOES GmbH, 2018*)

El carrete es un dispositivo útil para el almacenamiento y transporte de la tubería flexible, la capacidad del carrete depende del diámetro de la tubería y el diámetro del núcleo. Las máximas longitudes de tubería enrollada alcanzan los 33.000 ft.

- **Inyector de tubería enrollada**



Figura 3. Inyector (*HALLIBURTON, 2016*)

El inyector es una herramienta la cual permite la movilidad de la tubería flexible, generando una fuerza sobre el tubo que además de permitir la inserción del mismo gradualmente al pozo, también permite regular la velocidad de corrida y a su vez soportar el peso de la tubería flexible en suspensión cada vez que se corre.

- **B.O.P. (Preventor de Reventones)**

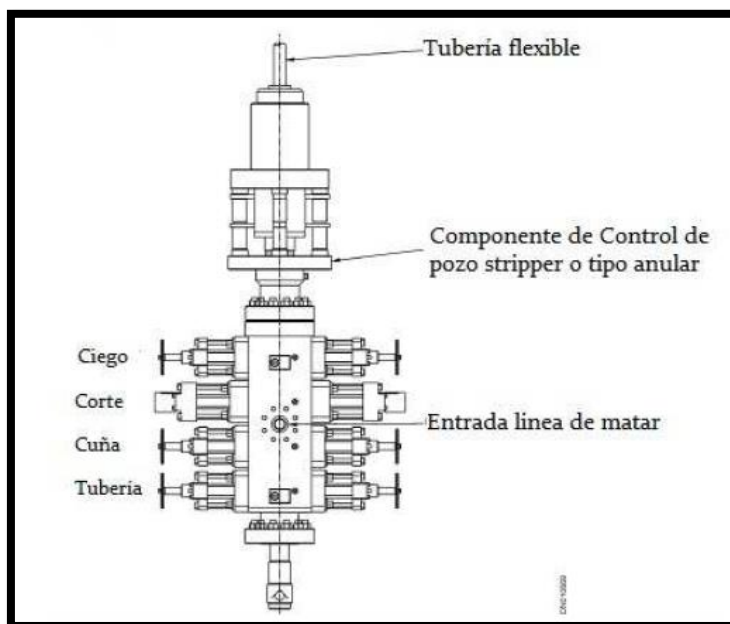


Figura 4. B.O.P (HALLIBURTON, 2008)

Las B.O.P. o preventor de reventones, consisten en un conjunto de arietes operados hidráulicamente para proveer un control de presión al pozo en caso de ocurrir un evento de patada de pozo o un influjo hacia superficie.

- **Fuente de energía**



Figura 5. Fuente de energía (HALLIBURTON, 2016)

La fuente de energía o power pack es una unidad usada para generar potencia hidráulica y neumática requerida para operar la unidad de tubería flexible o coiled tubing.

- **Cabina de control**



Figura 6. Cabina de control (HALLIBURTON, 2016)

La cabina incluye todos los controles y calibradores para el operador de la unidad de tubería enrollada, para modelamiento de trabajos, monitoreo de operaciones en tiempo real y para operar o controlar los componentes de la unidad. Algunas de los datos que podemos observar en la cabina son:

- Presión del extractor (Stripper)
- Presión en el acumulador B.O.P.
- Presión del inyector
- Presión en cabeza de pozo
- Presión de los fluidos de bombeo
- Profundidad y velocidad de la tubería
- Peso de la tubería

1.2. Reseña histórica sobre la tubería enrollada

El desarrollo de la tubería flexible inició en el año 1944 en la segunda guerra mundial con el proyecto llamado PLUTO “Pipe Line Under The Ocean” / “Línea de tubería bajo el océano”, producida y desarrollada por ingenieros británicos con el fin de suministrar el combustible al ejercito aliado desde Inglaterra hacia el continente europeo. Esta operación involucró la fabricación y el tendido de cierto número de tubería a través del canal de la Mancha que separa el Reino unido y Francia. La fabricación y enrollamiento exitoso de la tubería flexible fue la base de la cual se fundamentó el desarrollo de lo que actualmente se conoce como coiled tubing o tubería enrollada.

En el año de 1962 Bowen Tools y California Oil Company desarrollaron la primera unidad completamente funcional de tubería flexible, con el propósito inicial de lavar la arena de los pozos

y ejecutar servicios con nitrógeno. Luego, en pro de la mejora de esta herramienta, Bowen y Brown Oil Tools continuaron desarrollando sus diseños con el fin de acomodar la tubería enrollada hasta 1 pulgada de diámetro externo. Ya a finales de la década de los 70 más de 200 unidades de diseño original estaban en servicio. Empresas como Otis Engineering, Inc. Hydra Rig, y Uni-Flex Inc, comenzaron a influir en la mejora del servicio del coiled tubing, optimizando el diseño de la cabeza de los inyectores.

Para esta época, la fabricación de diversas longitudes y diámetros de la tubería enrollada fueron limitados por las propiedades mecánicas y los procesos de fabricación disponibles para dicha época, sin embargo, al pasar del tiempo estas limitantes fueron desvaneciendo debido a las necesidades que la industria requería para las nuevas aplicaciones del mercado.

Actualmente hay muchos fabricantes de tubería enrollada a nivel mundial, de los cuales se destacan “Quality Tubing, Inc.” (QTI), “Precision Tube Technology” (PTT), “Tenaris”, “IESV”, entre otras; estas empresas se han encargado del progreso tecnológico para hacer de la tubería enrollada una herramienta de solución aún más atractiva para diversas aplicaciones.

1.3. Cantidades de unidades de tubería enrollada en el mundo

El uso del coiled tubing se ha extendido por todo el mundo debido a sus ventajas desde cualquier punto de vista y amplia oferta de servicios de pozos. Por lo anterior se ha realizado por parte de ICOTA que es la Asociación Internacional de Intervención de Pozos y Coiled Tubing la cual es una organización sin fines de lucro, afiliada a la “SPE” que, con el asocio de compañías prestadoras de servicios y operadores a nivel mundial, han creado una fuente de información del uso de este tipo de herramienta. La asociación advierte que los números finales pueden o no incluir unidades estacionadas o apiladas.

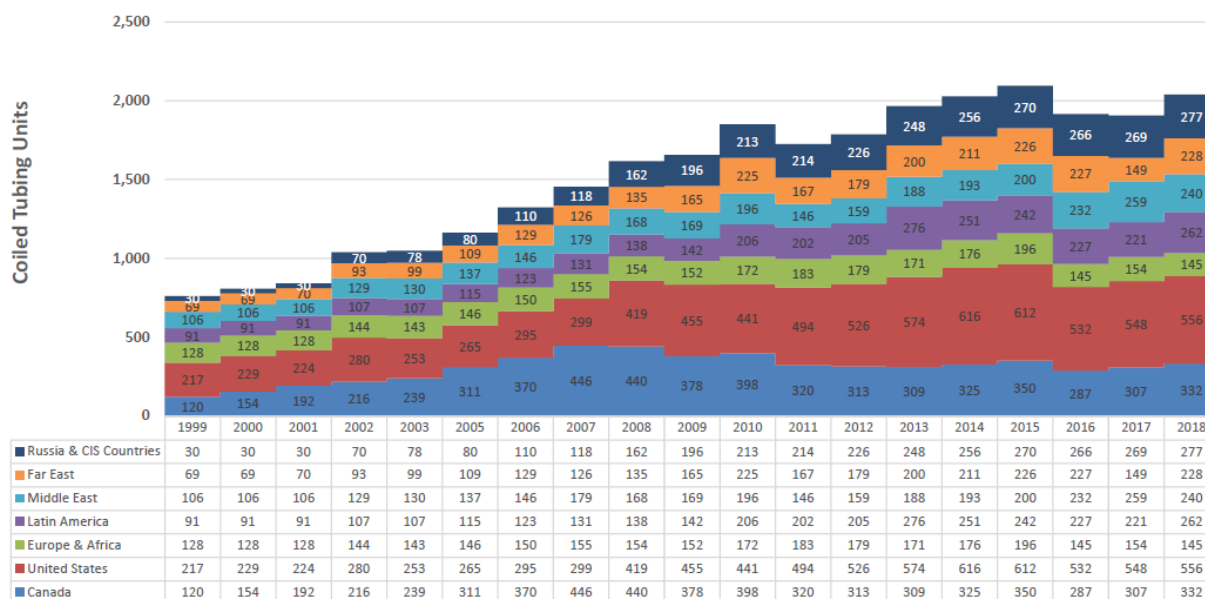


Figura 7. Unidades de coiled tubing en el mundo, 1999 - 2018. (*Intervention & Coiled Tubing Association (ICoTA), 2018*)

1.4. Ventajas de la tubería enrollada

Comparada con la tubería recta convencional, la tubería enrollada tiene muchas ventajas. Primero, se puede correr o retirar del hueco más fácil y rápidamente, esto ahorra mucho tiempo a los trabajadores y además resulta un gran ahorro de costo operacional. Segundo, cuando lo comparamos con el equipo de mantenimiento de pozo, la unidad de coiled tubing resulta ser más liviana y fácil de transportar o mover. Tercero, la capacidad de la tubería enrollada de circular fluidos, permite su uso en muchas operaciones de mantenimiento de pozos, como la descarga o lavado de arena. Además, el material de fabricación tiene una resistencia a la tracción mucho mayor que la del wireline y puede reemplazarla en ciertas operaciones.

A continuación, una breve lista de algunas ventajas del uso de la tubería enrollada:

- Tiempo de corrida más rápido
- Rapidez operativa y de movilización

- Reducción de costos de operación
- Trabajos sin necesidad de ahogo de pozo
- Medio ambiente y seguridad
- Bajo impacto sobre el terreno
- Disminución en el impacto audio-visual
- Más efectivo en el posicionamiento de herramientas en pozos horizontales
- Permite circular fluidos mientras se extrae o se introduce tubería
- Uso de menos personal

1.5. Aplicación de tubería enrollada en la industria del gas y petróleo

Habitualmente, esta herramienta es usada para limpieza de pozo, descargar el pozo, estimulaciones (matricial o acidas), cementación remedial, asistir a operaciones de registros y perforación, pesca de herramientas, sistema de levantamiento de gas y otros. Si bien la aplicación de servicio de mantenimiento de pozo aún cuenta con un 75% de uso de coiled tubing según Intervention & Coiled Tubing Association (ICoTA) (2018), los avances técnicos han incrementado el uso del coiled tubing en operaciones de perforación y completamiento. Hace una década las técnicas de perforación y fracturamiento con unidades de tubería enrollada eran prácticamente desconocidas, ahora representan cerca del 15% de los ingresos.

1.5.1. Lavado de arena y solidos

Una de las principales aplicaciones del coiled tubing, es la remoción o llenado de arena al pozo. La operación consiste en bombear fluido a través de la tubería y a presión remover la arena en la cara de la formación por medio de las boquillas del ensamblaje, una vez la arena se libera, se circula por anular para poder remover o sacar esos recortes de arena a superficie.

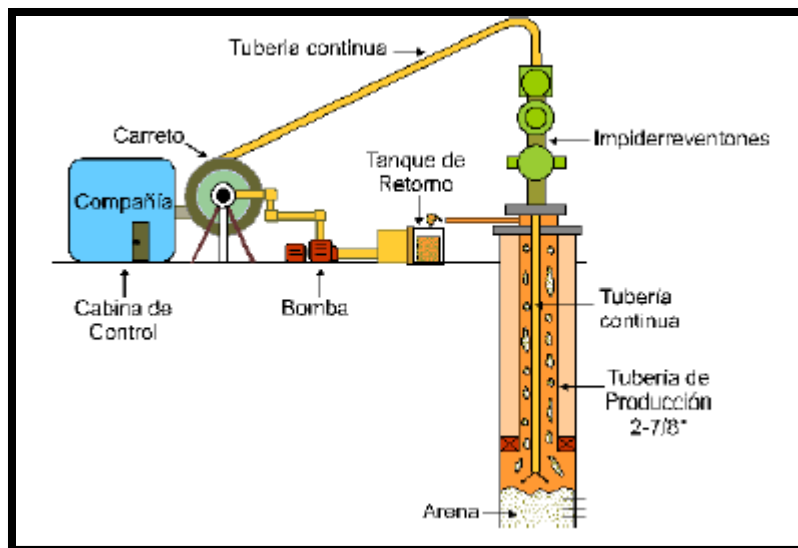


Figura 8. Esquema lavado de arena (Montan Valverde, 2015)

1.5.2. Descarga de Pozo

Usar el coiled tubing para descargar con nitrógeno es un método rápido y económico para recuperar la producción continua de pozos con problemas de cargas líquidas. Muchos pozos detienen su producción debido a la sobrecarga de presión hidrostática que previene que los fluidos de reservorios fluyan normalmente al pozo. Esta carga líquida puede ser generada por los fluidos utilizados en trabajos de mantenimiento al pozo o también fluidos provenientes del yacimiento, como la acumulación de agua en pozos de gas de baja presión. En estos casos un fluido liviano como el nitrógeno (N_2) se usa para aliviar fluidos con cargas.

El principio de trabajo de descarga de pozo es el mismo de levantamiento de Gas. Una de las ventajas sobre el modelo comparado es que el coiled tubing permite circular el nitrógeno a diferentes profundidades para tener una mejor y eficiente descarga, además se puede hacer de manera rápida ya que la velocidad de corrida de la tubería curva, oscila de 100 ft/min a 200 ft/min. Para pozos fracturados hidráulicamente, se posiciona en la cara de fractura con el fin de levantar

fluidos remanentes y limpiar de arena o sólidos en la cara de la formación usando nitrógeno, dejándola limpia y óptima para su función.

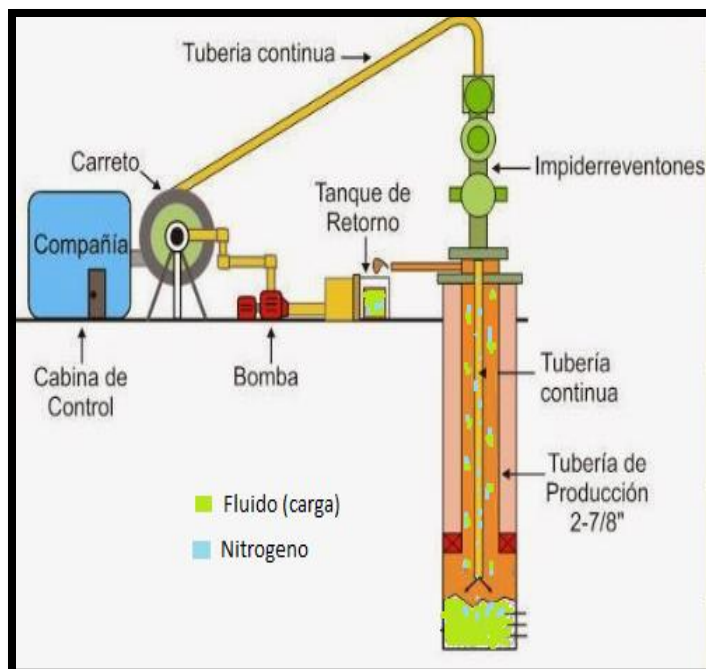


Figura 9. Esquema descarga de pozo (Montan Valverde, 2015)

1.5.3. Perforación con tubería enrollada

La perforación con tubería curva se puede dividir en dos grandes grupos: perforación direccional y no direccional.

La perforación no direccional utiliza un ensamble bastante convencional junto a un motor de fondo. Además, requiere el uso de un dispositivo de orientación para dirigir la trayectoria del pozo.

Este método se ha vuelto muy efectivo, ya que permite terminar pozos de manera muy rápida. Día a día se van implementando nuevas mejoras para hacer de esta técnica la más óptima en todos los casos de perforación.

La aplicación de la tubería curva direccional, es especialmente atractiva para perforaciones de pozos someros de gas en Canadá, ya que lo hace más eficiente y económico frente a equipos convencionales. Canadá cuenta con cerca del 90% de unidades de coiled tubing direccional de todo el mundo (Snyder, 2005).

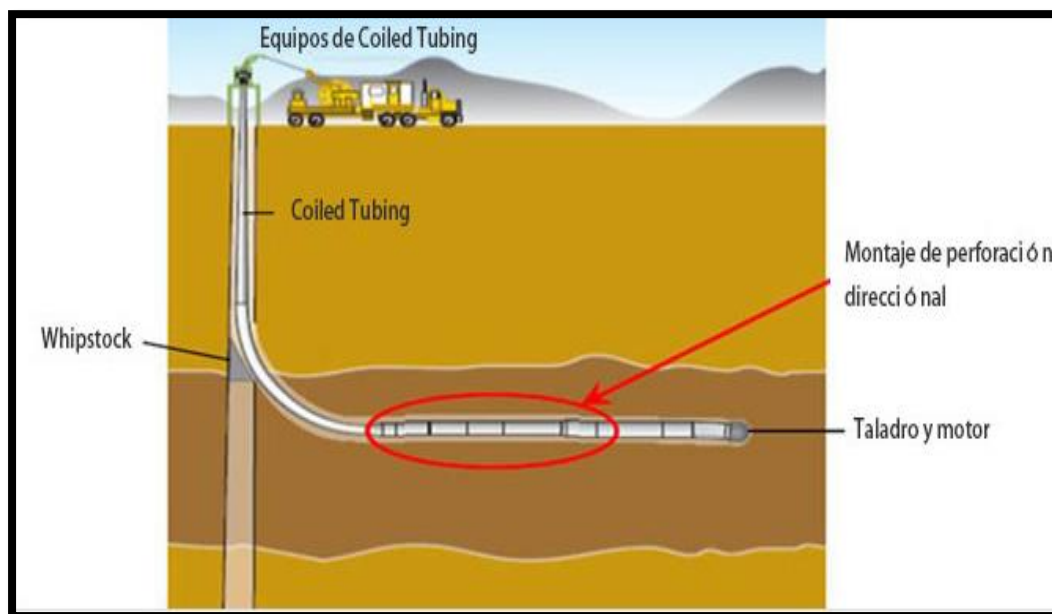


Figura 10. Perforación direccional con tubería enrollada (*Jereh Energy Services Corporation, 2013*)

1.5.4. Fracturamiento con tubería enrollada

El fracturamiento hidráulico con tubería enrollada se ha convertido en una técnica efectiva de estimulación para varias zonas de un pozo de gas o petróleo.

La tubería curva, en comparación con la tubería convencional, para fracturamiento hidráulico tiene varias ventajas. En particular, provee la habilidad de moverse rápidamente en el pozo (o reposicionarse rápidamente) cuando se tienen varios intervalos en un mismo pozo. Debido a la tubería continua, también mejora la conductividad del yacimiento haciendo que el fluido llegue de una manera más directa frente a los perforados, esto reduce problemas de entrada a la fractura y proporciona bajo retorno de agente sostén. Una vez el fracturamiento ha finalizado, se procede a

lavar la arena si es necesario o adecuar el pozo para dejarlo en producción sin necesidad de desplazar la tubería curvada, generando ahorros significativos de tiempo.

1.5.5. Cementación remedial

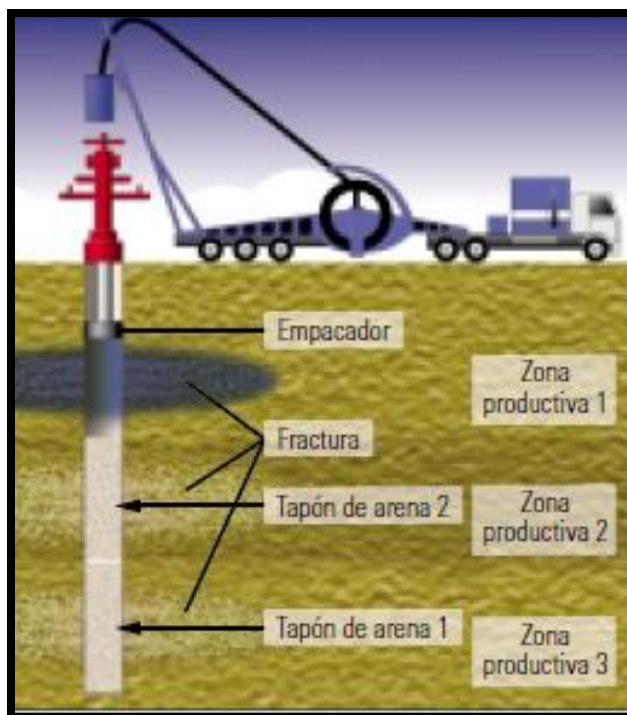


Figura 11. Diagrama fracturamiento con tubería enrollada (Schlumberger, 2002)

Actualmente, realizar una cementación remedial o Squeeze por medio de tubería enrollada, ha sido una mejora notable para la industria debido a su practicidad, permitiendo ejecutar el trabajo sin necesidad de un equipo de mantenimiento de pozo (Workover), optimizando la economía de este tipo de operaciones.

El procedimiento de squeeze en tubería enrollada puede llevarse a cabo aproximadamente con un 25% del costo de una operación realizada con un equipo de mantenimiento de pozo de cementación remedial convencional, generando un ahorro considerable.



Figura 12. Cementación remedial (*Wild Well Control, 2014*)

1.5.6. Registros con tubería enrollada

Este procedimiento realizado con tubería enrollada, provee una ventaja económica cuando se necesita tomar un registro durante operaciones de mantenimiento de pozo, además, facilita el registro en condiciones hostiles del pozo, como por ejemplo en hueco abierto, pozos altamente desviados, pozos inestables donde se necesita circular durante la toma del registro. También permite el control del pozo mientras se ejecuta esta operación.

A continuación, algunas aplicaciones potenciales de registros con tubería flexible:

- Permite instalar un medidor de flujo junto con el empaque, para controlar sistemáticamente la rata de flujo para medir con más exactitud los perfiles.
- La mayor parte del tiempo, reduce la presión del pozo bombeando permanentemente nitrógeno durante operaciones de mantenimiento de pozo, para evitar daños a la formación.
- En algunas medidas de registro, permite monitorear la temperatura en tiempo real mientras se inyecta un fluido al pozo.

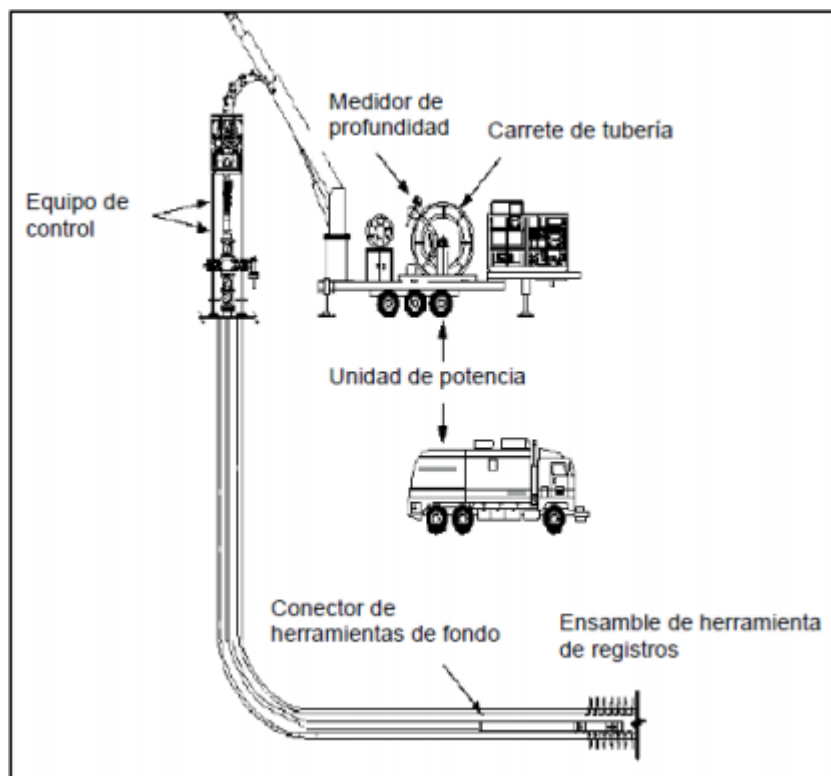


Figura 13. Registros geofísicos con tubería enrollada (Alva Ramirez, Ramirez Cortes, & Rosales Acosta, 2011)

1.5.7. Pesca con tubería enrollada

En operaciones de pescas, se tienen muchas ventajas frente a las unidades de slickline, una de las principales, es el soporte de altos esfuerzos de tensiones dando una mayor garantía del procedimiento y seguridad para cada operación, es la única que tiene la capacidad de circular mientras se corre, esto con el fin de lavar con fluidos tales como N_2 o ácidos permitiendo remover

arenas, lodo, retorta, etc., que estén en la punta del objeto de pesca, facilitando el procedimiento cuando esto se presenta.

Las operaciones de pesca con tubería flexible son especialmente usadas en pozos altamente desviados u horizontales. También permite sacudir o halar el objeto de pesca que sea demasiado pesado para el slickline.

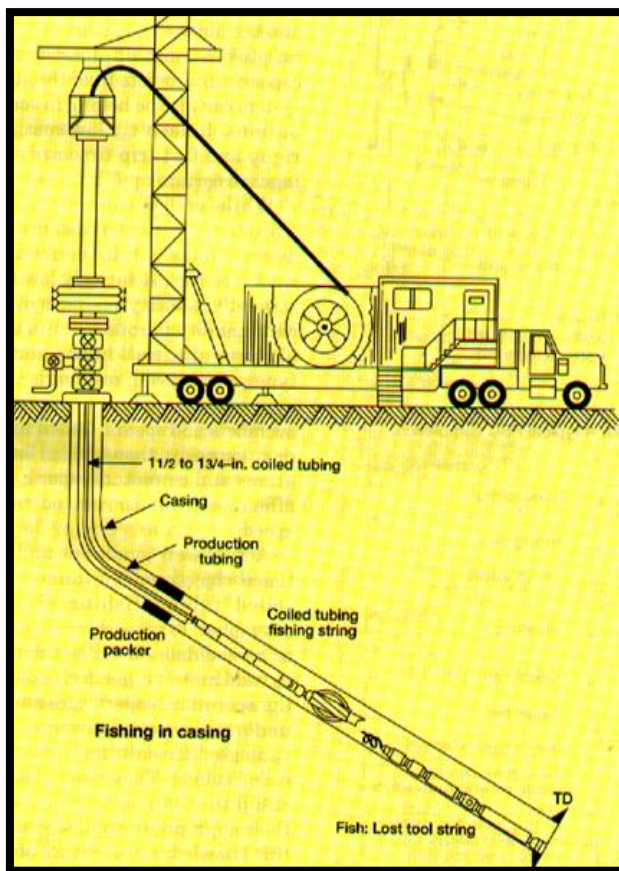


Figura 14. Diagrama de pesca con tubería enrollada (PerfoBlogger, 2015)

2. GENERALIDADES DE FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS

Un fluido en esencia es un conjunto de partículas unidas por fuerzas débiles que definen la constitución simple de líquido o gas que, por ello, tiene la propiedad de fluir bajo el efecto de alguna fuerza que hace que sus constituyentes moleculares cambien de posición produciendo una característica típica de ellas.

Para caracterizar esta propiedad los fluidos se han clasificado de dos formas principalmente, partiendo de la ley de viscosidad propuesta por Isaac Newton la cual define el módulo de rigidez de un fluido a la constante de proporcionalidad, que surge relacionando el esfuerzo de corte y la tasa de corte, cuyo valor no varía con el tiempo. Los fluidos que se acogen a este modelo se denominan Newtonianos y se representa con la siguiente ecuación.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Por otra parte, los fluidos que no se acogen a este concepto se denominan fluidos no Newtonianos los cuales son objeto de estudio en este trabajo. Estos fluidos poseen comportamientos reológicos especiales, lo cual requiere de correlaciones más complejas para modelar su flujo. Para caracterizarlos, se han planteado algunos modelos para simular de acuerdo a su tendencia y a la dependencia del tiempo, la deformación de los fluidos al ser sometidos a esfuerzos, tales como modelo plástico de Bingham, modelo de Ostwald de Waele o ley de la potencia, modelo de Carreau, Cross, Ellis, Herschel-Bulkley, Casson, Maxwell, entre otros.

Los modelos mencionados en el párrafo anterior, logran predecir un patrón de comportamiento de acuerdo a parámetros intrínsecos de la reología de un fluido, obtenidos experimentalmente y de acuerdo al que mejor modele el comportamiento del fluido, se caracterizará según su autor. Estos modelos están en constante desarrollo principalmente el de la ley de potencia y el modelo plástico

de Bingham, ya que son los de mayor interés debido a sus aproximaciones acertadas con los fluidos empleados en la industria del petróleo, ya sea desde la perforación hasta la producción, transporte y por supuesto trabajos a posteriori para mejoras en la productividad.

Los reogramas de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, tienen una distinción clara debido a la naturaleza de flujo de cada modelo. Si el fluido es Newtoniano, al graficar el esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación en coordenadas cartesianas, se va a obtener una recta que pasará por el origen, debido a la proporcionalidad que es constante y se denomina viscosidad, como ya se mencionó. Lo contrario, se trataría de un fluido no Newtoniano como se mencionó al inicio de esta unidad, por lo cual no hay una constante de proporcionalidad fija y esta es denominada viscosidad aparente. Su valor debe estar ligado a temperatura, presión y a la tasa de corte que fue medida o evaluada y se expresa de la manera siguiente:

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} \quad (2.2)$$

Como ejemplo, en la tabla 1 se muestran algunos materiales que tienen comportamiento de flujo no Newtoniano en la vida cotidiana y en entornos industriales.

Tabla 1. *Sustancias comunes con flujo no Newtoniano*

<ul style="list-style-type: none"> • Colbón • Lodos de perforación 	<ul style="list-style-type: none"> • Derivados lácteos (queso crema, mantequilla, yogures, suero.)
<ul style="list-style-type: none"> • Lodos de residuos animales 	<ul style="list-style-type: none"> • Bitumen
<ul style="list-style-type: none"> • Fluidos biológicos (sangre, saliva, fluido sinovial, fluido seminal, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cosméticos y productos para el cuidado personal (esmaltes, cremas, labiales, champús, dentífrico, etc.)
<ul style="list-style-type: none"> • Espumas contra incendios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arena mojada de playa
<ul style="list-style-type: none"> • Grasas y aceites lubricantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentos (purés, salsas, mermeladas, sopas, clara de huevo, masas de pan, etc.)

Fuente: Adaptado de R. P. Chhabra (Ed.). (2008). *Non Newtonian and applies rheology* (p. 5). EEUU, Burlington: Editorial Macmillan Company.

2.1. Clasificación de fluidos no Newtonianos

Los fluidos no Newtonianos presentan comportamientos variados que hacen necesario agruparlos de tres maneras de acuerdo a sus características de flujo y su complejidad.

1. Los fluidos en el que el valor de esfuerzo de corte está en función de la tasa de corte o viceversa, en un punto y un momento determinado, por ello son llamados independientes del tiempo.
2. Aquellos fluidos en los que la relación entre esfuerzo de corte y tasa de corte dependen adicionalmente del tiempo de aplicación de la tasa de corte, denominándose dependientes del tiempo.
3. Por ultimo aquellos materiales líquidos que presentan comportamiento de fluidos ideales (estacionario, incompresible...) Y solidos elásticos a la vez, que al deformarse presentan cierta recuperación, denominados viscoelásticos.

La anterior agrupación tiene sub grupos en cada ítem que se mostrarán a continuación en la descripción de cada una, pero se hace hincapié en que muchos fluidos pueden tener combinación de algunas de los tres grupos mencionados, pero se caracterizarán de acuerdo a la característica más predominante y se tomará como base para los cálculos necesarios.

2.1.1. Fluidos independientes del tiempo

La relación que describe este comportamiento se define

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2.3)$$

O de manera contraria,

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (2.4)$$

Se denota que cualquier valor de tasa de corte se define únicamente por el valor de la tensión de corte en ese punto y en ese instante, a unas condiciones de presión y temperatura dadas. Dependiendo de la forma de la función en la ecuación anterior los fluidos se pueden clasificar en tres sub grupos:

1. Pseudoplásticos
2. Viscoplasticos
3. Dilatantes

Cualitativamente se plasma en la figura 15 el comportamiento reológico de cada uno de las clases de fluidos con independencia del tiempo, relacionándolos con el comportamiento lineal de un fluido Newtoniano típico.

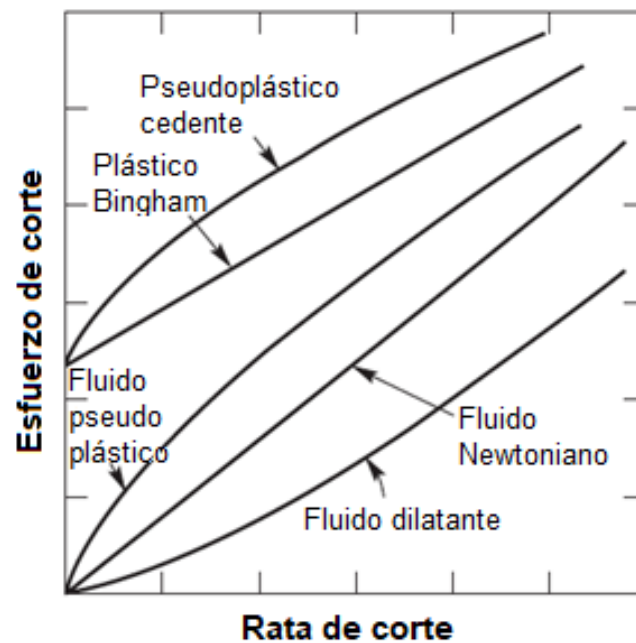


Figura 15. Comportamiento reológico de fluidos independientes del tiempo
(Chhabra & Richardson, 2008, pág. 6)

2.1.1.1. Fluido pseudoplástico

Un fluido pseudoplástico se caracteriza por tener una tendencia adelgazante a medida que se aumenta la rata de corte. La mayoría de los polímeros o fluidos de este tipo presentan comportamiento Newtoniano a muy alta y muy baja velocidad de corte. Este tipo de fluido es el más común de los fluidos no Newtonianos con independencia del tiempo.

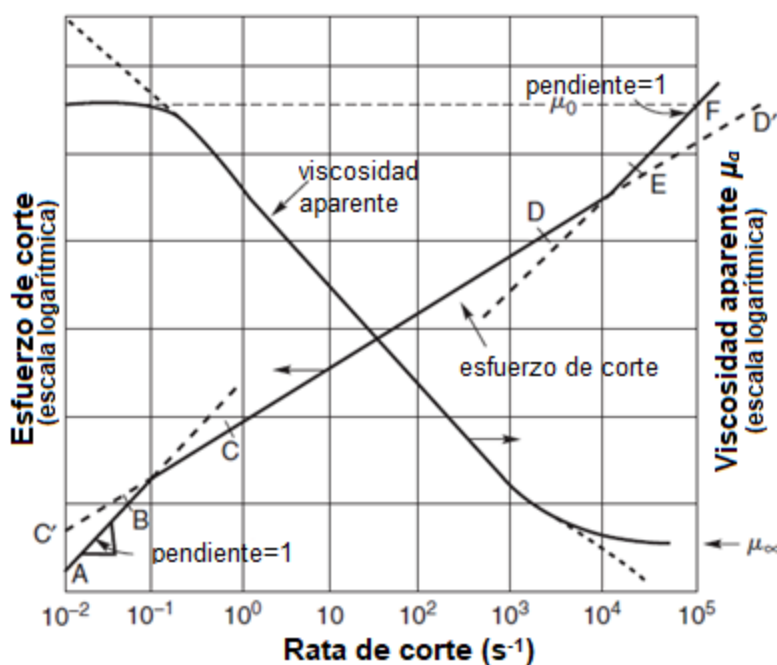


Figura 16. Representación esquemática de fluido Pseudoplástico (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 7)

En figura 16, se observa el comportamiento de la viscosidad aparente a medida que la velocidad de corte aumenta, su viscosidad aumentará a medida que la rata de corte disminuye teniendo dos picos de estabilidad denominados μ_0 el cual resulta cuando se tiene una rata de corte muy baja y μ_∞ cuando se alcanza una rata de corte alta. Los valores de velocidad de corte que denotan el inicio de las viscosidades limitantes superior e inferior dependen de varios factores, como el tipo y la concentración del polímero, su distribución del peso molecular y la naturaleza del solvente, etc.

2.1.1.2. Fluido viscoplástico

Este tipo de material se distingue debido a que presenta un punto de cedencia o yield stress (τ_0) el cual debe ser sobrepasado para que este comience a fluir, de lo contrario solo sufrirá una deformación elástica si el esfuerzo aplicado no excede el valor de esfuerzo mínimo. Estos fluidos también muestran que la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de corte. A velocidades de corte muy bajas, la viscosidad aparente es infinita justo antes de que la sustancia cede y comienza a fluir. Por lo tanto, es posible considerar que estos materiales poseen una clase particular de comportamiento de adelgazamiento por corte. Ejemplos de fluidos que exhiben este comportamiento son emulsiones, productos alimenticios, sangre y lodos de perforación.

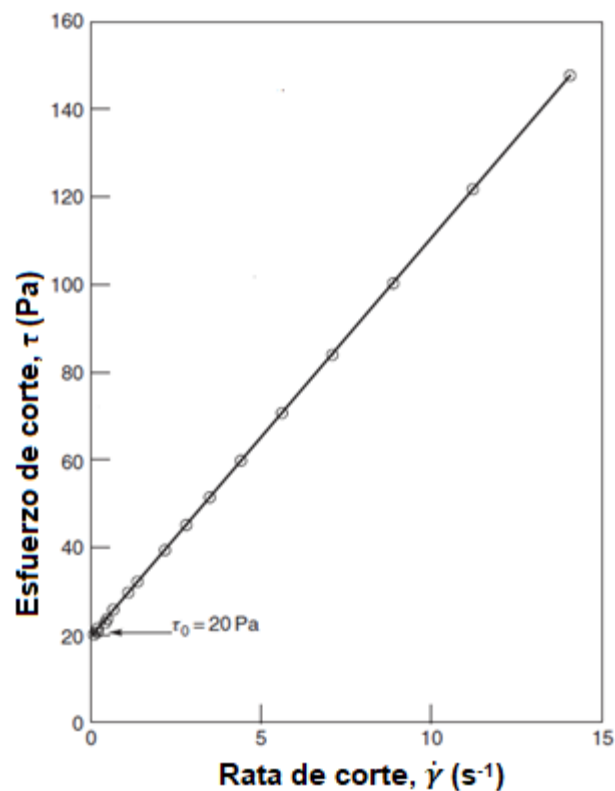


Figura 17. Representación esquemática del fluido Viscoplastico (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 13)

En la figura 17 se muestra la tendencia de un fluido viscoplástico, iniciando a fluir con un umbral de esfuerzo de 20 Pascales.

2.1.1.3. Fluido dilatante

Estos fluidos exponen un comportamiento de engrosamiento a medida que aumenta la rata de corte, es decir que aumenta su viscosidad aparente, pero sin presentar un esfuerzo de cedencia. Se observó inicialmente en fluidos con alta concentración de partículas en suspensión y su singular comportamiento según la literatura, se explica este fenómeno en función de la rapidez de deformación, cuando está en reposo el fluido el vacío es mínimo en su estructura. A medida que se eleva la velocidad de corte de la mezcla, la parte líquida lubrica cada partícula sólida en suspensión y por ende el esfuerzo resultante es pequeño. Sin embargo, cuando las ratas de corte son altas el fluido se expande y se aumenta el espacio vacío lo cual se vuelve insuficiente el líquido para llenar dichos espacios, aumentando la fricción de sus partículas sólidas reflejándose en mayores esfuerzos de corte.

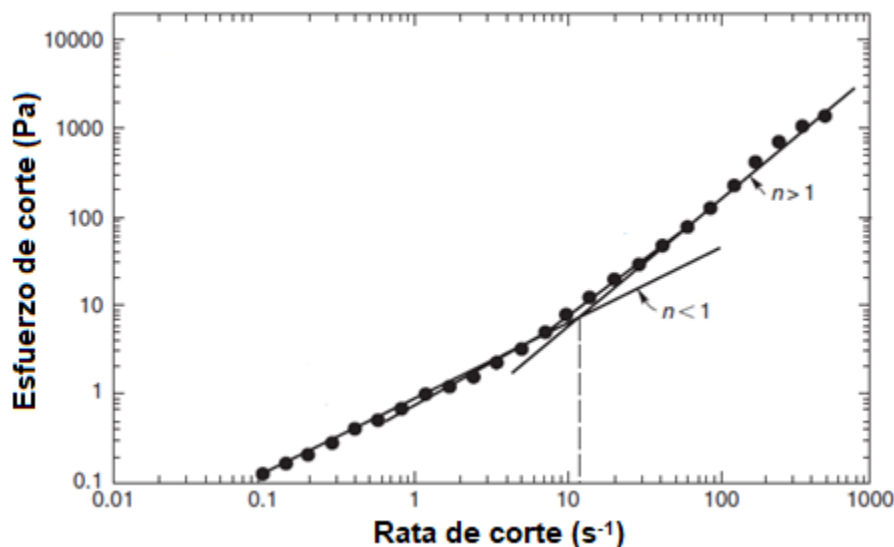


Figura 18. Representación esquemática del fluido (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 15)

La curva de flujo que describe un comportamiento típico de este fluido se observa en la figura 18, donde se marcan dos líneas de tendencias con un índice de flujo (n) menor a uno (1) que denota un comportamiento adelgazante a bajas ratas de corte y a partir de un punto de inflexión a una

velocidad de corte de 10 s^{-1} aproximadamente, se presenta un comportamiento dilatante o de engrosamiento (shear-thickening) en donde su índice de comportamiento de flujo n , es mayor a 1.

2.1.2. Fluidos dependientes del tiempo

En la práctica los fluidos empleados en la industria aparte de tener una evaluación en términos de tasa o velocidad de corte, esfuerzo de corte, temperatura, entre otras propiedades intensivas; se pone a prueba en función del tiempo el cual es de imperiosa necesidad para la estabilidad y el desarrollo adecuado de cualquier operación en donde se empleen fluidos no Newtonianos de este tipo.

Los valores de viscosidad aparente para los fluidos independientes del tiempo, solo se centran en su variación con el aumento y disminución de la velocidad de corte; mientras que no, a lo largo del tiempo, suponiendo que estos no cambian al mantener una velocidad de corte constante. Para algunos fluidos con ciertas características en la composición y en su estructura molecular tienen comportamientos diferentes con respecto al tiempo, al aplicarles una tasa de corte constante varían su viscosidad aparente paulatinamente, debido a que su estructura se rompe y la velocidad de los enlaces aumenta o disminuye dependiendo de la clase de fluido, hasta llegar a un punto de equilibrio dinámico cuando las tasas de acumulación y de ruptura se equilibran. Estos comportamientos se clasifican como:

- Tixotrópicos
- Reopéticos

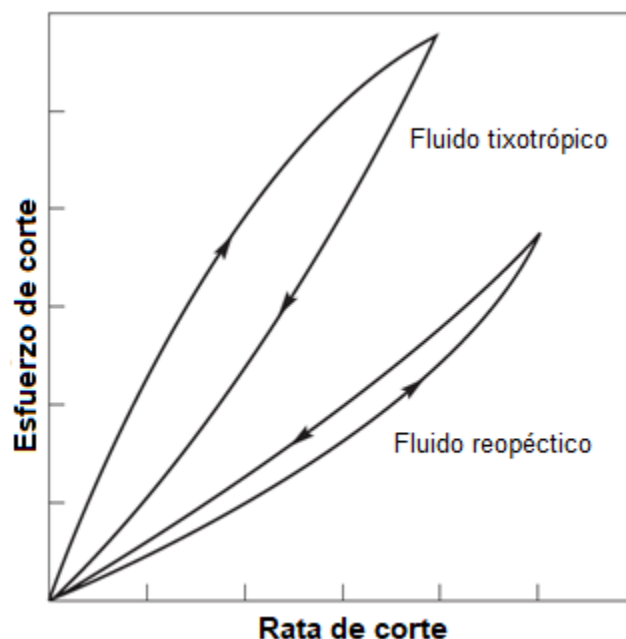


Figura 19. Comportamiento de flujo de fluidos dependientes del tiempo (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 19)

Para identificar una tendencia tixotrópica o reopéctica de un fluido, estos al someterse a una sola prueba en donde la rata de corte se aumenta constantemente a un máximo y luego se disminuye al valor de inicio o de reposo, un ciclo o bucle de histéresis se formaría indicando que se trata de un fluido que depende del tiempo, como se muestra en la figura 19. La altura, la forma y el área bajo las dos curvas dependen de la duración, la velocidad de aumento y disminución de la rata de corte.

2.1.2.1. Tixotropía

Un efecto tixotrópico en un fluido se refleja al disminuir la viscosidad aparente a una rata de corte constante a una misma temperatura al transcurrir un periodo de tiempo. Estos fluidos se constituyen en su mayoría de pequeñas partículas agregadas enlazadas débilmente, las cuales al ser sometidas a un esfuerzo de cizalla o cortante ocasionan que sus agregados se distorsionen ofreciendo menos resistencia al flujo, que traduce en la reducción de la viscosidad hasta llegar un

punto de equilibrio; definido anteriormente. Posteriormente la sustancia recobra su forma inicial luego de un tiempo en reposo.

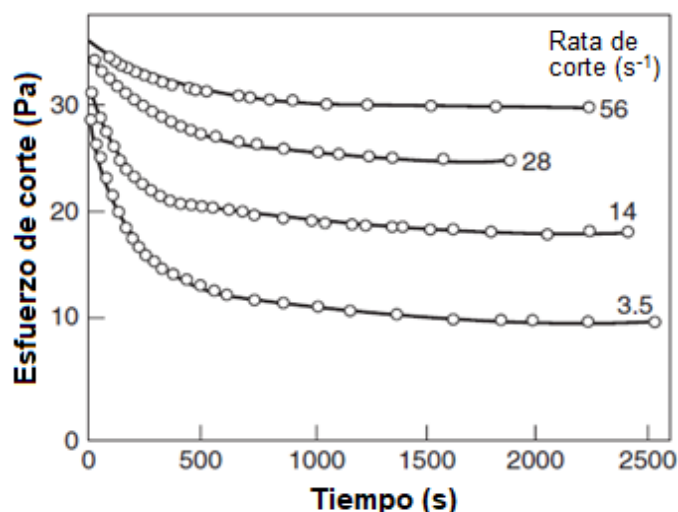


Figura 20. Comportamiento tixotrópico de una suspensión de lodo (*Chhabra & Richardson, 2008, pág. 18*)

En la figura 20 se observa que para una tasa de corte de 56 s^{-1} aplicada por un tiempo de 2.250 segundos, el esfuerzo de corte fue disminuyendo de 35 a 30 Pascales en solo 800 segundos, donde a partir de ese momento su esfuerzo permanece invariable. El mismo comportamiento se da a una tasa de 3.5 s^{-1} suministrada por 2.500 segundos. De cero a 1.500 segundos el esfuerzo de corte decrece de 28 a 10 Pascales paulatinamente hasta permanecer constante. Se muestra una variación en su resistencia a fluir al modificar la tasa de deformación y mantenerla constante, mostrando parte de un comportamiento tixotrópico.

2.1.2.2. Reopéxia

Un fluido reopéctico tiene un comportamiento contrario al tixotrópico, también se conoce como tixotropía negativa, ya que al ser sometido a una velocidad de deformación constante este aumenta su viscosidad aparente y al disminuirla paulatinamente, su estructura molecular se va destruyendo en cierta medida, formando un ciclo de histéresis, pero en sentido inverso al ya

mencionado. Este tipo de fluido es muy poco común debido a su extraño comportamiento que hace complejo su replicación y por ende su modelación teórica, ya que como se mencionó este depende del tiempo, de la tasa de ruptura y acumulación, debido a la configuración de sus moléculas y la propiedad de restablecerse.

En la figura 21 se visualiza un comportamiento típico de un fluido dilatante a diferentes tasas de corte por un determinado tiempo. A una tasa constante de 918.5 s^{-1} , la variación del esfuerzo de

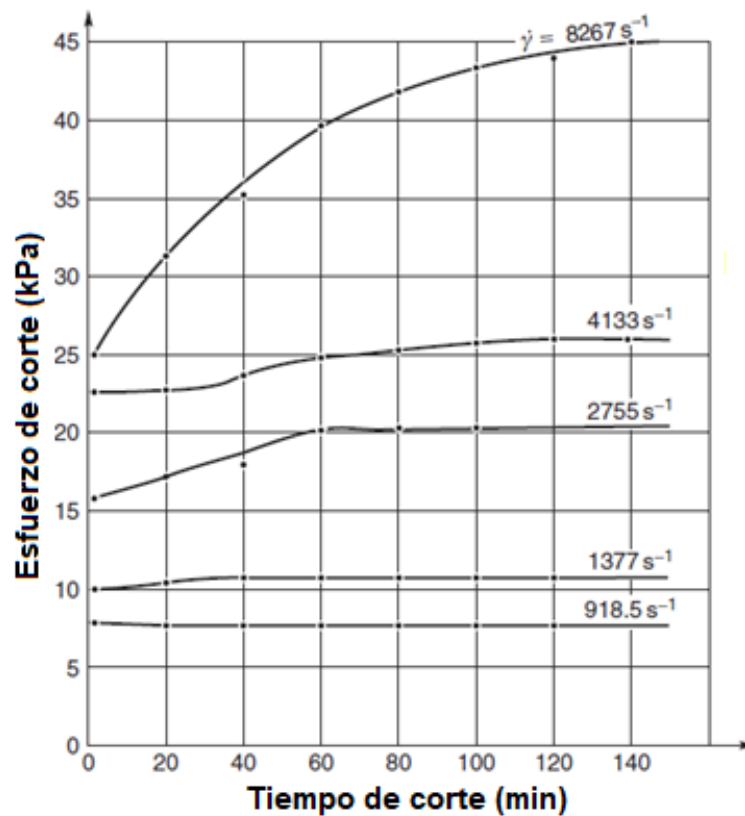


Figura 21. Comportamiento reopéctico de un políester saturado (Chhabra & Richardson, 2008, pág. 21)

corte en kPa durante el tiempo de aplicación permanece constante. A medida que aumenta la tasa de corte aplicada por un mismo periodo de tiempo, se observa que el esfuerzo de corte se incrementa lo cual traduce en un aumento de su viscosidad ajustándose a un comportamiento reopéctico.

2.1.3. Fluidos viscoelásticos

La viscoelasticidad es una propiedad que poseen los materiales que muestran características viscosas como elásticas cuando se deforman al ser sometidos a un esfuerzo, es decir cumplen con la teoría clásica de elasticidad descrita por la ley de Hooke y la ley de viscosidad de Newton. Un fluido con estas características puede recuperar parte de la deformación al ser retirado el esfuerzo que la provoca. Estos fluidos están compuestos por dos fracciones, una elástica y una viscosa, cuando son sometidos a esfuerzos que luego son removidos; la deformación solo se recupera en la fracción elástica del fluido; la fracción viscosa permanecerá parcialmente deformada por lo cual se afirma que la recuperación no es completa.

La modelación de estos fluidos se acoge a correlaciones propuestas por Maxwell, Jeffreys y Maxwell generalizado lo cuales son tipo de modelaciones viscoelásticas lineales y su uso se restringe solo a movimientos de gradientes de desplazamientos pequeños; por otra parte, las modelaciones no lineales describen gradientes más grandes como el de Giesekusde y modificaciones a los anteriores modelos.

3. MODELAMIENTO DEL FLUJO DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

A lo largo del estudio de los fluidos y su flujo se han propuesto correlaciones para el tratamiento de los datos experimentales y teóricos o en condiciones supuestas para describir el comportamiento de sus propiedades; Sin embargo, es muy posible que un único modelo no correlacione satisfactoriamente el comportamiento de una determinada sustancia en un amplio intervalo de velocidad de corte o debido a la composición y forma del fluido.

3.1. Modelos independientes del tiempo

- **Ley de la potencia o modelo de Ostwald de Waele**

La relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte se plantea con la siguiente correlación

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (3.1)$$

La viscosidad aparente para este modelo se determina según la definición y reemplazando se llega a:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3.2)$$

Donde K y n son dos parámetros empíricos de ajuste de curva y se denominan como coeficiente de consistencia del fluido e índice de comportamiento de flujo respectivamente.

El valor de n indica un comportamiento de flujo según su valor, siendo,

$n < 1$ *Comportamiento pseudoplástico o adelgazante*

$n = 1$ *Comportamiento de flujo Newtoniano*

$n > 1$ *Comportamiento dilatante o de engrosamiento*

Este comportamiento siempre está ligado a una temperatura. El modelo de la ley de la potencia es el más utilizado en la industria del petróleo por su amplio rango de aplicación y modelación de los tipos de fluidos existentes. Este modelo presenta inconsistencias a altas ratas de corte ya que su viscosidad tiende a cero y a muy bajas ratas la viscosidad tiende a infinito.

- **Modelo de viscosidad de Carreau**

Se define como

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (3.3)$$

Donde n (<1) y λ son parámetros adimensionales de ajuste de curva.

Este modelo se aplica cuando se tienen muy altas o muy bajas ratas de corte y las viscosidades tiene a cero o a infinito debido a que la ley de la potencia presenta errores en estos rangos.

- **Modelo de viscosidad de Cross**

Modelo definido por cuatro parámetros de amplia aceptación.

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \frac{1}{1 + k(\dot{\gamma})^n} \quad (3.4)$$

En la ecuación 3.4 n (<1) y k son parámetros de ajuste de curva donde como en la ecuación anterior los valores de μ_0 y μ_{∞} son valores limitantes de la viscosidad aparente a velocidades de corte bajas y altas, respectivamente.

- **Modelo de viscosidad de Ellis**

Cuando las desviaciones de la ley de potencia a bajas ratas de corte son significativas, el modelo de Ellis presenta buen comportamiento a estas condiciones. Se presenta como:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1+(\tau/\tau_{1/2})^{\alpha-1}} \quad (3.5)$$

La μ_0 es la viscosidad de corte cero; α (>1) es una medida del grado de adelgazamiento o pseudoplasticidad; el crecimiento del valor es proporcional a la extensión de esta propiedad del fluido y junto con $\tau_{1/2}$ que es el valor del esfuerzo de corte cuando la viscosidad aparente se redujo a la mitad, son parámetros ajustables.

- **Modelo plástico de Bingham**

$$\tau = \tau_0 + \mu_p(\dot{\gamma}) \quad \text{Cuando } \tau > \tau_0 \quad (3.6)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de un fluido cuando este presenta un punto de cedencia denominado τ_0 . El parámetro μ_p se conoce como viscosidad plástica y se determina experimentalmente o calculándola del reograma en coordenadas cartesianas de esfuerzo de corte versus rata de corte.

- **Modelo de Herschel-Bulkley**

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad \text{Cuando } \tau > \tau_0 \quad (3.7)$$

En modelo de Herschel-Bulkley es una generalización de modelo plástico de Bingham el cual abarca la curva de flujo no lineal que se presenta en este modelo, es decir fluidos que además de tener un punto de cedencia exhiben un comportamiento pseudoplástico. Los parámetros de K y n (<1) son similares a los de la ecuación de la ley de la potencia.

- **Modelo de Casson**

Empleado principalmente para describir el flujo de fluidos biológicos, como la sangre, chocolate fundido, yogur, etc. se escribe,

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_0 \dot{\gamma}} \text{ Cuando } \tau > \tau_0 \quad (3.8)$$

El parámetro de punto de cedencia τ_0 y la viscosidad de una rata de corte de cero μ_0 .

3.2. Modelos dependientes del tiempo

El modelamiento de este tipo de fluidos es compleja debido a el comportamiento que presentan debido a los procesos físicos subyacentes responsables de los cambios estructurales en el material sometido a esfuerzos y la posterior acumulación de estructura en reposo en el caso de la tixotropía reversible o reopéxia; sin embargo uno de modelos que ha tenido un éxito razonable en la descripción del comportamiento tixotrópico de fluidos se debe a Houska, que realmente es una generalización del modelo de Herschel-Bulkley. Se describe como:

$$\tau = (\tau_0 + \tau_1) + (m_0 + \xi m_1) \dot{\gamma}^n \quad (3.9)$$

Donde τ_0 es el esfuerzo de cedencia permanente y m_0 corresponde a el coeficiente de consistencia; τ_1 y m_1 son los parámetros dependientes del tiempo, linealmente dependientes del valor de ξ el cual va de cero a la unidad, que corresponde al grado de consolidación de la estructura , siendo cero completamente descompuesta y uno como la totalmente conformada.

$$\frac{d\xi}{dt} = a(1 - \xi) - b\xi\dot{\gamma}^\varepsilon \quad (3.10)$$

La segunda parte del modelo describe un equilibrio dinámico entre la tasa de acumulación y la desbaratamiento de la estructura, lo que sería igual a la tasa de cambio de ξ .

Los parámetros de τ_0 , τ_1 , m_0 , m_1 y n son parámetros materiales; mientras que a , b y ε corresponden a parámetros cinéticos.

3.3. Modelos viscoelásticos

Los fluidos viscoelásticos se basan en la combinación lineal de propiedades elásticas y viscosas mediante el uso de análogos mecánicos que involucran resortes (componente elástico) y salpicaduras (acción viscosa). El modelo de Maxwell representa la piedra angular de la llamada modelos lineales viscoelásticos, formulada;

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt} \quad (3.11)$$

Al combinar la ecuación anterior con la ley de Hooke y la de viscosidad de Newton se obtiene:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \mu \dot{\gamma} \quad (3.12)$$

Donde,

$\dot{\tau}$ = Derivada de τ con respecto al tiempo

μ = Viscosidad del fluido amortiguador

λ = Tiempo de relajación μ/G

G = Módulo de Young

El anterior modelo tiene una respuesta predominantemente fluida. Para obtener un comportamiento con más presencia sólida o elástica se considera el modelo de Voigt definido como:

$$\tau = G\gamma + \mu\dot{\gamma} \quad (3.13)$$

4. CONCEPTOS IMPLÍCITOS EN EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN

En la práctica para determinar las pérdidas de presión por fricción en una tubería, habitualmente se emplea un diagrama que relaciona el factor de fricción de Fanning en función de Número de Reynolds, ambas adimensionales.

- **Número de Reynolds**

Es un número adimensional que caracteriza el movimiento de un fluido en tuberías circulares. Su valor numérico permite parametrizar el régimen del flujo de un fluido en zonas denominadas laminar y turbulento. Se expresa de la siguiente manera:

$$N_{Re} = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (4.1)$$

Que para unidades de campo es:

$$N_{Re} = \frac{378.95 \rho Q}{\mu d} \quad (4.2)$$

ρ = Densidad, lbm/gal

Q = Caudal, gal/min

d = Diámetro interno de la tubería, in

μ = Viscosidad dinámica, Centipoise (Cp)

La ecuación 4.2 se define como el número de Reynolds para fluidos Newtonianos, para fluidos no Newtonianos se modifica un parámetro característico de este tipo de fluido que es la viscosidad aparente, de este modo la ecuación se define como número de Reynolds generalizado, propuesta por Metzner & Reed, (1955) y se calcula como se indica a continuación:

$$N_{Reg} = \frac{378.95 \rho Q}{\mu_a d} \quad (4.3)$$

La viscosidad aparente es medida a una velocidad de corte a determinada temperatura.

Según el modelo escogido, se incorpora la definición de viscosidad aparente de la ley de la potencia:

$$\mu_a = K \gamma^{n-1} \quad (4.4)$$

Finalmente, la ecuación de N_{Reg} (en unidades de campo) a utilizar en función del factor de fricción es:

$$N_{Reg} = \frac{378.95 \rho Q}{47880 K \gamma^{n-1} d} \quad (4.5)$$

Para determinar en qué régimen de flujo se encuentra un fluido no Newtoniano, se emplea la ecuación del número de Reynolds crítico (N_{Rec}), definida por:

$$N_{Rec} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{a}{R} \right)^{0.5} \right] \quad (4.6)$$

Donde,

a = Diámetro interno de la tubería enrollada

R = Diámetro del carrete

a/R = Relación de curvatura

Si el $N_{Rec} > N_{Reg}$ denota que el flujo es laminar; cuando $N_{Rec} < N_{Reg}$, el flujo es turbulento.

- **Rata de corte**

Para determinar la viscosidad aparente se hace necesario el cálculo de la rata de corte. Por definición la rata de corte (shear rate) o velocidad de deformación, es la velocidad relativa de capas o elementos, dividida por la distancia que las separa; para efectos de la tubería, la velocidad relativa será la velocidad media, y la distancia de la capa es el diámetro interno de la tubería empleada. La ecuación en unidades de campo está dada por:

$$\gamma = 1.6 \frac{V}{d} \quad (4.7)$$

Donde, la velocidad en unidades de campo se define por:

$$v = \frac{24.51 Q}{d^2} \quad (4.8)$$

γ = Rata de corte, S^{-1}

v = Velocidad media, ft/min

d = Diámetro interno de la tubería, in

Q = Caudal, Gal/min

- **Esfuerzo de corte**

Es la fuerza necesaria que se aplica a una superficie para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido, está expresada de la siguiente manera en unidades de campo:

$$\tau_w = \frac{3 d \Delta P}{L} \quad (4.9)$$

τ_w = Esfuerzo de corte, Psi

ΔP = Caída de presión, Psi

L = Longitud de la tubería, ft

- **Parámetros de la ley de la potencia n y K**

Los parámetros de la ley de la potencia están definidos para cada fluido según la relación entre esfuerzo de corte y rata corte, a una temperatura determinada. En flujo laminar se puede determinar n y K por medio del gráfico entre esfuerzo de corte y rata de corte a través de la ecuación de tendencia proporcionada por algún software o de forma manual, determinando el punto de intersección con el eje de las ordenadas (K) a una rata de corte de 1 s^{-1} y hallando la pendiente (n) de los puntos en escala logarítmica. Para flujo turbulento la lectura de estos parámetros es incorrecta del modo anterior mencionado, arrojando datos erróneos. Para determinarlos existe un

método por tablas, las cuales fueron evaluadas en laboratorios por medio de viscosímetros de tubos, estandarizando estos parámetros en función de la temperatura para diferentes fluidos. Estas tablas se tomaron del reporte técnico preparado por el centro tecnológico de construcción de pozos de la universidad de Oklahoma, para la reunión anual del consorcio de tubería enrollada en Houston en el año 1998.

A continuación, los valores de n y K del fluido guar a tres concentraciones diferentes utilizados en el desarrollo de este trabajo.

Tabla 2. Datos de n y K para guar de concentración de 20 lbm/Mgal

Temperatura (°F)	n	K
75	0.69	0.00130
100	0.77	0.00060
125	0.84	0.00030
150	0.97	0.00010
175	1.00	0.00005

Fuente: *Technical Report*; prepared by the Well Construction Technology Centre, University of Oklahoma, for the Annual Meeting of the Coiled Tubing Consortium, Houston, TX, 1998.

Tabla 3. Datos de n y K para guar de concentración de 30 lbm/Mgal

Temperatura (°F)	n	K
75	0.5988	0.004079
100	0.6059	0.003801
125	0.6247	0.002968
150	0.6528	0.001988
175	0.6934	0.001355

Fuente: *Technical Report*; prepared by the Well Construction Technology Centre, University of Oklahoma, for the Annual Meeting of the Coiled Tubing Consortium, Houston, TX, 1998.

Tabla 4. Datos de n y K para guar de concentración de 40 lbm/Mgal

Temperatura (°F)	n	K
75	-	-
100	0.45	0.0158
125	0.51	0.0087
150	0.59	0.0048
175	0.63	0.0031

Fuente: *Technical Report*; prepared by the Well Construction Technology Centre, University of Oklahoma, for the Annual Meeting of the Coiled Tubing Consortium, Houston, TX, 1998.

- **Número de Dean** (Dean , 1927,1928)

Es un número adimensional utilizado para estudiar el flujo de un fluido a través de tuberías o conductos curvados. Relaciona el número de Reynolds con la curvatura (a/R) de la tubería enrollada, la ecuación se representa:

$$N_{De} = N_{Re} \left(\frac{a}{R} \right)^{0.5} \quad (4.10)$$

La anterior ecuación está dada para un fluido Newtoniano en tubería enrollada. Para un fluido no Newtoniano, se retoma la definición de N_{Reg} que es la que caracteriza el régimen de flujo para el fluido de interés, sumado a un factor dependiente del índice del comportamiento de flujo (n), al unir estos términos surge una nueva ecuación conocida como número de Dean generalizado (N_{DNg}), la cual permite estudiar el comportamiento de los fluidos no Newtonianos en tubería enrollada.

$$N_{DNg} = 2^{3(n-1)} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n N_{Reg} \sqrt{a/R} \quad (4.11)$$

N_{DNg} = Número de Dean generalizado

n = Índice de comportamiento de flujo, adimensional

a/R = Relación de curvatura

- **Número de Reynolds 2**

Mishra & Gupta (1979) definieron como número de Reynolds 2 al flujo evaluado a una viscosidad efectiva en tubería enrollada, considerando el esfuerzo de corte generado en la pared del tubo y su ecuación para unidades de campo es:

$$N_{Re2} = 378.95 \frac{\rho Q}{\mu_2 d} \quad (4.12)$$

- **Viscosidad efectiva**

Es la resistencia del fluido a fluir a través de una geometría en particular, para este caso, la geometría de la tubería enrollada. Se simboliza μ_2 y se define:

$$\mu_2 = K' \left(\frac{\tau_w}{K'} \right)^{(n-1)/n} \quad (4.13)$$

- **Parámetros de la ley de la potencia generalizada**

$$K' = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (4.14)$$

k = Índice de consistencia, $lbm s^n / ft^2$

$$\tau_w = K' \left(\frac{8V}{d} \right)^n \quad (4.15)$$

τ_w = Esfuerzo de corte en la pared de la tubería, Psi

- **Número de Dean 2**

Número adimensional para el flujo de fluidos a través de tuberías enrolladas para flujo laminar, empleando el número de Reynolds 2. Defino como:

$$N_{D2} = N_{Re2} \sqrt{\frac{a}{R}} \quad (4.16)$$

- **Número de Reynolds basado en viscosidad diferencial**

Define el régimen de flujo existente en la pared de la tubería empleando una viscosidad diferencial para flujo turbulento. Se define como:

$$N_{Red} = \frac{d V \rho}{\mu_d} \quad (4.17)$$

- **Viscosidad diferencial**

Es la viscosidad del esfuerzo de corte en la pared de la tubería.

$$\mu_d = nK \left(\frac{\tau_w}{K} \right)^{(n-1)/n} \quad (4.18)$$

5. CORRELACIONES PARA DETERMINAR EL FACTOR DE FRICCIÓN PARA TUBERÍA ENROLLADA

Para el estudio detallado de las pérdidas de presión por fricción en tubería enrollada, se hace necesario recurrir al diagrama de Moody, debido a que las caídas de presión van directamente relacionadas con el factor de fricción. El diagrama de Moody es la representación gráfica del factor de fricción de Fanning en función del número de Reynolds generalizado. Esta gráfica permite comparar las correlaciones definidas para este proyecto del factor de fricción, frente a los valores de factor de fricción experimental con el fin de concluir y recomendar la mejor correlación que represente el comportamiento real del flujo de los fluidos.

También, permite relacionar el cambio del factor de fricción frente a las diferentes curvaturas que la tubería enrollada presenta, este análisis final otorgará la facultad de inferir qué tanto afecta la curvatura a las pérdidas de presión por fricción en tuberías enrolladas lisas.

5.1. Correlaciones para el cálculo del factor de fricción

El resultado de años de investigación ha conllevado al desarrollo de correlaciones que hoy en día son las que modelan el factor de fricción de fluidos no Newtonianos en tubulares enrollados, cada una de ellas con sus respectivos parámetros. Las correlaciones serán modeladas para dos regímenes de flujo, laminar y turbulento; para distinguir dichos regímenes se halla el número de Reynolds crítico con la ecuación 4.6 y se compara con el número de Reynolds generalizado, cuando $N_{Reg} > N_{Rec}$ se denomina que el flujo es turbulento, de lo contrario es laminar.

De este modo se eligió un grupo de correlaciones encontradas en las literaturas propuestas por diversos investigadores que serán simuladas durante el desarrollo del proyecto.

5.1.1. Factor de fricción para fluidos no Newtonianos en flujo laminar

- **Mashelkar & Devarajan** (Zhou & Shah, 2004)

Estos dos autores por medio de un análisis teórico y una solución numérica, determinaron las ecuaciones de flujo para un fluido modelado por la ley de la potencia, dadas para condiciones de flujo laminar y turbulento. Se expresa como:

$$f_{CL} = (9.069 - 9.438n + 4.374n^2) * \left(\frac{a}{R}\right)^{0.5} * N'_{De}^{(-0.768 + 0.122n)} \quad (5.1)$$

Donde,

$$70 < N'_{De} < 400$$

$$0.01 < \frac{a}{R} < 0.135$$

f_{CL} = Factor de fricción en tubería enrollada para régimen laminar

Mashelkar & Devarajan involucran un término en su correlación, la cual es de importancia para el modelamiento adecuado de la misma, esta ecuación está dada por:

$$N'_{De} = \frac{(2a)^n v^{2-n} \rho}{K'} (a/R)^{0.5} \quad (5.2)$$

- **Mishra & Gupta** (Zhou & Shah, 2004), (Mishra & Gupta, 1979).

Para esta correlación, Mishra & Gupta se fundamentaron en los análisis del cálculo del factor de fricción en tubería recta en flujo laminar, añadiendo la relación de curvatura (a/R) por medio del número de Dean. Esta ecuación es ajustada para la predicción del factor de fricción de un fluido no Newtoniano en régimen turbulento.

$$f_{CL} = f_{SL} [1 + 0.033 (\text{Log } N_{De2})^{4.0}] \quad (5.3)$$

Donde,

$$f_{SL} = \frac{16}{N_{Re2}}$$

f_{CL} = Factor de fricción en tubería enrollada para flujo laminar

f_{SL} = Factor de fricción en tubería recta para flujo laminar

- **Zhou & Shah** (Ahmed & Ali, 2015)

Fue experimentalmente determinada, usando una escala completa de tubería flexible, mostrando un buen ajuste para la predicción del factor de fricción.

$$f = \alpha (2)^{\frac{n}{n+1}} N_{Dng}^{\frac{-1}{n+1}} (a/R)^{0.5} Y^{\frac{-3n}{n+1}} \quad (5.4)$$

$$\alpha = [0.66973 - 0.203281 \ln(n)]^2$$

$$Y = 0.42097 - \frac{4.55928}{N_{Dng}} + 0.21545n + \frac{146.85441}{N_{Dng}^2} - 0.15279n^2 - 4.40922 \frac{n}{N_{Dng}}$$

5.1.2. Factor de fricción para fluidos no Newtonianos en flujo turbulento

- **Mashelkar & Devarajan** (Zhou & Shah, 2004)

A partir de una solución numérica Mashelkar & Devarajan propusieron la correlación 5.5, que modela el factor de fricción en tuberías enrolladas para fluidos no Newtonianos en régimen turbulento.

$$f_{CT} = \frac{4\alpha \cdot (a/R)^{0.5}}{\left[N_{Re} \left(a/R \right)^{\frac{1}{2B}} \right]^{\frac{B}{Bn+1}}} \quad (5.5)$$

Los parámetros para la correlación 5.5 se tabularon en la tabla 5.

Tabla 5. *Parámetros para la correlación de Mashelkar & Devarajan*

n	α	B	α'
1	0.079	0.25	0.07185
0.9	0.077	0.257	0.08186
0.75	0.0755	0.269	0.06566
0.5	0.0725	0.293	0.06325

Fuente: Technical Report; *prepared by the Well Construction Technology Centre, University of Oklahoma, for the Annual Meeting of the Coiled Tubing Consortium, Houston, TX, 1998.*

- **Ito** (Ito, 1959)

Ito propuso la correlación 5.6, con el fin de determinar el factor de fricción para fluidos Newtonianos en tubería enrollada en flujo turbulento, debido a su gran ajuste para modelar los fluidos no Newtonianos, se usó para comparar con las más recientes correlaciones halladas para fluidos no Newtonianos, es por esto, en este trabajo se emplea como objetivo de comparación.

$$f = \frac{1}{4} (a/R)^{0.5} (0.029 + 0.304 [N_{Re} (a/R)^2]^{-0.25}) \quad (5.6)$$

- **McCann & Islas** (Zhou & Shah, 2004)

McCann & Islas generalizaron la ecuación propuesta por Srinivasan (Srinivasan, Nandapurkar, & Holland, 1970), adecuándola para fluidos no Newtonianos en flujo turbulento, esta nueva correlación fue aplicada y comparada para 6 tipos de fluidos preparados usando bentonita y cal. Se define como:

$$f = \frac{1.06 a (r/R)^{0.1}}{N_{Re}^{0.8b}} \quad (5.7)$$

Donde,

$$a = \frac{\log_{10}(n) + 3.93}{50} \quad b = \frac{1.75 - \log_{10}(n)}{7}$$

Para la ecuación 5.7, McCann & Islas definen (r) como el radio interno de la tubería y (a) como un factor de ajuste.

- **Zhou & Shah** (Ahmed & Ali, 2015)

En uno de los más recientes estudios, Zhou & Shah propusieron la ecuación 5.8, empleando una solución numérica para flujo turbulento en tubería enrollada, en un rango del índice de comportamiento de flujo de $0.25 < n < 1$. Esta correlación fue verificada y comparada con la correlación 5.7 de Ito para el flujo turbulento de un fluido Newtoniano.

$$f = \frac{0.01525 + 0.05801 n^{0.80588} (a/R)^{0.5}}{\left[2^{3(n-1)} \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^n NRe (a/R)^{\frac{1}{2\beta}} \right]^{\frac{\beta}{(\beta n + 1)}}} \quad (5.8)$$

Donde,

$$\beta = \frac{1}{1.945 + 2.04949 / n^{1/2}}$$

- **Mishra & Gupta** (Zhou & Shah, 2004)

Para el cálculo del F_{CT} (Fanning friction factor coiled turbulent) – Factor de fricción en tubería enrollada para flujo turbulento. Mishra & Gupta partieron de la ecuación modeladora del factor de fricción para tubería recta, expresada como F_{ST} (friction factor straight turbulent), este parámetro fue relacionado con la curvatura (a/R). Como resultado la correlación empírica que se obtuvo:

$$F_{CT} = F_{ST} + 0.0075 \left(\frac{a}{R} \right)^{1/2} \quad (5.9)$$

Donde,

$$F_{ST} = \frac{0.079}{N_{red}^{0.25}} \quad (5.10)$$

F_{ST} , propuesta por Blassius (Mishra & Gupta, 1979).

- **Willingham & Shah** (Willingham & Shah, 2000)

En el año 2000, Willingham & Shah propusieron una nueva correlación para el factor de fricción, determinada a partir de estudios experimentales de varios fluidos para un índice de comportamiento de flujo (n) variante de 0.18 hasta 1, a varios tamaños de tubería, para un rango de número de Reynolds generalizado de ($1000 < N_{Reg} < 350000$). Definida como:

$$\sqrt{f} = \left\{ 0.1319 + 0.2725 (a/R)^{0.5} + \left[\frac{1.076 - 8.73 \cdot 10^4 (a/R)^3}{\mu_{a,@ 511}} \right]^2 \right\}^2 + \frac{3.24}{\sqrt{N_{Reg}^{(1-a/R)}}} \quad (5.11)$$

Según análisis y comparaciones realizadas en múltiples artículos, la correlación de Willingham & Shah es una de las que mejor se ajusta al comportamiento experimental del factor de fricción.

5.2. Comparación de correlaciones modeladoras del factor de fricción

Con el fin de establecer la exactitud entre las correlaciones expuestas a lo largo de este trabajo, se graficaron 2 diagramas representativos de las correlaciones propuestas, cada figura en su respectivo régimen a una misma condición de tubería y fluido. Los datos dados para una tubería enrollada de diámetro externo de 1.5 in (ID 1.1822 in), curvatura $a/R=0.016$, $n=0.73$ y $K=0.013$.

Es importante tener en cuenta como determinar la curvatura para cada caso, como bien se mencionó en el capítulo 4, la curvatura es la relación a/R dependiente del diámetro interno del tubo (a) y el del carrete (R) de la tubería flexible, que son escogidos según la necesidad de uso. Para cada ocasión hay una relación de curvatura diferente, en la tabla 6 se muestra varias relaciones de

curvatura empleadas en el desarrollo experimental de los fluidos utilizados (guar), es de importancia aclarar que estos valores fueron asociados a valores en escala real de tubería flexible, es decir, las mismas relaciones de curvaturas empleadas en campo.

Tabla 6. Dimensiones de carretes de tubería enrollada

No. CARRETE	OD CT (in)	ID CT (in)	LONGITUD (ft)	DIÁMETRO	
				CARRETE (in)	CURVATURA (a/R)
1	1	0.810	500	48	0.0169
2	1	0.810	1000	72	0.0112
3	1-1/2	1.188	1000	72	0.0165
5	1-1/2	1.188	2000	74	0.0160
6	2-3/8	2.063	1000	111	0.0185
7	2-3/8	2.063	2000	111	0.0185

Fuente: Zhou, Y., Shah, S.N. (2006). New Friction-Factor Correlations for Non-Newtonian Fluid Flow in Coiled Tubing. *SPE Drilling & Completion*, 71.

5.2.1. Comparación de correlaciones para flujo laminar

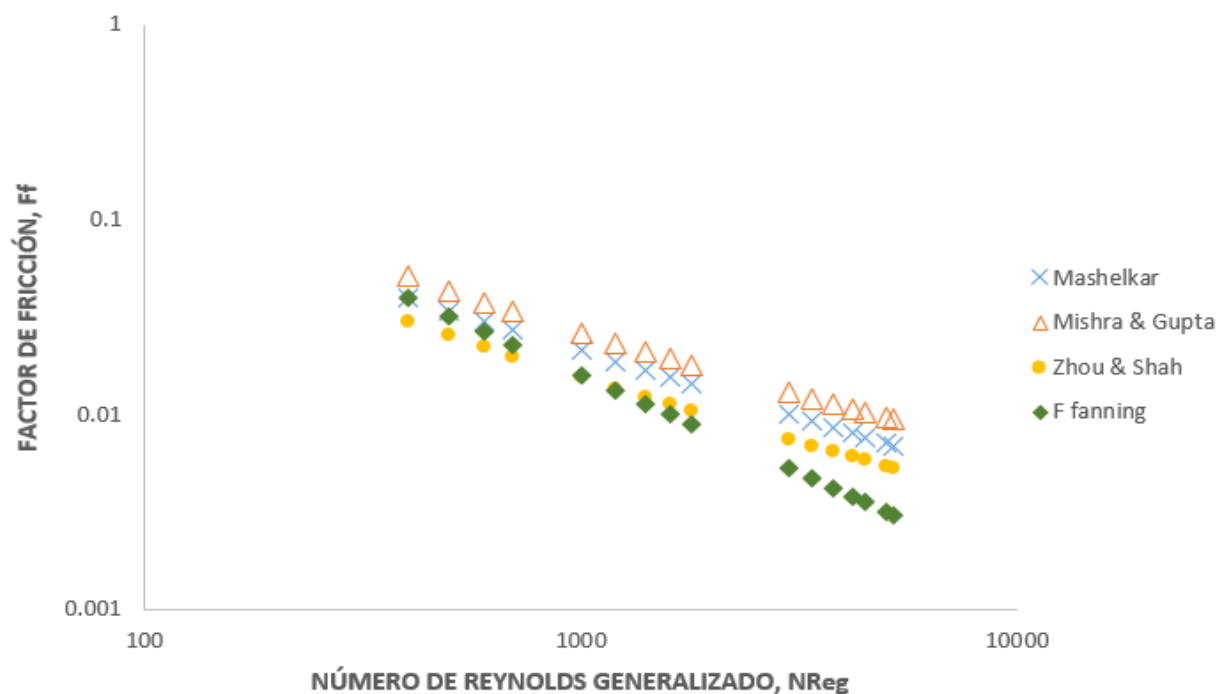


Figura 22. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado supuesto, en tubería enrollada de OD 1.5 in ($a/R = 0.016$).

En la figura 22 se exponen las correlaciones a utilizar en este proyecto en flujo laminar, con valores supuestos de N_{Reg} para un rango de 400 a 5.200. Es de aclarar que, para estas condiciones de tubería y fluido supuesto, el número de Reynolds crítico (N_{Rec}) es de 5.285 determinado con la ecuación (4.6). Como resultado se observó la gran cercanía de las correlaciones propuestas por Mishra & Gupta y Zhou & Shah, que a su vez presentan una similitud por la propuesta por Mashelkar & Devarajan. Se notó una discordancia entre las correlaciones planteadas y la ecuación de Fanning. Esta discrepancia ocurre debido a la curvatura que está implícita en todas las correlaciones para flujo laminar, mientras que en la ecuación de Fanning a pesar de estar definida para ser aplicada en este régimen, no incluye la relación de curvatura, es decir, es para tubería recta ($a/R = 0$), dicho de otra manera, se ve reflejado la afectación de la curvatura o relación a/R en el factor de fricción.

5.2.2. Comparación de correlaciones para flujo turbulento

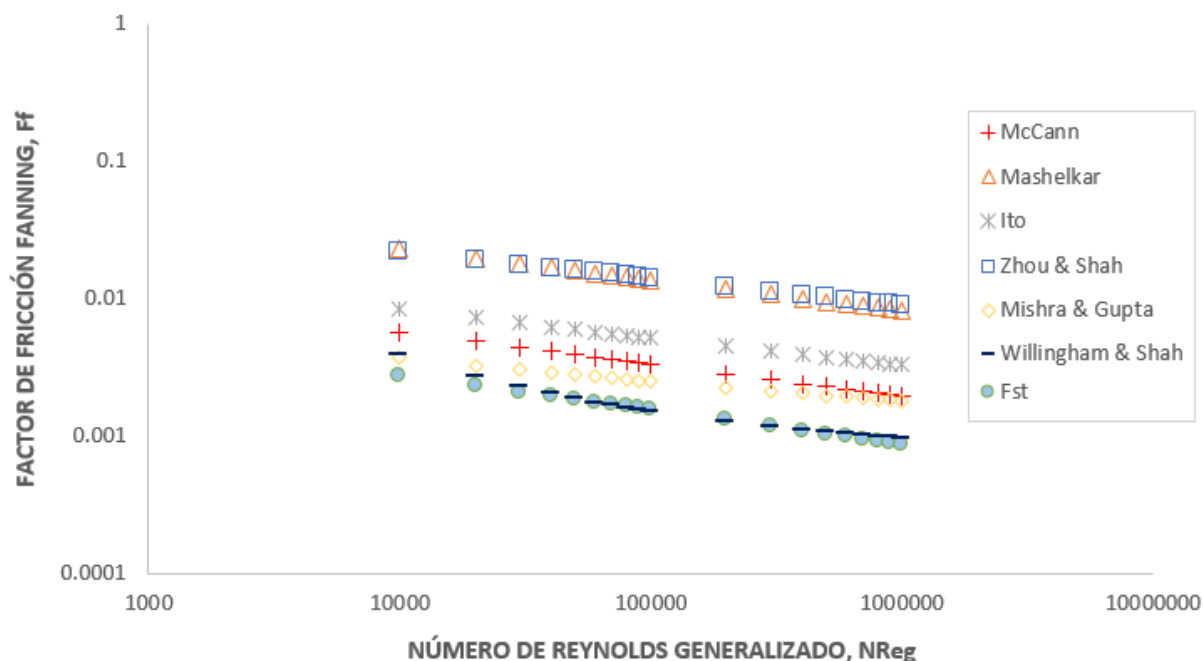


Figura 23. Factor de fricción vs Número de Reynolds Generalizado supuesto, en tubería enrollada de OD 1.5 in ($a/R = 0.016$).

Debido a que las correlaciones aquí propuestas son para fluidos no Newtonianos en régimen turbulento, se suponen valores de número de Reynolds generalizado a partir de 10.000, con el fin de tener un esquema comparativo entre las correlaciones citadas para el desarrollo de este trabajo.

La figura 23 muestra que las correlaciones no son congruentes entre sí. La correlación propuesta por Zhou & Shah y la de Mashelkar & Devarajan a un número de Reynolds de 10.000 hasta 100.000, presentan una similitud notable, punto donde también comienza a separarse disminuyendo su pendiente sobre la otra propuesta por Zhou & Shah. A altos números de Reynolds generalizado, la correlación de McCann presenta una concordancia de datos comparada con la correlación de Mishra & Gupta, por lo contrario, a medida que disminuye el número de Reynolds, estas correlaciones presentan una diferencia considerable.

Por otro lado, la formulada por Willingham & Shah tiene un comportamiento inferior a todas las demás, a medida que el régimen turbulento se incrementa, presenta factores de fricción menores; también se observa un acercamiento con la correlación para flujo turbulento en tubería recta (F_{st}), pero conservando valores mayores del factor de fricción.

A modo general, se observa que las correlaciones propuestas para flujo turbulento en tubería enrollada, predominan en los valores del factor de fricción sobre la correlación para flujo turbulento en tubería recta (F_{st}).

6. COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN DEL POLÍMERO GUAR

El guar o más conocido como goma guar, es un polímero natural de cadena larga compuesto de manosa y azúcares de galactosa, proviene del endospermo del frijol guar o guaran. Para el proceso del guar, primero se separa la envoltura del frijol, luego se procesan para separar el endospermo del casco y el embrión, y se muelen hasta convertirlos en polvo. La goma guar junto al HPG (*Hidroxi Propil Guar*) son los viscosificadores más utilizados en la industria para los fluidos de fracturamiento a base de agua, estadísticamente se presume que su uso es más del 70%.

Los datos experimentales del guar utilizados en el desarrollo de este proyecto, fueron suministrados por la entidad Halliburton, este con fines netamente académicos.

Para modelar un fluido no Newtoniano, se debe clasificar las características reológicas para así definir en qué modelo se ajusta más y adecuar los parámetros a dicho modelo.

En este proyecto se trabajarán tres fluidos, un polímero guar a tres concentraciones diferentes, los cuales fueron ajustados a la ley de la potencia ya que es la que mejor describe el comportamiento de este fluido.

Una vez modelado el fluido, procedemos a la determinación de la caída de presión por medio de un factor de fricción que es expresada por algunas correlaciones empíricas y teóricas expuestas por ciertos investigadores. Estas correlaciones son muy inexactas comparado a lo experimental, es por esto que predecir las pérdidas de presión por fricción es un reto que al día de hoy algunos investigadores asumen para acercarse en lo posible al valor real. Mientras esto ocurre, es de suma importancia discriminar la correlación que mejor represente dichas caídas de presión, para así poder tener un mejor diseño hidráulico para cualquier operación donde se empleen este tipo de

fluido en tubería enrollada, este trabajo se encarga de buscar las correlaciones existentes y compararlas con datos experimentales para poder concluir cual es la correlación que se debería usar para obtener un resultado cercano a lo real.

6.1. Guar a 20 lbm/Mgal

- Comparación del factor de fricción a una misma longitud y diferentes curvaturas

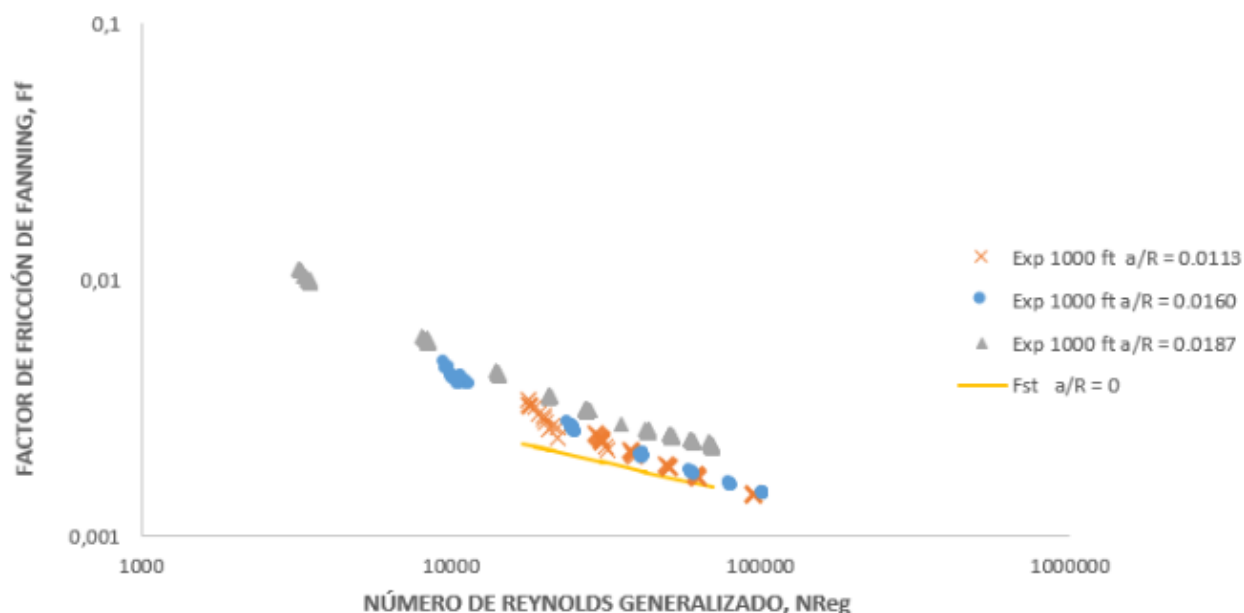


Figura 24. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in, 1.5 in y 2.375 in, para guar a 20 lbm/Mgal a 1000 ft.

La tendencia reflejada en la gráfica de la figura 24 se ajusta al comportamiento según la definición del factor de fricción en función del caudal, densidad, longitud, diámetro y un delta de presión, para los valores experimentales los cuales tienen intrínseca la historia cinemática del fluido en tubería enrollada. Los valores graficados demuestran que la curvatura de la tubería eleva sustancialmente el factor de fricción, haciendo hincapié en que cuando hay mayor curvatura en la tubería se aumentan las fuerzas centrífugas generando un flujo secundario en las paredes de la tubería desencadenando un desarrollo marcado del número de Reynolds.

Los datos relacionados en la gráfica que tienen una tendencia recta representados por la ecuación 5.10 (F_{st} [Factor de fricción en tubería recta]), corresponden a un comportamiento hipotético de los datos experimentales en una tubería recta para un régimen de flujo turbulento, el cual refuerza la relación del factor de fricción con la curvatura, ya que una tubería con un diámetro a y un diámetro de carrete R tendiendo al infinito, la relación a/R propende a cero.

Se observó que la longitud no modifica el valor de los factores de fricción.

- **Comparación del factor de fricción a diferentes diámetros**

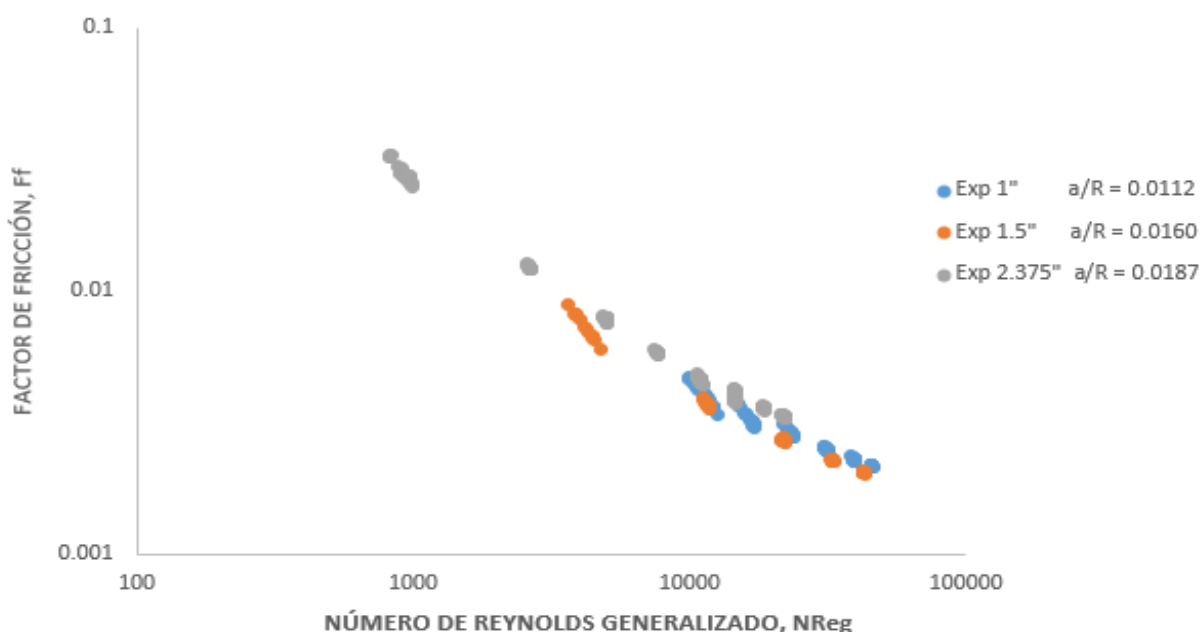


Figura 25. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 3000 ft para guar a 40 lbm/Mgal a 1 in, 1.5 in y 2.375 in.

Haciendo una comparación similar pero esta vez variando la concentración del fluido, se muestra el comportamiento semejante a la gráfica de la figura 24, acrecentándose el factor de fricción a mayor concentración, esto debido a la carga polimérica que genera una mayor fricción en las paredes de la tubería. En la serie de datos experimentales graficados para 2.375 se puede visualizar una pequeña serie de puntos en la región laminar, esto debido al aumento del área de flujo que a

un mismo caudal genera una estabilización considerable al fluido, evidenciándose en sus bajos valores de número de Reynolds.

- **Comparación del factor de fricción a diferentes longitudes a una misma a/R**



Figura 26. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in para guar a 20 lbm/Mgal a 1000 ft, 2000 ft y 3000 ft. ($a/R = 0.016$)

Por otro lado, graficando para una misma relación de a/R es decir mismo diámetro de tubería y dimensión de carrete, para diferentes longitudes se contraponen todos los datos en una misma tendencia lo cual significa que el factor de fricción no varía en función de la longitud si no de la curvatura de la tubería entre otras cosas, como el tipo de fluido, número de Reynolds, rugosidad, etc.

Los diámetros analizados en este trabajo fueron elegidos por el experimentador, los cuales son representativos en la amplia variedad que hay ofrecidos en la industria para los diversos trabajos, ya que se combinan con los diferentes diámetros de tubería con los diferentes carretes de acuerdo a la longitud necesaria; los hay desde aproximadamente 500 pies hasta los 33.000 pies de longitud y de 1 pulgada a 5 pulgadas de diámetro externo.

En las figuras 24, 25 y 26 se graficaron los datos experimentales para el fluido analizado a una concentración de 20 lbm/Mgal mostrando el comportamiento de los datos sin incluir en la ecuación de factor de fricción, la relación a/R es decir la curvatura de la tubería como variable de la misma debido a que ya estaba implícita en los datos experimentales. Algunos expertos en la materia como ya se mencionó páginas atrás involucraron la relación de la curvatura a través de experimentos en los cuales median el efecto de esta en los cálculos de factores de fricción y por ende las pérdidas de presión con el fin de modelar de la mejor manera el comportamiento del fluido. Tales como Mishra & Gupta, McCan & Islas, Mashelkar & Devajaran, entre otros, escogidos para hacer el trabajo comparativo, con el fin de seleccionar la correlación adecuada para este tipo de fluido a diferentes concentraciones, longitudes y diámetros de tubería.

- **Tubería enrollada de 1 in (ID 0.0809843 in). $a/R=0.0112$. – Flujo turbulento**



Figura 27. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 1500 ft de 1 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0112$).

Los autores de las correlaciones graficadas en la figura 27, son exclusivamente para modelar polímeros, para tubería enrollada en régimen de flujo turbulento, el cual se tomó a partir de 10.000

en donde el flujo está totalmente desarrollado según los datos arrojados en los cálculos de N_{Reg} para esta concentración de guar. Las tendencias de cada correlación son similares, pero las que están más alejadas de los valores reales pertenecen a las de *Zho & Shah* y *Mashelkar & Devarajan*. Por otra parte, la que más se acerca a los datos experimentales, los cuales son la última tendencia de datos mostrada en la gráfica, corresponde a la correlación empírica de *Willingham & Shah* siendo muy congruente con los valores experimentales. Esta correlación se derivó de pruebas experimentales a fluidos en un rango de índice de flujo (n) de 0.18 hasta 0.68 en varios tamaños de tuberías para un número de Reynolds generalizado (N_{Reg}) de 1.000 hasta 350.000, lo que permite su uso para un amplio rango de comportamiento de flujo de característica pseudoplástica. La correlación que tuvo un acercamiento a los datos experimentales ligeramente por encima, fue la propuesta por *Mishra & Gupta*.

- **Tubería enrollada de 1.5 in (ID 1.1822 in). $a/R = 0.0160$ – Flujo turbulento.**



Figura 28. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0160$).

Del mismo modo se plotearon los valores arrojados por las correlaciones para una tubería de 3000 pies de longitud y una tubería de 1.5 pulgadas de diámetro para la misma concentración de guar,

para evaluar el comportamiento de las líneas datos para un mismo rango de flujo turbulento. Mostrando una desviación respecto a los datos experimentales esta vez más cercana a los arrojados por la correlación de Willingham & Shah para una variación de 0.5 en el diámetro de la tubería y un diámetro de carrete de 74 pulgadas. Las dimensiones utilizadas para este arreglo incrementaron la curvatura de la tubería en 0.0048, con respecto a la figura 27. El inicio del flujo turbulento se presentó más tarde debido al cambio de diámetro de la tubería y también se presentó valores más altos debido al incremento de la relación a/R .

Es preciso resaltar que, en las correlaciones para el cálculo del factor de fricción de los autores mencionados en este trabajo, no incluyen la longitud de la tubería como variable, el comportamiento de las ecuaciones no variará significativamente al acortar o aumentar la longitud, siempre y cuando la relación de la relación de curvatura (a/R) no varíe, es decir ni el diámetro de la tubería ni el diámetro de carrete, para un alto grado de confiabilidad en ella.

- **Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in), $a/R = 0.0187$ – Flujo laminar**



Figura 29. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0187$).

En la figura 29 se graficaron los valores arrojados para la misma concentración anterior, para un diámetro de 2-3/8 (2.375) pulgadas, pero para un régimen de flujo laminar. Algunos de los autores antes mencionados propusieron una correlación correspondiente para un régimen de flujo laminar, siendo muy acertadas todas con respecto a la información experimental. Este tipo de flujo para un fluido de tipo pseudoplástico como el guar es más fácil de modelar ya que la entropía de sus partículas es mucho menor y por ende su error disminuye. Para este diámetro de tubería se presentó un régimen laminar ya que en el cálculo de Reynolds generalizado presentaron valores por debajo del punto crítico del mismo número adimensional, por lo que sugiere una presencia de una región de flujo laminar y que se modela aceptablemente por todas las correlaciones propuestas de sus autores, acercándose sustancialmente más la de Mishra & Gupta a los valores experimentales. El uso de cualquier correlación para esta relación de a/R es aceptable.

Con el fin de examinar la influencia de la curvatura sobre el factor de fricción en el régimen laminar, se graficó la ecuación propuesta por Metzner & Reed, (1955) que corresponde al factor de fricción desarrollado en una tubería recta para fluidos no Newtonianos en flujo laminar, se expresa:

$$f = \frac{16}{N_{Reg}} \quad (6.1)$$

- Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in), $a/R = 0.0187$ – Flujo turbulento.



Figura 30. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 20 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0187$)

Para culminar la descripción del comportamiento para este fluido en diferentes relaciones de a/R , longitudes y diámetros, se relacionó la otra parte de valores arrojados en los cálculos realizados, que corresponden a datos por encima del número de Reynolds crítico, en una zona de flujo turbulento a una misma relación de curvatura (a/R), que la gráfica anterior. Los valores de factores de fricción a medida que la curvatura fue aumentando, fueron incrementándose significativamente y para estas condiciones la correlación que fue modelando mejor la tendencia de los valores con respecto a los experimentales fue la correlación de Mishra & Gupta los cuales han presentado el menor error frente a los otros autores mencionados en este trabajo.

Muchos factores influyen en la determinación de las ecuaciones que se refleja en la modelación acertada del flujo de fluidos, dependiendo de la cantidad de diámetros de tubería y la observación de la reología de los fluidos de este tipo. La mayoría de las correlaciones fueron determinadas empíricamente.

6.2. Guar a 30 lbm/Mgal

- Tubería enrollada de 1 in (ID 0.0809843 in), $a/R = 0.01125$ – Flujo turbulento



Figura 31. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1 in a 1500 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen turbulento ($a/R = 0.01125$).

En el gráfico de la figura 31 observamos una gran similitud entre la correlación de Willingham & Shah y la experimental, esta tendencia se presenta a lo largo de los datos. La correlación de Mishra & Gupta a lo largo del experimento ha demostrado tener una buena modelación para altos número de Reynolds generalizado, y a bajas concentraciones del guar.

Cabe destacar que en la figura 31, el gráfico está dado para el régimen de flujo turbulento, durante el experimento se evidenció que cualquier tipo de fluido en una tubería enrollada de 1 pulgada es muy difícil que se desarrolle un comportamiento o régimen de flujo laminar, esto debido al diámetro reducido de estas tuberías que, a caudales mínimos de operaciones, presenta un elevado número de Reynolds al igual que pérdidas de presión por fricción.

- Tubería enrollada de 1.5 in (ID 1.1822 in), $a/R = 0.0164$ – Flujo laminar.

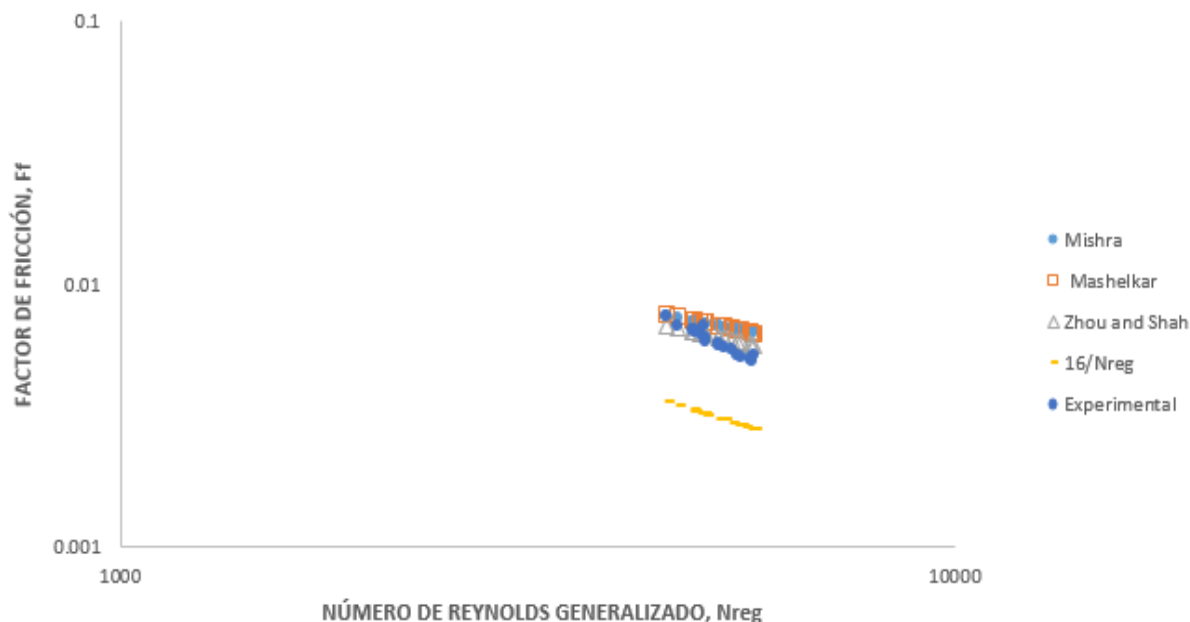


Figura 32. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1.5 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen Laminar ($a/R = 0.0164$).

En la anterior ilustración observamos un gráfico con una serie de datos en flujo laminar, este régimen se presenta debido a la amplitud del diámetro comparado con la gráfica 31, a mayor diámetro da cabida a un régimen de flujo más ordenado. En cuanto las correlaciones, observamos una gran similitud entre las mismas frente al factor de fricción experimental, mostrando un buen índice de confiabilidad al modelar un fluido no Newtoniano en tubería enrollada en régimen laminar. A pesar que todas las correlaciones aparentemente presentan una gran concordancia, siempre habrá una que mejor lo modele, según los valores numéricos para este caso la correlación que más se ajusta es la de Zhou & Shah.

La comparación entre las correlaciones que consideran la curvatura y la ecuación 6.1 permite resaltar el dominio del efecto de la curvatura en el factor de fricción, a mayor curvatura, mayor es el factor de fricción y a su vez mayor es la discrepancia frente a la ecuación de Metzner & Reed (1955), esto es debido a que la relación de curvatura a/R para tuberías rectas es cero.

- Tubería enrollada de 1.5 in (ID 1.1822 in) – Flujo turbulento



Figura 33. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 1.5 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen Turbulento ($a/R = 0.0164$).

En la ilustración de la figura 33 se sigue la secuencia de datos de la figura 32, esta serie correspondiente al régimen de flujo turbulento, experimentando cambios de parámetros del fluido tales como el caudal que hace incrementar sustancialmente el número de Reynolds generalizado.

Una vez más la correlación predominante es la de Willingham & Shah, también podemos resaltar la cercanía de la correlación de Mishra & Gupta, esta vez con un índice de error más pequeño comparada con la gráfica 32 que está a la misma concentración de guar pero a diferente diámetro. Podemos observar que en el primer punto hay una gran discrepancia de la correlación de Mishra & Gupta frente a la experimental, esto refleja la inexactitud de esta correlación para modelar datos cercanos a la zona de transición, por lo contrario, a medida que crece el número de Reynolds generalizado, va disminuyendo el error porcentual.

- Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in) – Flujo laminar



Figura 34. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 2.375 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen laminar ($a/R = 0.0187$).

A diferencia de la figura 33, en la figura 34 se denota un mayor índice de error en cuanto al modelamiento por parte de las correlaciones frente a data experimental a bajos número de Reynolds, ya que a mayor número de Reynolds generalizado, las correlaciones se ajustan de manera considerable al comportamiento real asemejándose a lo acontecido en la gráfica de la figura 32.

Al someter el fluido a diámetros cada vez mayores, como consecuencia provoca una disminución al número de Reynolds tal como evidenciamos en este caso, a esto también se suma la relación existente entre el N_{Reg} y la concentración, puesto que a mayores concentraciones se ha notado que el N_{Reg} tiende a disminuir, provocando un factor de fricción mayor. Para este gráfico la correlación que mejor se adapta es la de los autores Mashelkar & Devarajan, también se evidencia un gran ajuste de las demás correlaciones propuestas para flujo laminar en tubería enrollada para fluidos no Newtonianos.

- Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in) – Flujo turbulento

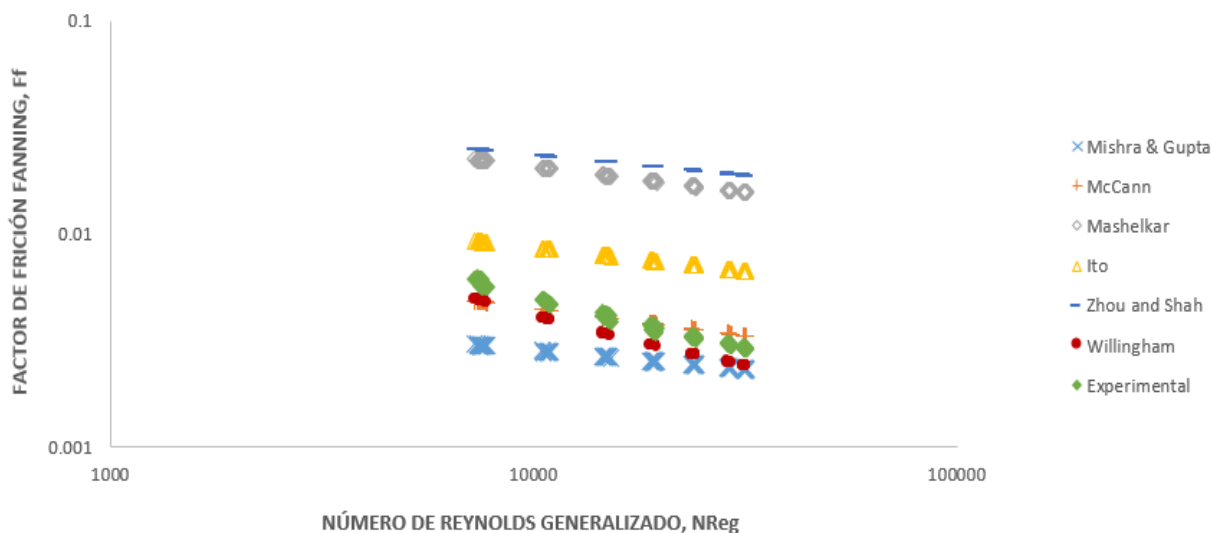


Figura 35. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada de 2.375 in, a 3000 ft para guar a 30 lbm/Mgal, en régimen turbulento ($a/R = 0.0187$).

Como podemos contemplar en la figura 35, visualmente elegir la correlación que mejor represente el factor de fricción frente al valor real se hace muy complejo, debido a la gran aproximación de las correlaciones de Willingham & Shah y McCann & Islas con los valores experimentales, para determinar finalmente la correlación adecuada se recurrió a la comparación numérica de los errores porcentuales de las correlaciones más próximas con respecto al valor pretendido, arrojando la correlación de McCann & Islas, con un desfase de 9.84% aproximadamente, mientras que la de Willingham & Shah con un error aproximado de 17.45%.

Mediante las comparaciones hasta aquí hechas, es posible destacar la correlación de Willingham & Shah como la más acorde a los datos experimentales, manteniendo una consistencia a pesar de las variaciones de diámetros y concentraciones. Sin embargo, para este caso como lo mencionamos anteriormente la correlación de McCann & Islas es la predominante, a partir del desarrollo de esta ecuación podemos inferir que a medida que aumenta la concentración, esta correlación se hace más precisa comparada con la experimental.

6.3. Guar A 40 lbm/Mgal

- Tubería enrollada de 1 in (ID 0.0809843 in) – Flujo turbulento

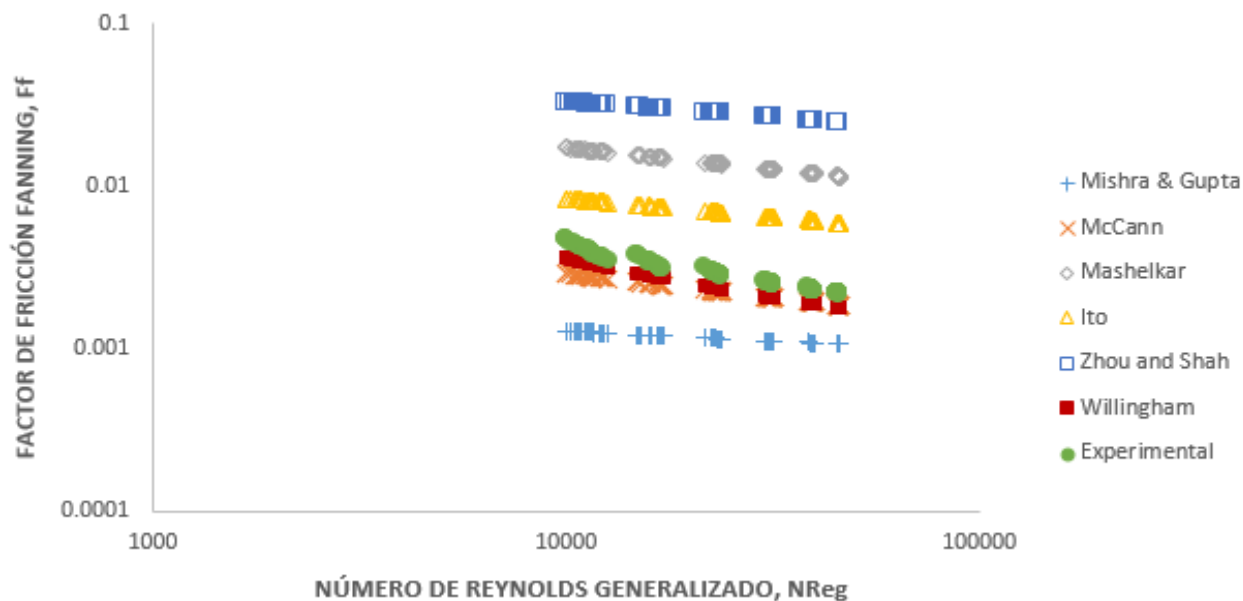


Figura 36. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 1500 ft de 1 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0109$).

Aumentando la concentración del fluido analizado a 40 lbm/Mgal para una tubería con una relación de curvatura de (a/R) 0.0109 se visualiza un comportamiento muy alejado por parte de la mayoría de correlaciones graficadas, siendo la más cercana la correspondiente a la de Willingham & Shah mostrando una tendencia similar a la de los datos experimentales. Comparando el comportamiento del fluido a diferentes concentraciones para el mismo diámetro de tubería, se denota un aumento del factor de fricción con el aumento de la concentración del fluido, aumenta el índice de comportamiento de flujo (n) junto con el índice de consistencia (K). Cuando la carga polimérica o concentración del fluido se incrementa, se muestra un aumento del factor de fricción debido al aumento de las fuerzas viscosas sobre las inerciales, disminuyendo el número de Reynolds generalizado, comparando al mismo diámetro y a la misma curvatura.

- Tubería enrollada de 1.5 in (ID 1.1822 in) – Flujo laminar



Figura 37. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0160$).

Para un diámetro de 1.5 pulgadas la figura 37, ilustra un flujo laminar para la concentración en mención, en donde predominan las fuerzas viscosas sobre las inerciales amortiguando cualquier inestabilidad en el flujo, presentándose un valor umbral de número de Reynolds generalizado de 3.500, mostrando un acercamiento a los datos reales de la correlación empírica de Mishra & Gupta.

De igual manera, como se comparó en la figura 32 para un flujo laminar, se relacionó la ecuación general 6.1, para ver la imperiosa necesidad de involucrar la relación de a/R para modelar correctamente los datos experimentales para tal régimen, como se mostró en la figura 24 donde se relacionó para un flujo turbulento en tubería recta la discrepancia que hay frente a los datos experimentales al no incluir la relación de curvatura en la correlación.

- Tubería enrollada de 1.5 in (ID 1.1822 in) – Flujo turbulento



Figura 38. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 1.5 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0160$)

En otro plano de flujo, por encima del número de Reynolds crítico, la modelación casi perfecta de los datos experimentales se de nuevo por parte de la correlación de Willingham & Shah la cual para estas condiciones de flujo y está concentración de guar se ajusta de gran manera a la tendencia de los datos reales. Esta ecuación según la precisión observada para los fluidos de 20, 30 y 40 lbm/Mgal se da en función de la relación de curvatura por lo que para una misma relación de a/R y dentro de los parámetros recomendados de n y N_{Reg} se modela con un error muy pequeño.

Por otro lado, la correlación de McCann & Islas también presentó una semejanza a la tendencia de los datos experimentales acercándose a partir de un número de Reynolds de 22.000 aproximadamente. Las demás correlaciones tuvieron errores muy grandes siendo la de Zhou & Shah la más distante de todas.

- Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in) – Flujo laminar

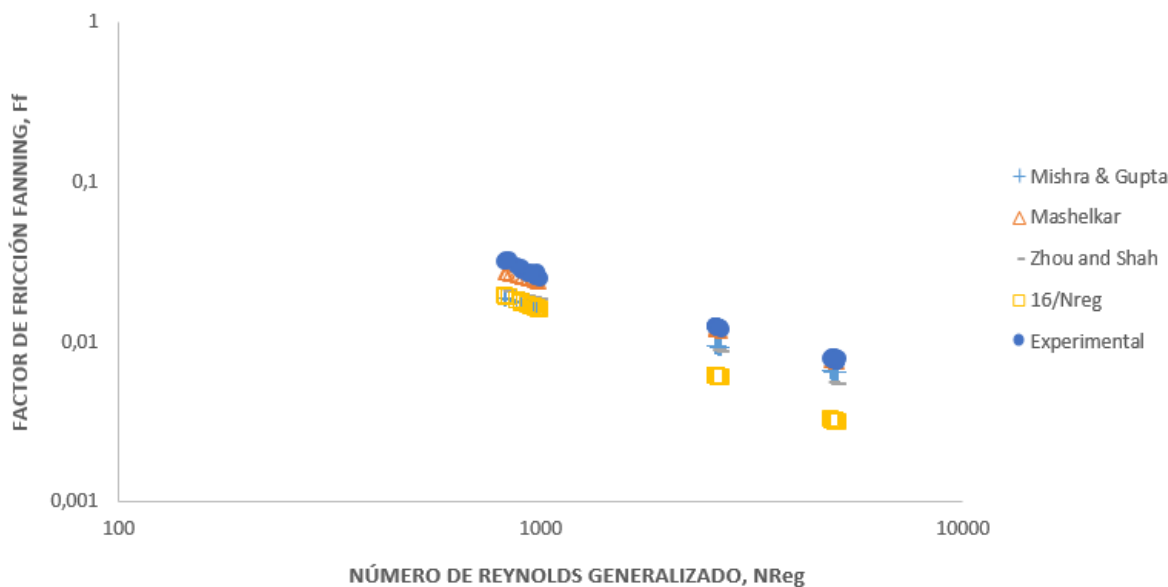


Figura 39. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen laminar. ($a/R = 0.0187$).

En un diámetro de 2.375 pulgadas y la mayor curvatura presentada en este trabajo para las condiciones de flujo mencionadas en la descripción de la figura 39, se presentó un flujo laminar, iniciando en un número de Reynolds generalizado de 819 siendo el menor graficado en todos los experimentos realizados, debido a las condiciones de flujo del fluido que presenta un perfil de velocidad bien definido, siendo modelado de manera muy certera por la correlación de Mashelkar & Devajaran basada en la aproximación de la capa límite. Se cree que la reducción de la fricción en el flujo laminar se debe a la disminución del flujo secundario por los aditivos presentes en los fluidos y claramente por los bajos caudales, ya que se acerca a la tendencia de la ecuación 6.1, la cual es para tubería recta, pero debido a las características del fluido en cuanto a la carga polimérica, el número de Reynolds generalizado por encima de 5.000, y una mayor curvatura hace que se aumente el factor de fricción.

- Tubería enrollada de 2.375 in (ID 2.058 in) – Flujo turbulento

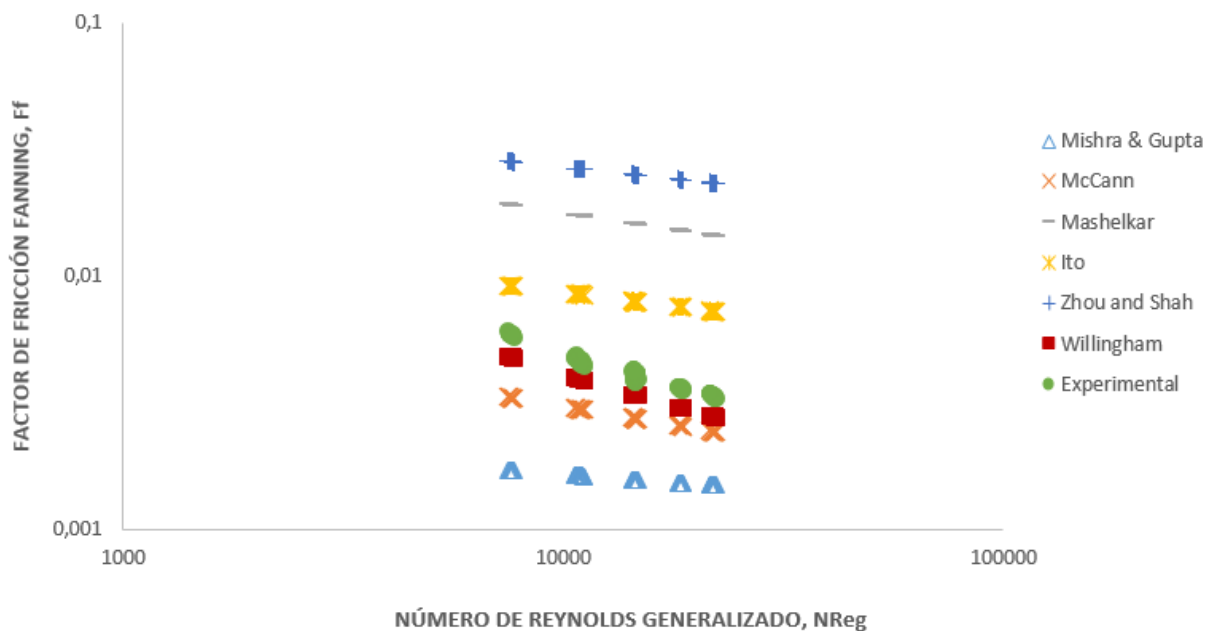


Figura 40. Factor de fricción vs número de Reynolds generalizado en tubería enrollada a 3000 ft de 2.375 in para guar a 40 lbm/Mgal, en régimen turbulento. ($a/R = 0.0187$)

Por último, para un flujo turbulento a la concentración de 40 lbm/Mgal se presenta en un rango muy corto de número de Reynolds generalizado, el cual se acoge a los valores arrojados por la correlación de Willingham & Shah, modelando mejor para este diámetro y esta relación de a/R , el cual muestra un comportamiento aceptable a medida que la curvatura se va aumentando.

Se ha notado que la correlación de Willingham & Shah tiende a modelar mejor a ciertos valores de curvatura, a medida que esta se incrementa, también aumenta el error porcentual comparado con la data experimental, es importante mantener la relación a/R para poder obtener un mejor ajuste de la correlación, en ningún artículo utilizado para este proyecto se estipula un rango determinado para a/R , vale destacar que es un criterio concluido a partir del análisis de las gráficas.

Como se ha notado a lo largo del estudio, la correlación de McCann también presenta un buen ajuste respecto a la data experimental, y tiene una particularidad similar a la correlación de Willingham, que al aumento del número de Reynolds, esta correlación tiende a modelar mejor.

6.4. Resumen de comparación de datos experimentales y correlaciones graficadas

En la tabla 7 se tabularon los datos más representativos, con el fin de detallar el porcentaje de error de los diferenciales o caídas de presión de las correlaciones para las concentraciones de 20, 30 y 40 lbm/Mgal de guar para los diámetros externos de tubería enrollada de 1, 1.5 y 2.375 pulgadas y diámetros de carretes de 72, 74 y 110 pulgadas, permitiendo identificar de una manera más directa los resultados de cada correlación con respecto a los valores experimentales que mejor se acogieron durante el análisis de cada gráfica. Además, se incluyeron otros parámetros tales como el índice de comportamiento de flujo (n), el índice de consistencia (K), Número de Reynolds generalizado, caudal, caídas de presión etc., permitiendo ver las variaciones de los parámetros en mención observando las dependencias que existe entre ellos a medida que se varía la concentración y sus diámetros.

Tabla 7. Comparación de data experimental y mejores correlaciones modeladoras

Experimento en tubería enrollada								Correlación				
Fluido (lbm/Mgal)	Caudal <i>GPM</i>	ΔP <i>Psi</i>	Longitud <i>ft</i>	ID <i>in</i>	<i>n</i>	<i>K</i> <i>lbf sⁿ/ft²</i>	<i>Ff</i>	<i>N_{Reg}</i>	<i>Ff</i>	Autor	ΔP <i>Psi</i>	Error %
20 Guar	29.6	608.1	1500	0.081	0.69	0.0013	0.00304687	19892.31	0.00290413	▲	582.6	4.68
	77	2347.5	1500	0.081	0.69	0.0013	0.00172383	69703.77	0.00181821	▲	2476.1	5.48
	31.54	278	3000	1.1822	0.70	0.0012	0.00403538	10595.97	0.00407412	▲	281.2	0.96
	146.25	2380.6	3000	1.1822	0.70	0.0012	0.00160500	77787.01	0.00181714	▲	2695.5	13.21
	29.92	42.3	3000	2.058	0.69	0.0013	0.01092227	3343.52	0.00989324	■	38.4	9.42
	240.22	632.4	3000	2.058	0.69	0.0013	0.0025243	51330.48	0.00207194	■	520	17.92
30 Guar	30.39	757.5	1500	0.081	0.603	0.00413	0.00357260	12712.79	0.00327688	▲	695.8	8.28
	90.86	3254.8	1500	0.081	0.603	0.00413	0.00171696	58609	0.00169376	▲	3211	1.35
	29.23	357.8	3000	1.1822	0.60	0.00425	0.00609854	5193.93	0.00632943	○	409.7	3.8
	135.64	2397.6	3000	1.1822	0.60	0.00425	0.00187775	44464.39	0.00203994	▲	2604.8	8.64
	29.66	71.3	3000	2.058	0.59	0.00447	0.01868833	1522.96	0.01670743	□	63.8	10.6
	256.35	832.2	3000	2.058	0.59	0.00447	0.0029035	31551.50	0.00240155	◐	951.4	17.28
40 Guar	31.37	895.6	1500	0.081	0.45	0.0158	0.00398438	11360.31	0.00339588	▲	766.4	14.77
	77.01	2953.7	1500	0.081	0.45	0.0158	0.00217544	45539.96	0.00179162	▲	2432.6	17.64
	31.49	499.8	3000	1.1822	0.45	0.0158	0.00733627	4196.68	0.00690445	□	565.6	5.89
	140.51	2798.1	3000	1.1822	0.45	0.0158	0.00204448	42597.26	0.00202965	▲	2777.9	0.73
	30.54	113.7	3000	2.058	0.45	0.0158	0.02827090	921.19	0.02487987	□	100.4	12
	235.47	807.9	3000	2.058	0.45	0.0158	0.00335060	21891.81	0.00278868	▲	672.5	16.77

Nota: ▲ Willingham & Shah, ■ Mishra & Gupta, ○ Zhou & Shah, □ Mashelkar & Devarajan, ◐ McCann & Islas,

CONCLUSIONES

- Después de un análisis riguroso durante el desarrollo del proyecto, se evidenció un claro dominio de la correlación de Willingham & Shah para el fluido guar en una tubería enrollada para el régimen turbulento, que a pesar de la variación de parámetros tales como diámetro y concentración de guar, siempre conservó esa tendencia para el modelamiento más adecuado evidenciado en su menor error porcentual frente a las demás correlaciones expuestas.
- En la tubería enrollada se desarrolla un mayor flujo turbulento con respecto a las tuberías rectas, debido a que se presenta una estructura de flujo secundario cerca de las paredes de la tubería por su curvatura, causado por las fuerzas centrífugas propias de una geometría de flujo curva, elevando el factor de fricción, por lo cual, el uso de la relación a/R es fundamental para lograr modelar el flujo en este tipo de tuberías.
- En el modelamiento de las correlaciones del flujo laminar para el guar, se nota una similitud considerable entre las correlaciones y la data experimental, brindando una mayor confiabilidad con respecto a la modelación del régimen turbulento. Para este modelamiento al encontrarse esta afinidad entre las correlaciones, se procede a comparar los valores numéricos del factor de fricción, ya que por visualización de gráficas en algunas concentraciones se hace más difícil, arrojando como la correlación más afín la de Mashelkar & Devarajan, esta correlación es la que menor error porcentual presenta a la variación de diámetros y concentraciones, prevaleciendo por encima de las demás.
- Las correlaciones empleadas para la predicción del factor de fricción en este trabajo, demostraron que la longitud no influye en los valores del cálculo de factores de fricción,

esto para una misma relación de curvatura; debido a que sus variables están relacionadas netamente al comportamiento del flujo de un fluido y a su condición empírica.

- Según la tendencia de los datos graficados a partir de las correlaciones, se notó que el comienzo del flujo turbulento (N_{Rec}) es mucho mayor en tubería flexible comparada con la tubería recta convencional.

RECOMENDACIONES

- Aplicar las correlaciones trabajadas en este proyecto a diferentes fluidos no Newtonianos, para así poder tener un mejor esquema comparativo del modelamiento acertado de las correlaciones en este tipo de fluidos.
- Se sugiere recurrir a la correlación de Willingham & Shah para la determinación del factor de fricción en tubería enrollada para régimen turbulento, debido a su gran ajuste a la variación de propiedades y parámetros de la tubería y del fluido.
- Para fluidos no Newtonianos en régimen laminar en tubería enrollada, se evidenció un gran ajuste de todas las correlaciones empleadas. Aun así, la correlación recomendada es la de Mashelkar & Devarajan, debido a que conserva una tendencia más cercana a los datos experimentales con el cambio de relaciones de curvatura y/o concentraciones de la goma guar.
- Evaluar experimentalmente los fluidos no Newtonianos en función de diferentes relaciones de curvatura, para así tener un mayor conocimiento de la dependencia o influencia de la relación a/R en el comportamiento del flujo de fluidos en tubería enrollada.
- Estudiar la afectación en las caídas de presión por fricción, cuando hay variación del diámetro interno en la tubería enrollada para un mismo carrete. Cabe destacar que para la realización de este proyecto se utilizó un diámetro interno constante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed , H., & Ali, S. (06 de 2015). Frictional Pressure Losses of Fluids Flowing in Circular Conduits: A Review. *SPE Drilling & Completion*, 129-139.
- Alva Ramirez, J., Ramirez Cortes, J., & Rosales Acosta, R. (2011). Aplicaciones de la Tubería Flexible. (*Tesis de pregrado*). INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Ciudad de México.
- Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology:Engineering Applications*. Burlington, USA: Macmillan Company.
- Dean , W. (1927). Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe. *Philos.Mag.*, 20, 208-223.
- Dean, W. (1928). The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe. *Philos.Mag.*, 30, 673-693.
- German Oilfield Equipment & Services, GOES GmbH. (2018). *.goes-well*. Obtenido de <http://www.goes-well.com>
- HALLIBURTON. (2008). Componentes de Control de Pozo. En I. Halliburton Energy Services, *Manual de Operaciones de Tubería Flexible* (pág. 169). USA.
- HALLIBURTON. (01 de 2016). *haliburton*. Obtenido de www.halliburton.com
- Intervention & Coiled Tubing Association (ICoTA). (1 de 12 de 2018). *icota.com*. Obtenido de <http://www.icota.com>
- Ito, H. (1959). Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes. *J. Basic Eng.*, 81(2), 123-134.
- Jereh Energy Services Corporation. (14 de 10 de 2013). *es.jereh-services*. Obtenido de <http://es.jereh-services.com/products/Drillingwastes1.htm>
- Metzner, A., & Reed, J. (1955). Flow of non-Newtonian Fluids - Correlations of the Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions. *AIChE Journal*, 1(4), 434 -440.
- Mishra, P., & Gupta, S. (1979). Momentum Transfer in Curved Pipes.1. Newtonian Fluids, 2. Non-Newtonian. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 18(1), 137-142.

- Montan Valverde, V. (29 de 06 de 2015). *CONTROL DE ARENA APLICADO A POZOS PETROLEROS*. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/269977623/Control-de-Arena-Aplicado-a-Pozos-Petroleros>
- PerfoBlogger. (16 de 09 de 2015). *perfob.blogspot*. Obtenido de <http://perfob.blogspot.com/2015/09/operaciones-y-equipos-de-coiled-tubing.html>
- Schlumberger. (2002). Aislamiento y estimulación selectivo. *Oilfield Review*, 65-66.
- Snyder, R. (02 de 2005). *world oil*. Obtenido de <http://www.worldoil.com/magazine/>
- Srinivasan, P., Nandapurkar, S., & Holland, F. (1970). Friction Factors for Coils. *Trans. Instn. Chem. Eng*, 48(4-6), T156-T161.
- Stewart & Stevenson. (01 de 04 de 2017). *Stewart and Stevenson*. Obtenido de <http://www.stewartandstevenson.com>
- Wild Well Control. (2014). *Wild Well*. Obtenido de <https://wildwell.com/wp-content/uploads/Coiled-Tubing-Spanish.pdf>
- Willingham, J., & Shah, S. (04 de 2000). Friction Pressures of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Straight and Reeled Coiled Tubing. *Paper SPE 60719*.
- Zhou, Y. (2006). THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF POWER LAW FLUID FLOW IN COILED TUBING. (*Doctoral Thesis*). UNIVERSITY OF OKLAHOMA, Norman, Oklahoma.
- Zhou, Y., & Shah, S. (06 de 2004). Fluid Flow in Coiled Tubing: A Literature Review and Experimental Investigation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 43(6), 52-61.