



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 20 de enero de 2023

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Juan Pablo Tovar Cruz, con C.C. No. 1075281381,

Edgar Leonel Perdomo Cuellar, con C.C. No.1075290631,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado: Análisis comparativo de la reología de fluidos de perforación bajos en sólidos, usando el método convencional rotatorio y el reómetro de tubos, presentado y aprobado en el año 2022 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:

Juan Pablo Tovar C.

Firma:

Edgar Leonel Perdomo

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

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

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Análisis comparativo de la reología de fluidos de perforación bajos en sólidos, usando el método convencional rotatorio y el reómetro de tubos

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
TOVAR CRUZ	JUAN PABLO
PERDOMO CUELLAR	EDGAR LEONEL

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	CONSTANZA

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

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2022

NÚMERO DE PÁGINAS: 104

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

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

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

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

Inglés

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 1. Métodos capilares | Capillary methods |
| 2. Reología | Rheology |
| 3. Reómetro de tubos | Tube rheometer |
| 4. Viscosímetro | Viscometer |
| 5. Viscosificante | Viscosifier |

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Con el objetivo de explorar las capacidades de caracterización reológica de los reómetros de tubos y la posible practicidad de la información resultante de las pruebas realizadas en el mismo, el equipo procedió a desarrollar pruebas de laboratorio empleando tanto el reómetro de tubos de la Universidad Surcolombiana como el viscosímetro Fann 35A, siendo este la herramienta estándar de la industria con respecto a mediciones reológicas; no sin antes llevar a cabo pruebas preliminares para determinar que las formulaciones empleadas fueran competentes según estándares de la industria, para luego proceder a efectuar la caracterización de los fluidos según cada método y la correspondiente comparación entre los resultados obtenidos en cada caso. Los fluidos manejados incluyen dos formulaciones de fluidos de perforación no dispersos bajos en sólidos de composición convencional y dos formulaciones de fluidos que buscan lograr un desempeño similar al de los anteriores mediante el uso de un aditivo de cáscara de sábila que actúa como viscosificante, el cual fue diseñado en la Universidad Surcolombiana y se logró estudiar con un mayor grado de detalle a lo largo de este trabajo. Tras el análisis de los resultados se observó el favorable grado de practicidad del reómetro de tubos, limitado a su vez por debilidades en su actual montaje y calibración. Además, se logró identificar a la cáscara de sábila como un aditivo viable y económico para mejorar la reología de un fluido de perforación.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

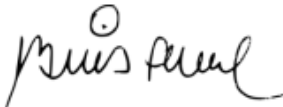
PÁGINA

3 de 3

With the objective of exploring the capabilities of tube rheometers in rheological characterization and the possible practicality of data resulting from tests performed on it, the team proceeded to carry out laboratory tests using both the tube rheometer found in Surcolombiana University as well as the Fann 35A viscometer, being this one the standard tool in the industry in respect to rheological measurements; not without doing preliminary tests in order to determine that the used formulations were competent according to industry standards, so as to then proceed to characterize the fluids through the use of each method and to effect the corresponding comparison of the results obtained in both cases. The fluids used include two formulations of solid non-disperse fluids of conventional composition and two formulations of fluids that seek to achieve a similar performance of the previously mentioned ones through the use of an aloe vera shell additive that acts as a viscosifier, which was designed at Surcolombiana University and was able to be studied with a higher degree of detail throughout this work. After the analysis of the results, a favorable grade of practicality was observed for the tube rheometer, limited at the same time by its current assembly and calibration. Also, the identification of aloe vera shell as a viable and economical additive to improve the rheology of a drilling mud.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Luis Fernando Bonilla

Firma: 

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma: 

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA REOLOGÍA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN
BAJOS EN SÓLIDOS, USANDO EL MÉTODO CONVENCIONAL ROTATORIO Y EL
REÓMETRO DE TUBOS.

JUAN PABLO TOVAR CRUZ
CÓD. 20121109103

EDGAR LEONEL PERDOMO CUELLAR
CÓD. 20121107771



Universidad Surcolombiana.
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Petróleos
Marzo 2020.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA REOLOGÍA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN
BAJOS EN SÓLIDOS, USANDO EL MÉTODO CONVENCIONAL ROTATORIO Y EL
REÓMETRO DE TUBOS.

JUAN PABLO TOVAR CRUZ
CÓD. 20121109103

EDGAR LEONEL PERDOMO CUELLAR
CÓD. 20121107771

Trabajo presentado para obtener el título de:
Ingeniero de Petróleos

Directora:
Mg. Constanza Vargas Castellanos



Universidad Surcolombiana.
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Petróleos
Marzo 2020.

RESUMEN

Con el objetivo de explorar las capacidades de caracterización reológica de los reómetros de tubos y la posible practicidad de la información resultante de las pruebas realizadas en el mismo, el equipo procedió a desarrollar pruebas de laboratorio empleando tanto el reómetro de tubos de la Universidad Surcolombiana como el viscosímetro Fann 35A, siendo este la herramienta estándar de la industria con respecto a mediciones reológicas; no sin antes llevar a cabo pruebas preliminares para determinar que las formulaciones empleadas fueran competentes según estándares de la industria, para luego proceder a efectuar la caracterización de los fluidos según cada método y la correspondiente comparación entre los resultados obtenidos en cada caso. Los fluidos manejados incluyen dos formulaciones de fluidos de perforación no dispersos bajos en sólidos de composición convencional y dos formulaciones de fluidos que buscan lograr un desempeño similar al de los anteriores mediante el uso de un aditivo de cáscara de sábila que actúa como viscosificante, el cual fue diseñado en la Universidad Surcolombiana y se logró estudiar con un mayor grado de detalle a lo largo de este trabajo. Tras el análisis de los resultados se observó el favorable grado de practicidad del reómetro de tubos, limitado a su vez por debilidades en su actual montaje y calibración. Además, se logró identificar a la cáscara de sábila como un aditivo viable y económico para mejorar la reología de un fluido de perforación.

Palabras clave: métodos capilares, reología, reómetro de tubos, viscosímetro, viscosificante.

ABSTRACT

With the objective of exploring the capabilities of tube rheometers in rheological characterization and the possible practicality of data resulting from tests performed on it, the team proceeded to carry out laboratory tests using both the tube rheometer found in Surcolombiana University as well as the Fann 35A viscometer, being this one the standard tool in the industry in respect to rheological measurements; not without doing preliminary tests in order to determine that the used formulations were competent according to industry standards, so as to then proceed to characterize the fluids through the use of each method and to effect the corresponding comparison of the results obtained in both cases. The fluids used include two formulations of low-solid non-disperse fluids of conventional composition and two formulations of fluids that seek to achieve a similar performance of the previously mentioned ones through the use of an aloe vera shell additive that acts as a viscosifier, which was designed at Surcolombiana University and was able to be studied with a higher degree of detail throughout this work. After the analysis of the results, a favorable grade of practicality was observed for the tube rheometer, limited at the same time by its current assembly and calibration. Also, the identification of aloe vera shell as a viable and economical additive to improve the rheology of a drilling mud.

Key words: capillary methods, rheology, tube rheometer, viscometer, viscosifier.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS LISTA DE ECUACIONES

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. REOLOGÍA

3.2. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

3.3. SÁBILA COMO VISCOSIFICANTE

4. FORMULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN BAJO EN SÓLIDOS

4.1. FLUIDOS CON ADITIVOS CONVENCIONALES

4.1.1. FORMULACIÓN DE FLUIDOS CONVENCIONALES

4.1.2. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE FLUIDOS CONVENCIONALES

4.2. FLUIDOS CON SÁBILA COMO VISCOSIFICANTE

4.2.1. FORMULACIÓN DE FLUIDOS CON SÁBILA

4.2.2. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE FLUIDOS CON SÁBILA

5. MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS

5.1. MEDICIÓN CON VISCOSIMENTRO ROTATORIO

5.1.1. FLUIDOS CONVENCIONALES

5.1.2. FLUIDOS CON SÁBILA

5.2. MEDICIÓN CON REÓMETRO DE TUBOS

5.2.1. FLUIDOS CONVENCIONALES

5.2.2. FLUIDOS CON SÁBILA

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. RESULTADOS CON VISCOSÍMETRO ROTACIONAL

- 6.1.1. FLUIDOS CONVENCIONALES
- 6.1.2. FLUIDOS CON SÁBILA
- 6.2. RESULTADOS CON REOMETRO DE TUBOS
 - 6.2.1. FLUIDOS CONVENCIONALES
 - 6.2.2. FLUIDOS CON SÁBILA
- 6.3. ANÁLISIS COMPARATIVO
- 7. CONCLUSIONES
 - 7.1. FLUIDOS CONVENCIONALES: COMPARACION VR Y RT
 - 7.2. FLUIDOS CON SABILA: COMPARACION VR Y RT
 - 7.3. CONCORDANCIA ENTRE VR Y RT
- 8. RECOMENDACIONES
- 9. BIBLIOGRAFIA
- 10. ANEXOS

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización reológica de fluidos de perforación es un ámbito de vital importancia en la industria del petróleo, siendo de utilidad para predecir el comportamiento y la eficiencia de un fluido en condiciones de pozo, que incluyen geología, temperatura y presión, entre otras.

Desde hace décadas, y aún en la actualidad, se viene explorando y detallando una variedad de métodos de medición de propiedades reológicas; sin embargo, la industria de hidrocarburos es conocida por tener una muy clara preferencia por uno de estos, el de reometría rotacional, gracias a su practicidad y a tener la capacidad de detallar los rangos operacionales generalmente relacionados con los modelos deseados. No obstante, existe un método poco explorado que, al inspeccionarse más detalladamente, evidencia un importante potencial en lo que a lodos respecta.

Un reómetro capilar es un sistema que recolecta datos de caudales y presiones dentro de una tubería a través de la cual fluye un fluido específico, lo anterior resultando en la obtención de una muestra lo suficientemente extensiva para crear un respectivo reograma, esto es, una gráfica que describe el comportamiento del esfuerzo de corte ejercido por el fluido mientras varía la velocidad de corte. De esta manera, es posible identificar tendencias y predecir el nivel de eficiencia que un lodo tendría según el propósito programado.

Para poner a prueba el método de reometría capilar aplicado a la reometría en tubos y profundizar acerca sus capacidades al manejar fluidos de perforación, se utilizó el reómetro de tubos presente en el Laboratorio de Fluidos de Perforación y Completamiento de la Universidad Surcolombiana, llevando a cabo pruebas donde se varía el caudal, la temperatura, los diámetros de tubería y la composición.

En cuanto a fluidos, se emplearon dos lodos de perforación no dispersos bajos en sólidos con una formulación convencional según estándares industriales, así como dos fluidos similares en composición a los anteriores, pero con la diferencia de utilizar un aditivo de cáscara de sábila pulverizada haciendo las veces de viscosificante, este aditivo fue desarrollado por investigadores de la Universidad Surcolombiana y este trabajo explotó la posibilidad de estudiar más detalladamente el rendimiento reológico del mismo.

Una vez realizadas las pruebas y generados los reogramas respectivos, el análisis de los mismos evidenció que los lodos de formulación convencional exhiben, tanto en el reómetro rotacional como en el de tubos, un comportamiento correspondiente al modelo de Ley de Potencia que concuerda con el esperado en un fluido de este tipo; mientras que los lodos con aditivo de sábila se acoplaron, según ambos métodos, al mismo modelo pero exhibieron adicionalmente una dilatancia indeseada en valores de rata de corte altos. Por otra parte, al observar los reogramas arrojados por el reómetro de tubos, sobresalió la presencia de una región ausente de puntos en los valores más bajos de la rata de corte.

La comparación de los diferentes grupos de resultados obtenidos en cada método permitió establecer que el reómetro rotacional provee mayor practicidad en el proceso

de medición, mientras el reómetro de tubos ofrece superior precisión y variedad en los resultados.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis comparativo de la reología de fluidos de perforación bajos en sólidos, usando el método convencional rotatorio y el reómetro de tubos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el comportamiento reológico de fluidos de perforación bajos en sólidos por los métodos rotatorio y de tubos.
- Caracterizar el comportamiento reológico de un aditivo natural para fluidos de perforación base agua (aloe vera) por los métodos rotatorio y de tubos.
- Analizar el comportamiento reológico de los fluidos y establecer el tipo de concordancia que presentan los métodos rotatorio y de tubos.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. REOLOGÍA

La reología se define como “el estudio de la deformación y el flujo de la materia” (Chevron, 2009, p. 5), aspectos que conllevan importancia en el campo de los fluidos de perforación al comportamiento físico de los mismos en su trayecto a lo largo de la sarta de perforación, el espacio anular y las facilidades de pozo, teniendo en cuenta dentro de esto a la forma como responden al entrar en contacto con la formación rocosa transcurrida y sus respectivos recortes, tanto al estar en movimiento como al estar estático al detener la circulación.

“La información obtenida de mediciones reológicas puede ser usada para determinar la eficiencia en la limpieza del pozo, pérdidas de presión en el sistema, presión de suaveo y surgencia, densidad equivalente en circulación e hidráulica en broca.” (Chevron, 2009, p. 5)

Algunos factores como la porosidad, la permeabilidad y la presión determinan cómo se comportará un yacimiento, mientras que la densidad y la viscosidad del petróleo son las propiedades que establecen el comportamiento del flujo del aceite, pues en base a estos parámetros se seleccionará el método de producción que permita un mayor factor de recuperación, es decir, aumentando el porcentaje de aceite que será posible extraer del volumen original.

Los aceites pesados y extrapesados presentan grandes retos en cuanto a su producción y procesamiento. Un paso decisivo en la determinación del mejor método de extracción, producción y procesamiento del petróleo pesado y extrapesado es la caracterización de las propiedades reológicas de los fluidos. Para la clasificación de las reservas y la selección de los intervalos de muestreo, las compañías petroleras recurren a la medición de las propiedades de los fluidos del pozo, especialmente la viscosidad.

Conocer el comportamiento de la viscosidad del aceite en todo el yacimiento, es vital para el modelado de la producción y la predicción del factor de recuperación de reservas, dado que ésta propiedad determina que tan fácil fluirá el aceite. Sin embargo la viscosidad del petróleo puede exhibir grandes variaciones dentro de la misma formación, ocasionada por la presión, temperatura y composición de aceite. (Reyes, 2012, p. 66)

Este trabajo se enfoca específicamente en la reología de fluidos de perforación y la importancia que esta tiene para realizar principalmente la labor de limpieza de pozo, sin dejar de lado otras de sus propiedades como la gelificación y la creación de un revoque.

Características reológicas de los fluidos de perforación

Las principales propiedades medidas en cuanto a la reología de un fluido de perforación o “lodo” se refiere son: la viscosidad plástica, el punto de cedencia y los esfuerzos de geles.

La viscosidad plástica (VP) es una propiedad que refleja la concentración física, tamaño y forma de partículas sólidas en el lodo en adición a la viscosidad de la fase continua.

Ésta aumentará con cualquier incremento en el contenido de sólidos, independientemente de la función que estos tengan en la formulación del fluido.

Existe una correlación directa entre pesos de lodo altos y valores altos de VP, sin embargo, una tendencia a aumentar por parte de la VP al permanecer constante el peso usualmente representa una advertencia temprana del aumento de sólidos ultra-finos, lo cual amerita su control.

Altos valores de VP pueden causar altas presiones de circulación al interior de la sarta de perforación y a través de la broca. Estos son disminuidos al reducir la concentración de sólidos en el lodo, pero deben descartarse métodos que impliquen reducir el tamaño de partícula, ya que esto incrementa el área superficial, lo cual a su vez incrementa el arrastre por fricción. Por lo tanto, los mecanismos empleados para reducir la concentración de sólidos son dilución o separación mecánica, de manera que mientras la viscosidad del fluido base disminuye con el aumento de la temperatura, la VP disminuye proporcionalmente.

El agua emulsificada en Fluidos No-Acuosos (FNA) actúa como un sólido y, por consiguiente, incrementa la VP. Los cambios en la temperatura de un FNA también se verán reflejados en la lectura de VP. Por ejemplo, la VP disminuirá con el aumento de la temperatura y viceversa.

Los impactos operacionales de la viscosidad plástica son:

- Cualquier incremento en la VP, bien sea causado por materiales como barita, hematita o carbonato de calcio añadidos intencionalmente al sistema o un aumento de recortes finos debido a equipo de control ineficiente o tasas de dilución inadecuadas, puede impactar negativamente la tasa de penetración.
- Según aumenta la VP, la densidad equivalente de circulación también aumentará.
- Cuando la VP aumenta, también lo harán las presiones de suaveo y surgencia.
- Cuando hay incrementos en la VP debido a la acumulación de recortes finos, la probabilidad de ocurrencia de pega diferencial aumentará, especialmente en un fluido de perforación base agua. Además de un incremento en la VP, podría haber un incremento correspondiente en la cantidad de sólidos reactivos tal como lo determina la prueba de azul de metileno (Chevron, 2009, p. 7-9).

El punto de cedencia (PC) o Yield Point, es una medida de las fuerzas de atracción presentes entre las partículas coloidales del lodo. Estas incluyen arcillas reactivas, como bentonita y polímeros que son añadidos al sistema, así como acumulación de recortes finos ricos en arcillas. Este parámetro es un componente útil de la viscosidad y proporciona una indicación de la habilidad del fluido para transportar recortes fuera del pozo de manera eficiente.

El valor del PC está directamente relacionado a la pérdida de presión friccional de los fluidos en flujo laminar, los cuales se ven afectados por esta interacción en particular, a su vez afectando las pérdidas de presión en el anular y la densidad equivalente de

circulación. En general, la reología de lodos debería estar diseñada utilizando productos que mejoran el punto de cedencia a bajas ratas de corte. Se debe tener en cuenta que un PC alto no necesariamente equivale a una limpieza de pozo adecuada.

En fluidos base agua, contaminantes como sal, anhídrita y dióxido de carbono, así como los ambientes de altas temperaturas, incrementarán el PC. La adición de cal o soda cáustica pueden también incrementar el PC en sistemas base agua que usen arcillas, especialmente si han sido objeto de sobre-tratamiento. Los contaminantes siempre deben ser identificados y tratados tan pronto como sea posible: sin embargo, el uso de adelgazantes y/o dilución puede ser una solución temporalmente efectiva hasta que el contaminante sea neutralizado.

Los impactos operacionales del PC incluyen:

- Con el incremento del PC suele haber un incremento en la densidad equivalente de circulación. Si se asumen todos los parámetros como iguales, este aumento se presenta en mayor medida cuando se usa un fluido no acuoso que cuando se usa un fluido base agua. Lo anterior debido parcialmente a la compresibilidad y la viscosidad cinemática del aceite base que se esté usando.
- Usualmente mientras mayor sea el diámetro del agujero perforado, mayor deberá ser el PC para llevar a cabo una limpieza de pozo eficiente. (Chevron, 2009, p. 9-11)

Las mediciones de los esfuerzos de geles muestran tanto la velocidad como el grado en el cual las partículas reactivas en un fluido de perforación interactúan en un fluido estático para formar una estructura de gel. Dichas mediciones son importantes para mantener la suspensión de barita y recortes cuando la circulación es detenida.

Esfuerzos de geles altos en lodos base agua pueden ser el resultado de contaminantes químicos como cemento, cal, anhídrita, yeso, gases ácidos como dióxido de carbono (CO₂) y sulfato de hidrogeno (H₂S), sal y bacterias. En fluidos no acuosos, estos esfuerzos son generalmente el resultado de una acumulación de sólidos finos reactivos o del sobretratamiento con agentes gelificantes organofílicos y no de contaminación química.

Los impactos operacionales de los esfuerzos de geles son:

- Esfuerzos de geles altamente progresivos pueden conducir a altas presiones de iniciación de las bombas de lodo requeridas para romper circulación luego de que el lodo en el agujero ha permanecido estático por un período de tiempo, tal como después de un viaje de pozo. Estas altas presiones podrían resultar en fracturas a la formación, causando pérdida de circulación.
- Los fluidos que exhiben esfuerzos de geles ultra bajos no lograrán suspender recortes de manera adecuada. Lo anterior puede resultar en llenado del pozo luego de realizar viajes y conexiones, desempaque de la sarta causando pérdida de circulación, así como sedimentación de recortes en el fondo de pozos direccionales.

- Esfuerzos de geles bajos pueden producir hundimiento de barita en lodos densificados. Esta situación se hace evidente por las grandes fluctuaciones en la densidad del lodo que sale del pozo. Este fenómeno es más notorio en pozos direccionales luego de un viaje de pozo (Chevron, 2009, p. 11-12).

Tipos de fluidos

Fluidos pseudoplásticos. Estos fluidos se caracterizan por una viscosidad aparente que disminuye al aumentar la tasa de corte. Tanto a muy bajas como a muy altas tasas de corte, la mayoría de las soluciones de polímeros pseudoplásticos y materiales fundidos muestran un comportamiento newtoniano, es decir, los diagramas de tasa de corte por esfuerzo de corte se convierten en líneas rectas. Los valores resultantes de la viscosidad aparente a tasas de corte muy bajas y altas se conocen como viscosidad de corte cero, μ_0 , y la viscosidad de corte infinito, μ^∞ , respectivamente. Por lo tanto, la viscosidad aparente de un fluido pseudoplástico disminuye de μ_0 a μ^∞ al aumentar la tasa de corte. Los valores de las tasas de corte que marcan el inicio de las viscosidades limitantes superior e inferior dependen de varios factores, como el tipo y la concentración del polímero, su distribución de peso molecular y la naturaleza del disolvente, etc. En general, el rango de velocidad de corte sobre cuya viscosidad aparente es constante (en la región de tasa de corte cero) aumenta a medida que disminuye el peso molecular del polímero, a medida que su distribución de peso molecular se hace más estrecha y a medida que disminuye la concentración del polímero (en solución). De manera similar, la tasa de disminución de la viscosidad aparente con la tasa de corte también varía de un material a otro (Richardson, 2008, p. 5-7).

Fluidos viscoplásticos. Este tipo de comportamiento del fluido se caracteriza por la existencia de un esfuerzo de cedencia (τ_0), que debe superarse antes de que el fluido se deforme o fluya. Inversamente, dicho material se deformará elásticamente (o fluirá en masa como un cuerpo rígido) cuando el esfuerzo aplicado externamente sea más pequeño que el esfuerzo de cedencia. Una vez que la magnitud del esfuerzo externo ha excedido el valor del esfuerzo de cedencia, la curva de flujo puede ser lineal o no lineal pero no pasará por el origen. Por lo tanto, en ausencia de efectos de tensión superficial, tal material no se nivelará bajo la gravedad para formar una superficie libre absolutamente plana. Sin embargo, se puede explicar este tipo de comportamiento fluido postulando que la sustancia en reposo consiste en estructuras tridimensionales de suficiente rigidez para resistir cualquier tensión externa menor que τ_0 . Sin embargo, para niveles de esfuerzo superiores a τ_0 , la estructura se descompone y la sustancia se comporta como un material viscoso. En algunos casos, se ha encontrado que la acumulación y descomposición de la estructura es reversible, es decir, la sustancia puede recuperar su valor inicial del esfuerzo de cedencia (Richardson, 2008, p. 12).

Fluidos dilatantes. Los fluidos dilatantes son similares a los sistemas pseudoplásticos en que no muestran un esfuerzo de cedencia pero su viscosidad aparente aumenta con el aumento de la tasa de corte. Este tipo de comportamiento de fluidos se observó originalmente en suspensiones concentradas y una posible explicación para su comportamiento dilatante es la siguiente: en reposo, el vacío es mínimo y el líquido

presente es suficiente para llenar el espacio vacío. A ratas de corte bajas, el líquido lubrica el movimiento de cada partícula más allá de otras y, por consiguiente, los esfuerzos resultantes son más pequeños. Por otro lado, a altas ratas de corte, el material se expande o se dilata ligeramente (como también se observa en el transporte de dunas de arena), de modo que ya no hay líquido suficiente para llenar el espacio vacío incrementado y evitar contactos directos sólido-sólido, lo que resulta en un aumento de la fricción y mayores esfuerzos de corte. Este mecanismo hace que la viscosidad aparente aumente rápidamente al aumentar la rata de corte (Richardson, 2008, p. 14-16).

Modelos reológicos

Plástico de Bingham. El modelo de fluido más utilizado para determinar la reología de un fluido no newtoniano es el modelo de plástico de Bingham. Con este modelo, se supone que la velocidad de corte es una función de línea recta del esfuerzo cortante. El modelo de plástico de Bingham produce resultados aceptables para un diagnóstico de lodo de perforación, mientras que no es lo suficientemente preciso para los cálculos hidráulicos (Drilling Formulas, 2016).

Es la ecuación más simple usada para describir el comportamiento de flujo con un esfuerzo de cedencia y, en términos de corte constante unidimensional, se escribe:

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_0^B + \mu(\dot{\gamma}_{yx}) \quad \text{para} \quad |\tau_{yx}| > |\tau_0^B| \\ \dot{\gamma}_{yx} &= 0 \quad \quad \quad \text{para} \quad |\tau_{yx}| < |\tau_0^B| \end{aligned}$$

Ecuación 3.1. Ecuación para el modelo plástico de Bingham. (Richardson, 2008, p. 13).

Frecuentemente, los parámetros τ_0^B y μ_B tratan como constantes de ajuste de curvas independientemente de que el fluido posea un esfuerzo de cedencia (Richardson, 2008, p. 13).

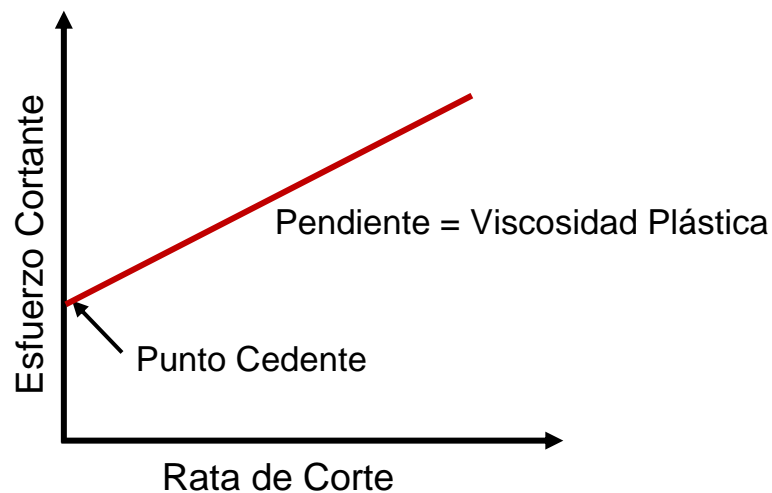


Figura 3.1: Modelo plástico de Bingham. DrillingFormulas.com. (2016).

Ley de la Potencia o Ostwald de Waele. La relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte (trazada en coordenadas logarítmicas dobles) para un fluido a menudo se puede aproximar mediante una línea recta sobre un rango limitado de velocidad de corte (o esfuerzo). Para esta parte de la curva de flujo, se aplica una expresión de la siguiente forma:

$$\tau_{yx} = m(\dot{\gamma}_{yx})^n$$

Ecuación 3.2. Ecuación para el modelo de la Ley de Potencia.
(Richardson, 2008, p. 9).

Por lo tanto, la viscosidad aparente del fluido de la ley de potencia viene dada por:

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = m(\dot{\gamma}_{yx})^{n-1}$$

Ecuación 3.3. Ecuación de la viscosidad aparente en el modelo de Ley de Potencia.
(Richardson, 2008, p. 9).

Donde si n es menor a 1, el fluido exhibe propiedades pseudoplásticas; si n es igual a 1, el fluido muestra un comportamiento Newtoniano; y si n es mayor a 1, el fluido muestra un comportamiento dilatante.

En estas ecuaciones, m y n son dos parámetros empíricos de ajuste de curvas y se conocen como la consistencia del fluido y el índice de comportamiento de flujo respectivamente. Para un fluido pseudoplástico, el índice puede tener cualquier valor entre 0 y 1. Mientras el valor de n sea menor, mayor será el grado de pseudoplasticidad. Para un fluido dilatante, el índice n será mayor a la unidad. Cuando n es igual a 1, las ecuaciones usadas se ven reducidas a la ecuación que describe el comportamiento de los fluidos Newtonianos.

Aunque el modelo de ley de potencia ofrece la representación más simple del comportamiento de la pseudoplasticidad, tiene varias deficiencias. En general, se aplica solo a un rango limitado de velocidades de corte y, por lo tanto, los valores ajustados de m y n dependerán del rango de velocidades de corte consideradas. Además, no es capaz de predecir las viscosidades aparentes a esfuerzos de corte cero e infinito.

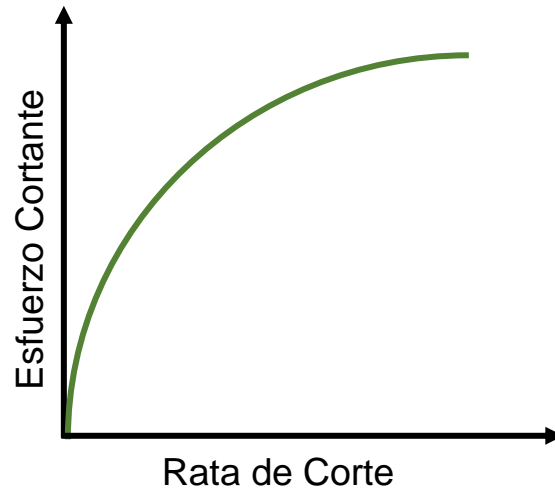


Figura 3.2: Modelo de la Ley de Potencia. DrillingFormulas.com. (2016).

Finalmente, es de notar que las dimensiones del coeficiente de consistencia de flujo, m , dependen del valor numérico de n y, por lo tanto, los valores de m no deben compararse cuando los valores de n difieren. Por otro lado, el valor de m puede verse como el valor de la viscosidad aparente a la rata de corte de la unidad y, por lo tanto, dependerá de la unidad de tiempo empleada. A pesar de estas limitaciones, este es quizás el modelo más utilizado en la literatura sobre aplicaciones de ingeniería de procesos (Richardson, 2008, p. 9).

Herschel-Bulkley. “El Herschel Bulkley es un modelo que mejora el de la Ley de Potencia para igualar el comportamiento real del fluido de perforación a una baja tasa de corte al asumir un valor de esfuerzo de corte inicial.” (Drilling Formulas, 2016).

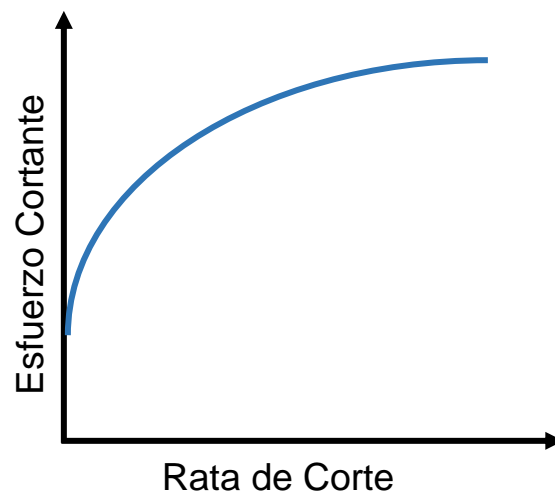


Figura 3.3: Modelo plástico de Bingham. DrillingFormulas.com. (2016).

Este modelo a su vez representa una simple generalización del modelo plástico de Bingham para abarcar la curva (para $|\tau_{yx}| > |\tau_0^H|$) de flujo no lineal mediante el uso de tres constantes. En el caso de movimiento cortante constante unidimensional se escribe cómo:

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_0^H + m(\dot{\gamma}_{yx}) & \text{para } |\tau_{yx}| > |\tau_0^H| \\ \dot{\gamma}_{yx} &= 0 & \text{para } |\tau_{yx}| < |\tau_0^H| \end{aligned}$$

Ecuación 3.4. Ecuación para el modelo de Herschel - Bulkley.
(Richardson, 2008, p. 14).

Se resalta que, en este caso, las dimensiones de m dependen del valor de n . El significado físico de m y n menor a 1 es similar al que poseen en la ecuación de la ley de potencia. Con el uso del tercer parámetro, éste modelo provee un ajuste mejor al de algunos datos experimentales (Richardson, 2008, p. 13).

Medición de parámetros reológicos (Pascual, 2016, p. 38-40)

El reómetro es un instrumento que mide el esfuerzo y la deformación de un material. El viscosímetro es un caso especial del reómetro que mide únicamente la función de cizallamiento estacionario de la viscosidad.

Más concretamente, un reómetro es un instrumento de laboratorio que se usa para medir la forma en que fluye un líquido, mezcla o suspensión bajo la acción de fuerzas externas. Se emplea para fluidos que no pueden definirse con un único valor de viscosidad y por tanto requieren más parámetros que los que puede proporcionar un viscosímetro. Se emplean para fluidos que no pueden definirse con un valor de viscosidad.

Sin embargo, el viscosímetro mide el índice de fluidez. El índice de fluidez es una prueba reológica básica, consiste en tomar una cantidad de polímero a una temperatura conocida por encima de su temperatura de transición vítrea (temperatura a la que el polímero disminuye su densidad, dureza y rigidez, además su porcentaje de elongación disminuye de forma drástica.) y obligarlo con la fuerza de gravedad junto a un peso, a fluir a través de un orificio por un tiempo determinado.

Un reómetro mide y analiza los cambios en la estructura reológica de un material, es decir la forma del flujo de los fluidos. Esto se logra mediante la variación de tasas de corte en incremento de micro revoluciones por minuto (0.1 rpm). Dicho instrumento puede analizar el límite elástico del material y el comportamiento del flujo del material que se está analizando, en respuesta al estrés en comparación con la tensión durante las pruebas a velocidad constante y los cambios de viscosidad como una función de cambio a la velocidad de corte. (Pascual, 2016, p. 38-40).

Viscosímetro rotacional. En este instrumento, el sistema de medición consiste de dos superficies rígidas, simétricas y coaxiales entre las cuales se coloca el fluido cuya

viscosidad se desea medir. Una de estas superficies deberá girar a una velocidad angular constante, mientras que el otro permanece en reposo. El sistema de medición deberá ser tal que la velocidad de corte se pueda definir para cada medición.

Un dispositivo de medición de torque está conectado a una de las superficies, lo que permite determinar el torque necesario para vencer la resistencia viscosa del fluido.

Los sistemas de medición apropiados son: los sistemas de cilindros coaxiales y los sistemas de cono y placa, entre otros. Las dimensiones del sistema de medición quedarán registrados de tal manera que satisfacen las condiciones específicas que a continuación se mencionan, que tienen por objeto asegurar un campo de flujo geoméricamente semejantes para todos los tipos de medición y todos los tipos comunes del instrumentos básicos.

El instrumento es diseñado para permitir que los rotores y estatores puedan montarse, para la generación de un rango de frecuencias de rotación definidas (en forma escalonada o continuamente variable), y para medir el torque resultante, o viceversa (es decir, la generación de un torque definido y medición de la frecuencia de rotación resultante).

El aparato tendrá una exactitud de medición del torque de un 2% de la lectura de escala completa. Dentro del rango normal de trabajo del instrumento, la exactitud de la frecuencia de rotación medida debe estar dentro del 2% del valor medido. La repetitividad de las mediciones de viscosidad será del $\pm 2\%$.

El rango de velocidades de corte varía en gran medida. La elección de un instrumento en particular, se efectúa considerando el rango de viscosidades y velocidades de corte a medir.

El sistema de medición consta de una taza (es decir, el cilindro exterior con una base cerrada) y un bob (es decir, el cilindro interior con el eje). El bob puede actuar como el rotor y la copa como el estator, o viceversa. (Reyes, 2012, p. 50-51).

Las mediciones reológicas se hacen generalmente en un viscosímetro rotativo de 6 velocidades. La velocidad de corte se mide a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 revoluciones por minuto (rpm). El VP se calcula como la diferencia en las lecturas del reómetro de 600 y 300 rpm (lectura de 600 rpm - lectura de 300 rpm) (Chevron, 2009, p. 7).

El YP se define como la lectura de 300 rpm menos el VP. Es importante tener en cuenta que el YP a bajos esfuerzos de corte no necesariamente implica estar indicado por las lecturas de 6 y 3 rpm, pero esas son las mediciones disponibles con el reómetro de 6 velocidades. En ocasiones, especialmente cuando se perforan orificios de gran diámetro (≥ 12.25 pulgadas), las lecturas de 6 y 3 rpm serán las tasas de corte que deben controlarse porque proporcionan una mejor indicación de la capacidad de limpieza de pozos del fluido de perforación. (Chevron, 2009, p. 9-10).

Las mediciones de esfuerzos de geles se realizan en un reómetro utilizando la velocidad de 3 rpm y las lecturas se toman después de agitar el lodo a 600 rpm para romper todos los geles. Se toma una primera lectura después de que el lodo ha estado estático durante 10 segundos, durante 10 minutos y durante 30 minutos. También es muy recomendable

tomar una lectura de 30 minutos para asegurarse de que no es probable que el lodo se gelifique excesivamente durante largos períodos estáticos, como en un cambio de broca.

Los fluidos de perforación a base de agua deben desarrollar una resistencia inicial del gel baja y rápida (10 segundos), por lo general justo por encima del valor de 3 rpm y deben permanecer relativamente planos con el tiempo. Para fluidos no-acuosos, las lecturas típicas de resistencia del gel pueden ser 8 (10 segundos) y 12 (10 minutos), representadas como 8/12, respectivamente. Las lecturas de resistencia del gel similares a 3/30 o 9/55 se considerarían progresivas e indeseables en un fluido de perforación normal (Chevron, 2009, p. 11).

Viscosímetro de Tubos. Un reómetro de tubos es un sistema que hace uso de las variaciones de caudal y deltas de presiones en un tramo de tubería determinada con el fin de calcular viscosidad y propiedades del fluido circulado, además de determinar su comportamiento reológico según el cambio en sus variables.

Un reómetro de tubos standard posee elementos de medición de presión y caudal. Para obtener medidas confiables y exactas, estos tipos de viscosímetros deben tener secciones de entrada y salida suficientemente largas para desarrollar flujo laminar en la sección de prueba.

Cada uno de estos valores es objeto de transformaciones a través de unas relaciones que permiten expresarlos (considerando su flujo en tuberías) en valores apropiados de rata de corte y esfuerzo de corte.

Con los valores obtenidos para rata de corte y esfuerzo de corte se precisa luego graficar la nube de puntos de τ como función de γ (reograma) y determinar mediante análisis de regresión (bien sea de manera directa o linealizando si es posible) el modelo reológico que mejor se adapte al comportamiento de estas variables.

Es importante advertir que las mediciones obtenidas con reómetros de distinta naturaleza o principio de operación (de tubos, rotacional, de placas paralelas) suelen diferir levemente entre sí para los índices de consistencia, siendo necesario por tanto establecer relaciones de corrección entre uno y otro. (Hernández, Arenas y Pérez, 2018, p. 31-32).

En este tipo de reómetros el fluido es forzado a pasar por un tubo, observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico de forma que la porción del fluido que está en contacto con la paredes del capilar tiene una velocidad nula y la porción del fluido que se encuentra en el centro del tubo tiene una velocidad máxima.

Uno de los problemas más frecuentes en este tipo de reómetros es que la fuerza de cizalla aplicada no es uniforme y la medición de la viscosidad debe ser corregida por varios factores, como aquellos factores relacionados con el efecto de entrada y salida del capilar, deslizamiento en las paredes y una reología no Newtoniana. Los reómetros capilares permiten alcanzar velocidades de corte extremadamente altas (100.000 - 2.000.0001/s). (Pascual, 2016, p. 44).

3.2. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Hidráulica de Perforación

Uno de los aspectos más importante a evaluar en los lodos muestreados es el de la hidráulica de perforación, ya que este mismo es el que, junto con la reología del lodo, determina la capacidad del fluido de llevar a cabo la limpieza del pozo de manera eficiente.

La hidráulica de perforación se ocupa de los efectos interrelacionados de viscosidad, el caudal y las presiones de circulación sobre el desempeño del fluido de perforación para el cumplimiento de sus diferentes funciones. Desafortunadamente las propiedades de flujo que pueden beneficiar en determinados aspectos en la hidráulica de perforación, en la mayoría de los casos pueden resultar perjudiciales para el cumplimiento de otras funciones; por lo que se debe buscar un equilibrio entre los distintos parámetros involucrados en la hidráulica de manera que se obtenga un mínimo perjuicio de uno sobre otro. (Esterlin, Gómez, p. 34)

Las ecuaciones de la hidráulica de perforación han sido construidas usando parámetros de los modelos de Bingham y de la Ley de Potencia. Típicamente los cálculos de caída de presión en situaciones de flujo laminar efectuados con el modelo de Bingham son muy precisos, mientras que los efectuados usando el modelo de la Ley de Potencia dan predicciones menores de las caídas reales de presión. (Esterlin, Gómez, p. 35)

Las ecuaciones que se usarán en este caso son las que nos llevan a calcular en Índice de Capacidad de Acarreo, o CCI por sus siglas en inglés, y estas se describirán en detalle al momento de realizar el análisis de resultados.

Clasificación de fluidos de perforación base agua

Los diferentes tipos de lodos de perforación base agua que se toman en cuenta en la industria de hidrocarburos se han obtenido gracias a la caracterización de los fluidos que se necesitan en cada situación específica en cuanto al yacimiento que se maneja. Esta clasificación corresponde a (Chevron, 2009):

- Lodos de arranque.
- Fluidos no-dispersos bajos en sólidos.
- Fluidos bajos en pH / polímeros.
- Fluidos poliméricos.
- Lodos de agua de mar.
- Fluidos saturados de agua salada.
- Fluidos de lignita / lignosulfonato.
- Lodos base agua de alto rendimiento.

Fluidos no-dispersos bajos en sólidos

Los fluidos no dispersos con bajo contenido de sólidos se utilizan principalmente para obtener mejores tasas de penetración y limpieza de orificios en áreas donde los sistemas convencionales de fluidos químicos en gel dan un rendimiento pobre o moderado. Este tipo de sistema usa varios materiales para extender el rendimiento de las arcillas, lo que resulta en un contenido de sólidos totales significativamente menor. Los datos de laboratorio y de campo muestran una fuerte correlación entre el uso de fluidos con bajo contenido de sólidos y las mejores tasas de penetración. Además, el uso adecuado de estos extensores de polímeros dará como resultado la floculación de sólidos de bajo rendimiento (sólidos perforados) y la efectividad óptima del equipo de remoción de sólidos.

Los beneficios secundarios derivados de este sistema incluyen los siguientes:

- Reducción de las necesidades de agua.
- Menor costo total de transporte
- Desgaste reducido en bombas y equipos de superficie.
- Vida de la broca mejorada.
- Mejor estabilidad con shales.

El sistema básico es agua, bentonita y un extendedor de bentonita (floculante). Las concentraciones dependen de las propiedades de la suspensión requeridas para la limpieza de pozo. (Chevron, 2009, p. 41).

Aditivos mejoradores del comportamiento reológico

Los viscosificantes mejoran la capacidad del fluido de perforación para eliminar los recortes del pozo y para suspender los recortes y el peso de los materiales durante los períodos de no circulación. Las arcillas y los polímeros naturales o sintéticos son los materiales más utilizados como viscosificadores (Nguyen, 2012, p, 7).

A continuación se proporciona una lista de algunos de los materiales utilizados para proporcionar viscosidad a los fluidos de perforación:

- Bentonita.
- Sepiolita.
- Atapulguita.
- Arcillas organofílicas.

La bentonita se usa en los fluidos de perforación para lubricar y enfriar las herramientas de corte, eliminar los recortes y ayudar a prevenir explosiones. Gran parte de la utilidad de la bentonita en la industria de la perforación y la ingeniería geotécnica proviene de sus propiedades reológicas únicas. Cantidades relativamente pequeñas de bentonita suspendidas en agua forman un material viscoso que adelgaza al corte. La mayoría de las veces, las suspensiones de bentonita también son tixotrópicas, aunque también se han notificado casos raros de comportamiento reopéctico. A concentraciones suficientemente altas (aproximadamente 60 gramos de bentonita por litro de suspensión), las suspensiones de bentonita comienzan a tomar las características de un gel (un fluido con una resistencia mínima requerida para hacer que se mueva). Por lo

tanto, es un componente común del lodo de perforación utilizado para reducir la invasión del fluido de perforación por su propensión a ayudar en la formación de la torta de lodo. (Craddock, 2018, p. 391).

La sepiolita es un silicato de magnesio hidratado que se parece mucho a la atapulgita. La sepiolita proporciona una viscosidad estable a 700 ° F. Aparentemente se convierte en una esmectita cuando la temperatura del fluido de perforación excede los 300 ° F. La sepiolita se utiliza en la perforación geotérmica como un barrido viscoso para la limpieza de orificios y como sustituto de la atapulgita en muchas operaciones.

La arcilla de Attapulgius se suele llamar atapulgita, que constituye hasta el 80 a 90% del producto comercial. La montmorillonita, sepiolita y otras arcillas, además del cuarzo, calcita o dolomita constituyen el resto. Como material de fluido de perforación, la arcilla attapulgius se llama sal de gel o gel de salmuera, porque se usa como agente de suspensión en soluciones salinas. Cuando se coloca en el agua, la atapulgita no se hincha como la bentonita, sino que se debe dispersar mediante una agitación vigorosa para separar los haces de cristales similares a listones. Las suspensiones estables resultan de la estructura aleatoria que atrapa el agua y de la gran área de superficie disponible para la adsorción de las moléculas de agua polares. La atapulgita se utiliza en los fluidos de perforación únicamente por sus cualidades de suspensión. Sus cualidades de suspensión no se ven afectadas negativamente por las sales disueltas. Su aplicación habitual es en lodos de mayor salinidad que el agua de mar.

Las arcillas organofílicas son minerales de arcilla cuyas superficies han sido recubiertas con un químico para hacerlos dispersables en aceite. La bentonita, la atapulgita y la sepiolita (arcillas en forma de varilla) se tratan con agentes humectantes del aceite durante la fabricación y se utilizan como aditivos de aceite y lodo.

La bentonita organofílica se utiliza en lodos de aceite para construir la reología para el levantamiento de recortes y la suspensión de sólidos. También contribuyen a la torta de filtración de baja permeabilidad.

La atapulgita organofílica y la sepiolita se usan en lodos de aceite estrictamente para construir la estructura del gel, que puede no durar mucho debido a la degradación por cizallamiento cuando el lodo se bombea a través de la broca. (Nguyen, 2012, p, 9-11).

El control reológico básico se logra controlando la concentración de los viscosificantes primarios utilizados en el sistema de fluido de perforación. Sin embargo, cuando el control de la viscosidad y los geles no se pueden lograr de manera eficiente con este método, se utilizan materiales llamados Thinners o adelgazantes, dispersantes o defloculantes. Estos materiales reducen las propiedades viscosas y de formación de la estructura del fluido de perforación al cambiar las interacciones físicas y químicas entre los sólidos y / o las sales disueltas.

Los materiales comúnmente utilizados como adelgazantes en los fluidos de perforación a base de agua se pueden clasificar en términos generales como (Nguyen, 2012, p, 14):

- Taninos de plantas.
- Fosfatos.
- Lignosulfonatos modificados.

- Polímeros sintéticos solubles en agua con bajo peso molecular.

Los materiales floculantes hacen que los sólidos se coagulen para que puedan ser removidos más fácilmente de los sistemas de base de agua. También trabajan para cambiar las propiedades viscosas del fluido de perforación. La sal, la cal hidratada, el yeso (sulfato de calcio hidratado) y los polímeros sintéticos se utilizan a menudo para promover la floculación y la posterior eliminación de sólidos perforados de tamaño coloidal. La goma guar y algunos polímeros acrílicos también son floculantes totales muy efectivos cuando se usan en bajas concentraciones en fluidos de perforación de agua clara. La cal y el yeso también se utilizan para aumentar la capacidad de carga de los lodos de agua a base de floculación de la bentonita y los sólidos perforados. La floculación se promueve mediante la modificación de la carga superficial de las partículas sólidas, como con las sales, o mediante la adsorción y el puente entre las partículas, como con los polímeros de alto peso molecular. (Nguyen, 2012, p. 19).

Aditivos comerciales

Baroid – Tunnel-Gel Plus. Este viscosificante es una bentonita de alto rendimiento especialmente formulada y diseñada para perforación horizontal de gran diámetro. Es capaz de promover el rápido desarrollo de la viscosidad mientras se mantiene estabilización efectiva del pozo y control de filtrado mejorado en la mayoría de fluidos base agua.

Schlumberger – DUO-TEC. Es un viscosificante de goma xántica dispersable y no clarificado, incluye viscosidad con baja tasa de corte y una suspensión de material densificante para todos los sistemas de fluidos de perforación base agua. Tiene la habilidad única de producir un fluido altamente pseudoplástico y tixotrópico.

Schlumberger – POWERVIS. Es un agente modificador de reología usado para proveer viscosidad y suspensión de sólidos al lodo. Sus perfiles reológicos otorgan bajas presiones de bombeo y densidad equivalente de circulación, haciéndolo una alternativa ideal para perforación con tubería flexible o cualquier aplicación donde se utilice un sistema libre de sólidos.

Schlumberger – M-I GEL. Es una bentonita viscosificante de grado premium utilizada principalmente para mejorar la retorta, controlar el filtrado y suspender sólidos en sistemas de agua fresca, teniendo aplicación en todos los sistemas de fluidos base agua.

Aditivos en experimentación. Según un artículo publicado por el Centro de Investigación de Aramco en 2017, ha sido desarrollado un paquete de viscosificantes supramolecular que utiliza asociaciones no covalentes entre aditivos para incrementar la resistencia térmica de fluidos divalentes de salmuera. La adición de esta nueva mezcla de polímeros incrementa la suspensibilidad antes y después de someterse a envejecimiento a altas temperaturas. Este paquete de viscosificantes involucra sinergias de aditivos con la salmuera que incrementan en gran magnitud la estabilidad termal de los polímeros en la salmuera. La formulación de este aditivo representa un beneficio comercial sustancial debido a que posee un mejor desempeño en yacimientos a mayores profundidades que los productos usados actualmente, ya que estos son incompatibles con salmueras de alta densidad o requieren el uso de salmueras con costos monetarios

inviabiles para lograr las densidades objetivo. Asimismo, el tipo de yacimientos en cuestión demandan el uso de fluidos libres de sólidos y de alta densidad, parámetros que de igual forma son cumplidos por este producto. (Boul, Abdulquddos y Thaemlitz, 2017).

Adicionalmente, investigadores de la Universidad del Petróleo de China desarrollaron un viscosificante que satisface los requerimientos necesarios para propiciar un fluido de perforación destinado a la extracción de shale gas localizado a altas profundidades en la región de Weiyuan en la provincia Sichuan de China, estos son, garantizar un fluido base agua libre de arcillas que posea alta densidad y sea resistente a altas temperaturas. Tales propiedades fueron alcanzadas en muestras tratadas con un polímero hidrofóbico soluble en agua, el cual presentó alta viscoelasticidad y resistencia a la temperatura. (Zhang, Jiang, Xuan, Wang y Huang, 2016).

3.3. SÁBILA COMO VISCOSIFICANTE DE LODOS DE PERFORACIÓN

El efecto del producto de cáscara de sábila en los lodos de perforación base agua fue cuantificado en 1992 como objeto de un proyecto de investigación realizado en la Universidad Surcolombiana por los Ingenieros Luis Eduardo Polanía Sánchez y Juan Pablo Vargas Castellanos. Dentro de tal proyecto se realizaron pruebas de laboratorio y el análisis correspondiente a sus resultados, mediante los cuales se concluyó un efecto beneficioso sobre la viscosidad de los fluidos.

Características (físicas y químicas)

La sábila es una planta perenne, suculenta, de la familia de las Liliáceas, género aloe, se le conoce por tener las hojas carnosas, anchas, cóncavas de la cara interna con salientes en los bordes que parecen espinas pero no tienen la rigidez de estas, de 30 a 50 cm de longitud y color verde pálido. (Vargas y Polanía, 1992, p. 8)

Constituyente	Porcentaje %
Proteína	2.87
Grasa	4.76
Fibra	5.09
Azúcares	25.50
Ceniza	8.63
Mucilago	30.00
Aloína cruda, aceite y resina.	22.30

Tabla 3.1: Composición de la Sábila. (Vargas y Polanía, 1992, p. 10.)

A medida que se incrementa la concentración de sábila aumentan tanto la viscosidad plástica como el punto de cedencia de manera lineal. La razón VP / YP tiende a disminuir y suele situarse en rangos de valores menores a 1, lo que sugiere un sistema no disperso bajo en sólidos. Los aumentos de viscosidad plástica que se obtienen de adicionar sábila al lodo son proporcionales a la relación concentración de bentonita-concentración de sábila del lodo. Así mismo, los valores de geles arrojados por un viscosímetro tienden a aumentar y a proveer un perfil más plano o menos progresivo que en caso de un lodo sin el aditivo.

Adicionalmente, es de notar que la adición de cáscara de sábila reduce significativamente la cantidad de bentonita necesaria para que un lodo alcance condiciones de flujo óptimas.

La estabilidad del producto de sábila en los lodos trabajados está determinada por:

- Concentración del producto de sábila en el lodo.
- La cantidad de contaminantes presentes en el lodo.

- El pH del lodo.

Los lodos preparados con producto de sábila forman una suspensión que permanece estable indefinidamente en el sistema.

Aprovechamiento y costos (médicos, alimentos, belleza, lodos).

Actualmente su cultivo intensivo en algunas regiones obedece solamente a la demanda del Aloe como producto medicinal y en la fabricación de cosméticos. Tiene reconocidas propiedades terapéuticas y es ampliamente usado en tratamientos cosméticos, en Colombia actualmente se encuentran líneas de productos cosméticos a base de sábila, en Estados Unidos se encuentra el aloe en múltiples presentaciones: suplementos dietéticos, cremas, lociones, shampoo, tabletas, polvos, jarabes, capsulas, etc.

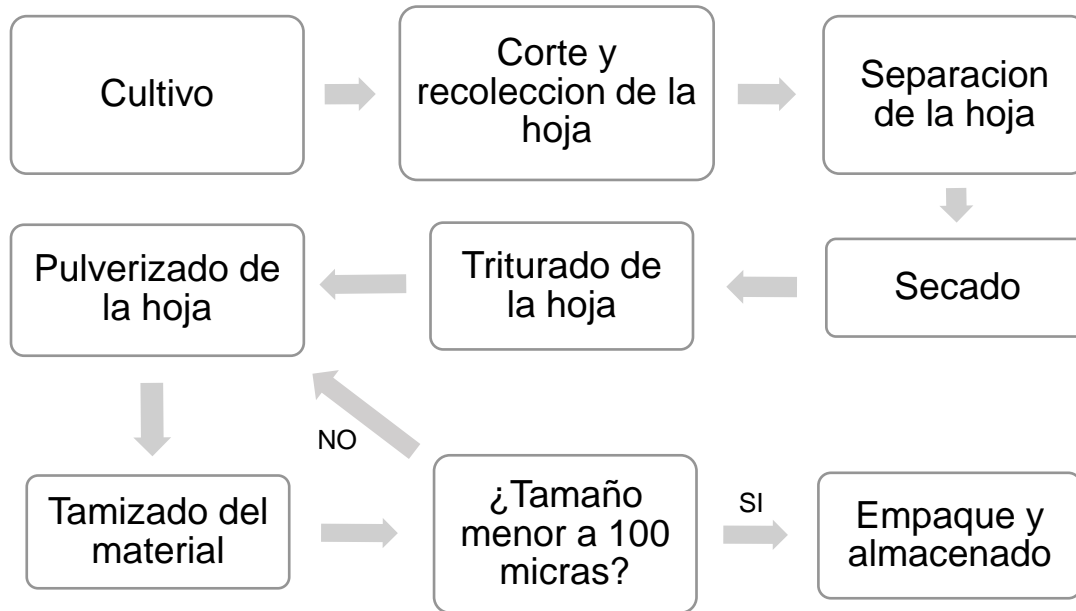
Es usado ampliamente como laxante y para atender enfermedades del aparato respiratorio, la piel e irritaciones, además su efecto cicatrizante está científicamente comprobado y últimamente se ha incrementado el uso en el tratamiento de quemaduras por rayos X.

El cultivo y procesamiento del material de sábila requiere equipos e instalaciones sencillas, por lo que el montaje de una planta de procesamiento no resultaría costoso. (Vargas y Polania, 1992, p. 1, 12-13, 119, 122-123)

Extracción de polvo de sábila.

Las plantas seleccionadas para la investigación fueron de la especie aloe vera, en las cuales la parte externa de la hoja (cáscara) se removi6 de la pulpa y el ac6bar manualmente para obtener la materia prima destinada a usarse en las pruebas de laboratorio. El peso de esta capa exterior corresponde aproximadamente a un tercio del peso total de cada hoja.

La cáscara se sec6 inicialmente al aire libre y posteriormente en un horno en preparaci6n para su transformaci6n hacia un polvo que tenga la capacidad de dispersarse a lo largo de una muestra de lodo. Para ello se sec6 hasta obtener una humedad cercana al 3%, para posteriormente proceder a triturar y tamizar el material hasta alcanzar el menor tama6o de part6culas posible, idealmente menores a 100 micras, de manera que no afectaran las propiedades de filtraci6n del lodo.



*Figura 3.4: Obtención del producto de cáscara de sábila.
(Vargas y Polania, 1992, p. 113)*

Antecedentes de uso en lodos de perforación

El uso de un aditivo de cáscara de sábila como mejorador reológico fue propuesto por primera vez en 1992 por Luis E. Polanía y Juan P. Vargas, los cuales añadieron diferentes concentraciones del producto en cuestión a muestras de fluidos de perforación, para luego someter estas mismas a pruebas que facilitaron su caracterización, concluyendo:

- La viscosidad plástica aumenta linealmente con el incremento de concentración de producto de sábila al lodo.
- La cantidad de producto de sábila para obtener un valor determinado de viscosidad plástica es función de la cantidad de bentonita del lodo en un momento dado.
- La tendencia presentada por los lodos trabajados frente al tratamiento con producto de sábila, es la de mantener un sistema no disperso bajo en sólidos, ya que presenta una relación VP/YP menor o igual a 1.
- El punto de cedencia aumenta de manera exponencial con el incremento de concentración de producto de sábila en el lodo.
- Los lodos trabajados en el proyecto con concentración entre 10 ppb y 20 ppb de bentonita mostraron los mejores valores de la relación VP/YP menor o igual a 1 para concentraciones de producto de sábila de 2 ppb.
- La viscosidad aparente aumentó al igual que el punto de cedencia de manera exponencial a medida que se incrementó la concentración de producto de sábila en el lodo.

- La cantidad de producto de sábila para obtener un valor determinado de viscosidad aparente y de geles es función de la cantidad de bentonita del lodo en un momento dado.
- Los geles de los lodos tratados con producto de sábila, respondieron satisfactoriamente, obteniéndose geles favorables y planos en su mayoría.
- Los lodos trabajados en el proyecto y tratados con producto de sábila no desarrollan geles progresivos.
- Los sólidos incorporados al sistema con la adición del producto de sábila son menores a 0.5%, por lo tanto el aumento considerable en las propiedades reológicas no es debido al incremento de sólidos, sino a las cadenas de moléculas de polisacáridos, que constituyen el producto de sábila. Desde este punto de vista, se podría considerar el producto de sábila como un polímero natural.

4. FORMULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN BAJO EN SÓLIDOS

En cuanto a las pruebas de laboratorio a realizar se decidió optar por los lodos no dispersos bajos en sólidos debido a que se buscaba prevenir la posible depositación de sólidos presente en lodos con mayores cantidades de aditivos, evitando a su vez un proceso de limpieza que representaría costos significativos y un consumo innecesario de tiempo. Adicionalmente, su preparación es sencilla y requieren una cantidad relativamente baja de materia prima para su elaboración.

4.1. FLUIDOS CON ADITIVOS CONVENCIONALES

La realización de pruebas utilizando equipo de laboratorio con poca implementación en el campo de los fluidos de perforación conlleva a considerar el uso de muestras con un tipo de composición que haya sido puesto a prueba en la industria, proporcionando confianza en cuanto al comportamiento a esperar del mismo. Asimismo, la presencia del fluido con aditivo de cáscara de sábila dentro del espectro de acción de este trabajo, nos permite efectuar una comparación más detallada en cuanto a la utilidad del aditivo en condiciones de campo.

4.1.1. Formulación de Fluidos Convencionales. Las composiciones de los lodos fueron determinadas por los estándares presentes en literatura pertinente al tema, los cuales llegan a un consenso de las cantidades de cada componente a utilizar. Además, se decidió elaborar muestras de lodo con variaciones graduales en las concentraciones de sus aditivos para finalmente escoger cual sería el más adecuado para fluir a través del reómetro de tubos y, a su vez, poder desempeñarse correctamente en condiciones reales de pozo.

Finalmente, las composiciones a trabajar en las pruebas preliminares se muestran en la tabla 4.1:

Tabla 4.1:

Composiciones de lodos manejados en pruebas preliminares de lodos convencionales.

Lodo	1	2	3	4	5	6	7	8
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1
Bicarbonato	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
Soda caustica	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Extendedor de bentonita	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Goma xantica	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Bentonita	8	9	10	11	8	9	10	11

Lodo	9	10	11	12	13	14	15	16
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1
Bicarbonato	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
Soda caustica	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Extendedor de bentonita	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Goma xántica	1	1	1	1	1	1	1	1
Bentonita	8	9	10	11	8	9	10	11

4.1.2. Determinación de Propiedades de Fluidos Convencionales. Las mediciones y pruebas realizadas a estas muestras de lodos correspondieron a: pH, densidad, cantidad de sólidos / líquidos y filtrado.

Los resultados de estas pruebas se muestran en las tablas 4.2 a 4.4:

Tabla 4.2:

Resultados de pruebas de pH y densidad para lodos convencionales.

-	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Densidad	8,5	8,6	8,65	8,65	8,55	8,5	8,5	8,55

-	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Densidad	8,45	8,48	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	8,47

Tabla 4.3:

Resultados de pruebas de sólidos y líquidos para lodos convencionales.

S/L	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
L (ml)	10	10	9	10	10	10	10
B (gr)	228,76	228,97	221,54	226,72	221,41	229,23	227,66
C (gr)	238,88	239,73	231,55	238,81	231,5	239,23	239,01
D (gr)	229,11	229,27	221,84	227,09	221,77	229,41	228,29

Peso del lodo (gr)	10,12	10,76	10,01	12,09	10,09	10	11,35
Peso de solidos (gr)	0,35	0,3	0,3	0,37	0,36	0,18	0,63
Porcentaje sólidos (%)	3,458	2,788	2,997	3,060	3,568	1,8	5,551

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
10	10	8,82	10	9,85	10	9,7	9,9	9,5
221,38	229,22	221,46	229	221,23	228,91	221,43	229,37	221,27
231,41	239,21	231,53	238,75	231,35	239,07	231,55	239,38	230,74
221,71	229,43	221,68	229,24	221,45	229,14	221,74	229,65	221,51
10,03	9,99	10,07	9,75	10,12	10,16	10,12	10,01	9,47
0,33	0,21	0,22	0,24	0,22	0,23	0,31	0,28	0,24
3,290	2,102	2,185	2,461	2,174	2,264	3,063	2,797	2,534

Tabla 4.4:
Resultados de pruebas de filtrado para lodos convencionales.

Filtrado	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
0 minutos (ml)	2	1	1	1	1,5	1	1
7,5 minutos (ml)	9	7	9	11	8,5	9	9
30 minutos (ml)	18	14	18	22	17	18	18

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
1	2	0	1	1	1	1	1	1
8	9	7,5	7	6	7,2	17,5	8	9
16	18	16	14	12	14,2	14,4	16	17

4.2. FLUIDOS CON SÁBILA COMO VISCOSIFICANTE

Teniendo en cuenta el hecho de que en la Universidad Surcolombiana se propuso como objeto de una tesis de pregrado el uso de cáscara de sábila pulverizada como mejorador reológico, se consideró integrar fluidos que incluyeran este aditivo en su composición y, de esta manera, profundizar sobre la funcionalidad y aplicabilidad del mismo al someterlo a un método de medición reológica que funcione según principios diferentes a los utilizados anteriormente.

4.2.1. Formulación de los Fluidos con Sábila.

Los principios mediante los cuales se diseñaron estas muestras de lodo son los mismo a los utilizados en el caso del lodo no disperso bajo en sólidos, con la principal diferencia de que la sustancia viscosificante que actúa en reemplazo de la goma xántica es el material pulverizado obtenido de la cáscara de hojas de sábila.

Las concentraciones a tener en cuenta en las pruebas preliminares correspondientes a este tipo de lodos se basaron en el estudio realizado previamente en torno a la sábila como mejorador reológico, el cual concluye que es adecuado utilizar cantidades de material de cáscara que van desde 1 a 3 libras por barril equivalente (Vargas y Polanía, 1992). Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó una malla de pruebas similar a la diseñada para los fluidos convencionales.

Se toma como base fija de experimentación un fluido compuesto por 1 barril equivalente de agua, 0,25 y 0,5 libras de bicarbonato, 0,25 libras de soda cáustica, 0,01 libras de extendedor de bentonita y 8 a 10 libras de bentonita, con modificaciones de concentración de material de sábila entre 0, 1, 2 y 3 libras, de acuerdo a lo recomendado por Vargas y Polanía en 1992.

Las composiciones a trabajar en las pruebas preliminares se muestran en la tabla 4.5:

Tabla 4.5:

Composiciones de lodos manejados en pruebas preliminares de lodos con sábila.

Lodo	1	2	3	4	5	6	7	8
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1
Bicarbonato	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Soda caustica	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Extendedor de bentonita	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bentonita	8	8	8	8	9	9	9	9
Sábila	0	1	2	3	0	1	2	3

Lodo	9	10	11	12	13	14	15	16
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1
Bicarbonato	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
Soda caustica	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Extendedor de bentonita	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bentonita	10	10	10	10	8	8	8	8
Sábila	0	1	2	3	0	1	2	3

Lodo	17	18	19	20	21	22	23	24
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1
Bicarbonato	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Soda caustica	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Extendedor de bentonita	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bentonita	9	9	9	9	10	10	10	10
Sábila	0	1	2	3	0	1	2	3

4.2.2. Determinación de Propiedades de Fluidos con Sábila. Las pruebas y mediciones realizadas fueron iguales a las llevadas a cabo en el caso de los lodos de formulación convencional.

Los resultados de estas pruebas se muestran en las tablas 4.6 a 4.8:

Tabla 4.6:

Resultados de pruebas de pH y densidad para lodos con sábila.

	1	2	3	4	5	6	7
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Densidad	8,4	8,4	8,5	8,45	8,4	8,5	8,4

	8	9	10	11	12	13	14	15	16
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Densidad	8,4	8,5	8,5	8,45	8,4	8,45	8,5	8,4	8,3

	17	18	19	20	21	22	23	24
pH	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Densidad	8,5	8,4	8,4	8,45	8,5	8,45	8,4	8,45

Tabla 4.7

Resultados de pruebas de sólidos y líquidos para lodos con sábila.

S/L	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo7
L (ml)	10	10	10	9,4	10	9,8	10
B (gr)	221,65	227,12	221,58	221,09	227,16	221,26	228,31
C (gr)	230,64	237,02	231,24	230,69	237,39	231,37	238,24
D (gr)	221,91	227,39	221,74	221,21	227,28	221,53	228,56
P Lodo (gr)	8,99	9,9	9,66	9,6	10,23	10,11	9,93
P Sol (gr)	0,26	0,27	0,16	0,12	0,12	0,27	0,25
P Sol (%)	2,892	2,727	1,656	1,25	1,173	2,671	2,517

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo15	Lodo16
10	10	10	10	9,6	10	9,4	10	9,4
221,44	227,38	226,8	227,11	221,08	226,19	220,93	226,97	221,45
231,545	237,75	237,24	237,45	231	236,85	231	237,02	231,06
221,69	227,66	227,18	227,3	221,12	227,12	221,16	227,12	221,66
10,105	10,37	10,44	10,34	9,92	10,66	10,07	10,05	9,61
0,25	0,28	0,38	0,19	0,04	0,93	0,23	0,15	0,21
2,474	2,7	3,639	1,837	0,403	8,724	2,284	1,492	2,185

Lodo17	Lodo18	Lodo19	Lodo20	Lodo21	Lodo22	Lodo23	Lodo24
10	10	10	10	10	10	10	10
226,97	226,93	220,95	226,84	220,65	221,07	226,87	227,27
237,45	237,06	230,11	237,12	231,18	231,28	236,89	237,4
227,23	227,09	220,99	227,09	220,89	221,46	227,32	227,51
10,48	10,13	9,16	10,28	10,53	10,21	10,02	10,13
0,26	0,16	0,04	0,25	0,24	0,39	0,45	0,24
2,48091603	1,57946693	0,43668122	2,43190661	2,27920228	3,81978452	4,49101796	2,36920039

Tabla 4.8:
Resultados de pruebas de filtrado para lodos con sábila.

Filtrado	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
0 minutos (ml)	1	1	1	2	1	1	1
7,5 minutos (ml)	4	5	6	8	5	6	7
30 minutos (ml)	8	10	12	16	10	12	14

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
1	1	1	2,5	2,5	1	1	1	1
9	7,5	9	11	15	4	6	8	9
18	15	18	22	30	8	12	16	18

Lodo 17	Lodo 18	Lodo 19	Lodo 20	Lodo 21	Lodo 22	Lodo 23	Lodo 24
1	1	1	1	1	1	1	1
6	8	10	11	8	11	13	14
12	16	20	22	16	22	26	28

5. MEDICIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS

Los datos resultantes obtenidos tras realizar las pruebas de laboratorio correspondientes en las muestras de lodo convencionales, de tipo no disperso bajo en sólidos, fueron procesados usando una herramienta de caracterización desarrollada por el mismo equipo que estableció el reómetro de tubos en el laboratorio donde se llevaron a cabo las pruebas. Este software se encarga de establecer un solo valor promedio de presión y caudal por cada grupo de datos muestreados en cada frecuencia de la bomba determinada, así como de calcular valores adicionales de propiedades relevantes al análisis reológico y, finalmente, realizar una gráfica que relaciona esfuerzo de corte y tasa de corte con los puntos resultantes y una línea de tendencia que se acopla a estos mismos y a un modelo reológico especificado. En este caso se determinó el uso del modelo de Ley de la Potencia para crear la línea de tendencia, debido a que proporcionaba el mejor ajuste a los datos introducidos y, adicionalmente, entraba en concordancia con el tratamiento que se le dio a los resultados de las pruebas preliminares, donde fue escogido el mismo modelo.

5.1. MEDICIÓN CON VISCOSÍMETRO ROTATORIO

5.1.1. Fluidos Convencionales.

Tabla 5.1:

Resultados de pruebas de reología para lodos convencionales.

Rata de Corte (s ⁻¹)	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
	SS (lbf/100ft²)						
5,109	5	7	13	14	5	6	10
10,218	6	8	14	15	7	8	12
170,3	13,5	20	27	33	15	16	24
340,6	18	25	34	41	17	19	31
510,9	22	29	40	48	20	22	36
1021,8	33	42	53	62	29	31	49,5

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
11	9	10	12	15	17	18	19	20
13	10	12	14	18	19	20	23	25
25,5	24	24	27	30	31	33	38	44
32	30	31	34	37,5	38	40	46	52
37	35	37	40	44,5	43	45,5	52	59
51	45	49	52	56	54	57	64	71

Tabla 5.2:

Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos convencionales.

Tiempo	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
SS (lbf/100ft²)							
10 segundos	5	6	6	7	7	7	10
10 minutos	6	7	8	8	7	8	11
30 minutos	6	7	8	9	8	9	12

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
SS (lbf/100ft²)								
10	12	11	11	11	12	13	14	15
13	15	14	14	15	14	15	16	17
14	15	15	15	15	15	16	17	18

Tabla 5.3:
Propiedades reológicas resultantes para lodos convencionales

	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7	Lodo 8
VP (cP)	11	13	13	14	9	9	13,5	14
YP (lb/100ft²)	11	16	27	34	11	13	22,5	23
VA (cP)	16,5	21	26,5	31	14,5	15,5	24,75	25,5
VP/YP (s⁻¹)	1	0,81	0,48	0,41	0,82	0,69	0,6	0,61
LSRYP (lb/100ft²)	4	6	12	13	3	4	8	9

Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
10	12	12	11,5	11	11,5	12	12
25	25	28	33	32	34	40	47
22,5	24,5	26	28	27	28,5	32	35,5
0,4	0,48	0,43	0,35	0,34	0,34	0,3	0,25
8	8	10	12	15	16	15	15

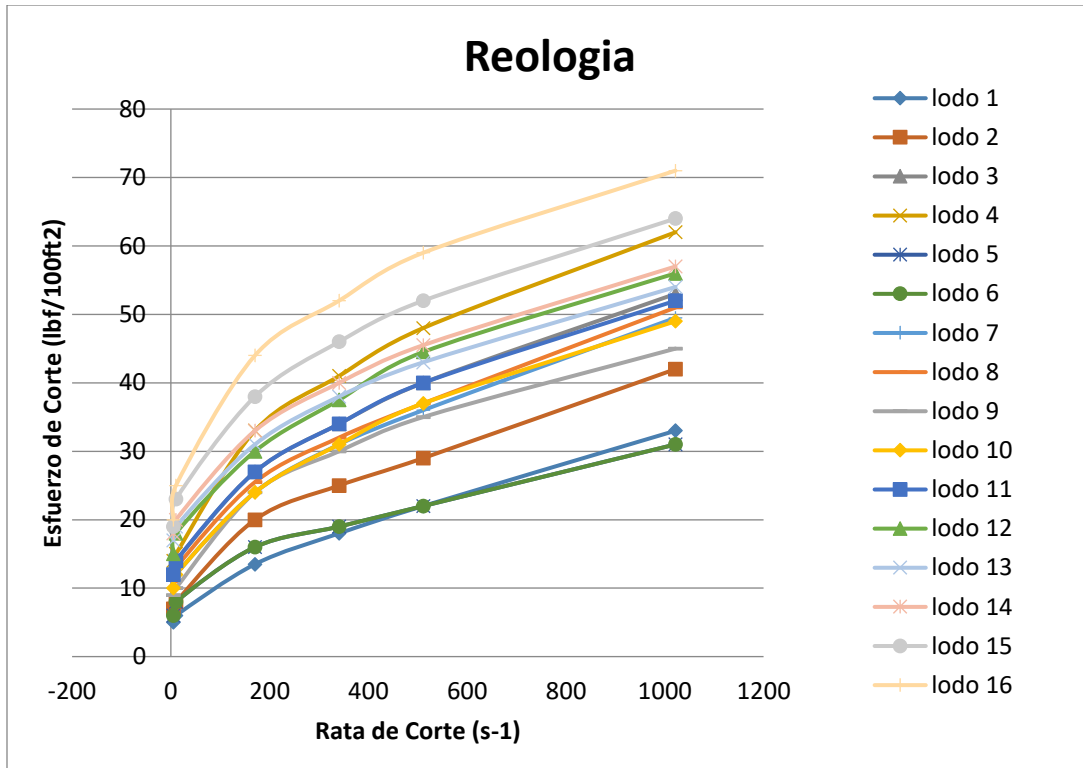


Figura 5.1: Resultados de pruebas de reología para lodos convencionales.

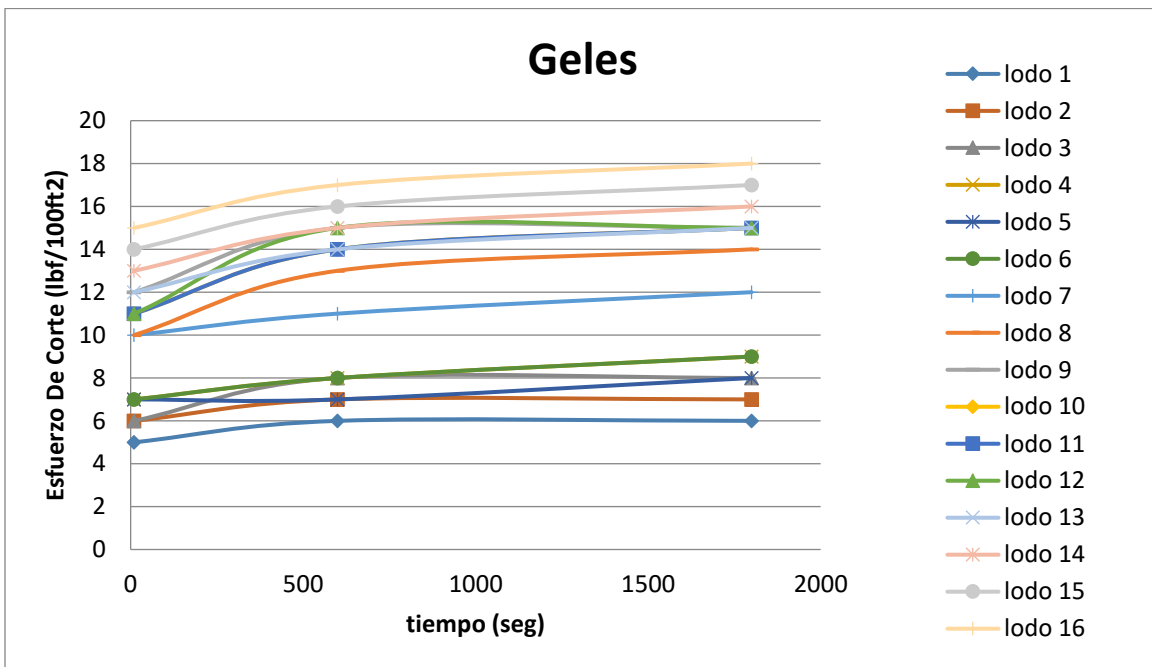


Figura 5.2: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos convencionales con puntos correspondientes a tiempos de 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos.

5.1.2. Fluidos con Sábila

Tabla 5.4:
Resultados de pruebas de reología para lodos con sábila.

Rata de Corte (s ⁻¹)	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo 7
SS (lbf/100ft²)							
5,109	2	2	4	5	2	4	4
10,218	3	3	5	6	3	5	5
170,3	6	6	9	12	6	8	8
340,6	8	8	12	16	9	11	11
510,9	10	9	14	19	11	14	15
1021,8	14	13	19	25	16	20	24

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
5	2	3	3	4	2	3	3	3
6	3	4	4	5	2	4	4	4
9	8	8	9	10	4	7	8	9
12	10	11	11	12	6	9	10	11
17	12	14	15	16	7	12	13	14
26	18	19	20	22	11	16	17	18

Lodo 17	Lodo 18	Lodo 19	Lodo 20	Lodo 21	Lodo 22	Lodo 23	Lodo 24
3	3	3	3	6	3	5	6
3	4	4	4	7	4	6	8
6	8	9	10	9	9	12	16
8	11	12	13	11	11	15	19
11	13	14	15	14	14	19	22
14	18	19	20	17	20	25	32

Tabla 5.5:

Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos con sábila.

	Lodo		Lodo		Lodo		Lodo	
Tiempo	1	2	3	4	5	6	7	
10 segundos	3	3	5	6	3	4	4	
10 minutos	4	4	6	7	4	5	6	
30 minutos	5	5	7	7	5	6	9	

Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
8	9	10	11	12	13	14	15	16
3	4	4	4	5	3	3	4	5
4	5	5	5	6	4	4	6	6
4	5	5	6	6	5	5	7	7

Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
17	18	19	20	21	22	23	24	
4	3	4	4	6	4	5	6	
5	4	4	5	7	5	6	6	
7	5	5	5	8	5	6	7	

Tabla 5.6:

Propiedades reológicas resultantes para lodos convencionales

	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo
	1	2	3	4	5	6	7	8
VP (cP)	4	4	5	6	5	6	9	9
YP (lb/100ft²)	6	5	9	13	6	8	6	8
VA (cP)	7	6,5	9,5	12,5	8	10	12	13
VP/YP (s⁻¹)	0,67	0,8	0,55	0,46	0,83	0,75	1,5	1,12
LSRYP (lb/100ft²)	1	1	3	4	1	3	3	4

Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo 15	Lodo 16
6	5	5	6	4	4	4	4
6	9	10	10	3	8	9	10
9	9,5	10	11	5,5	8	8,5	9
1	0,55	0,5	0,6	1,33	0,5	0,44	0,4
1	2	2	3	2	2	2	2

Lodo 17	Lodo 18	Lodo 19	Lodo 20	Lodo 21	Lodo 22	Lodo 23	Lodo 24
3	5	5	5	3	6	6	10
8	8	9	10	11	8	13	12
7	9	9,5	10	8,5	10	12,5	16
0,37	0,62	0,55	0,5	0,27	0,75	0,46	0,83
3	2	2	2	5	2	4	4

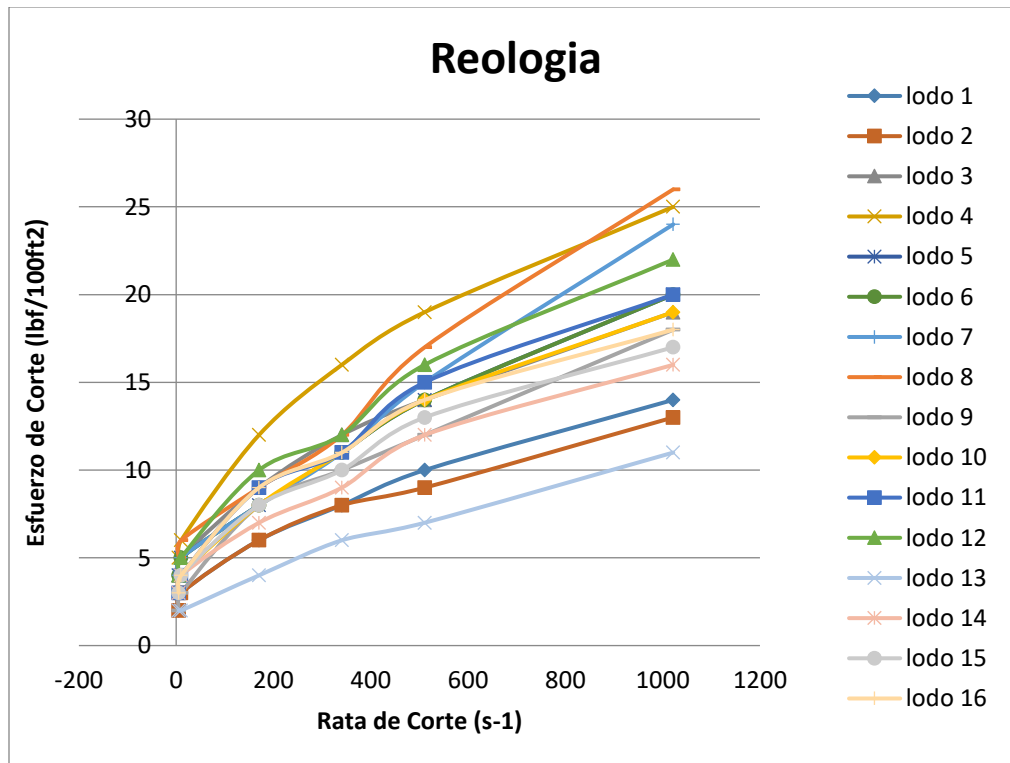


Figura 4.1: Resultados de pruebas de reología para lodos con sábila.

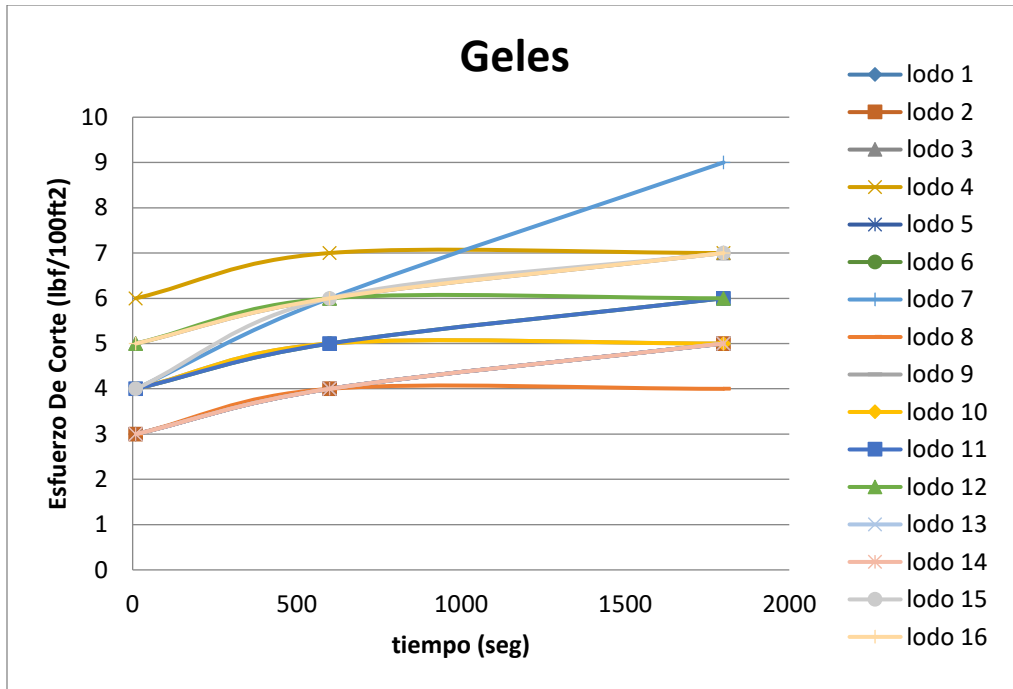


Figura 4.2: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos con sábila.

5.2. MEDICIÓN CON REÓMETRO DE TUBOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas utilizando el reómetro de tubos, donde se encuentran datos de Caudal (Q), Diferencial de Presión (DP), Rata de Corte (SR), Esfuerzo Cortante (SS), Viscosidad Aparente (ua) y Número de Reynolds (Re). Además de mencionar el tipo de régimen de flujo al que pertenece cada medición.

5.2.1. Fluidos Convencionales

Tabla 5.7.
Lodo convencional A, 50°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,62E+02	15806.92	20.017.110	135.175	0.0068	3254.89	Indeterminado
1,48E+02	15527.68	18.296.853	132.787	0.0073	2768.39	Indeterminado
1,35E+02	15111.93	16.667.916	129.232	0.0078	2360.61	Indeterminado
1,19E+02	14308.00	14.691.650	122.357	0.0083	1937.06	Laminar
9,97E+01	13379.97	12.330.590	114.421	0.0093	1459.13	Laminar
7,40E+01	12367.13	9.160.134	105.759	0.0115	871.20	Laminar
4,47E+01	10975.76	5.526.833	93.861	0.0170	357.35	Laminar

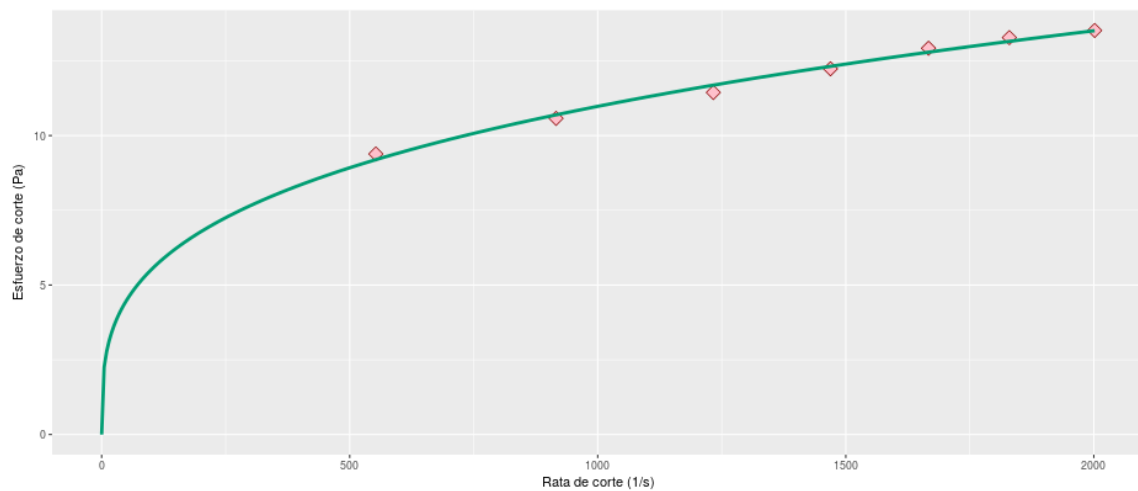


Figura 5.5: Lodo convencional A, 50°C, Línea 1

Tabla 5.8.
Lodo convencional A, 50°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,34E+02	12.024.457	12.133.923	131.161	0.0108	2200.24	Indeterminado
2,07E+02	11.134.344	10.746.254	121.452	0.0113	1863.73	Laminar
1,87E+02	10.438.663	9.674.738	113.863	0.0118	1611.26	Laminar
1,68E+02	10.034.630	8.730.206	109.456	0.0125	1364.84	Laminar
1,38E+02	8.814.947	7.141.914	96.152	0.0135	1039.78	Laminar
1,17E+02	8.144.087	6.087.417	88.834	0.0146	817.63	Laminar
8,89E+01	7.472.538	4.613.345	81.509	0.0177	511.80	Laminar
4,07E+01	6.423.156	2.110.959	70.063	0.0332	124.66	Laminar

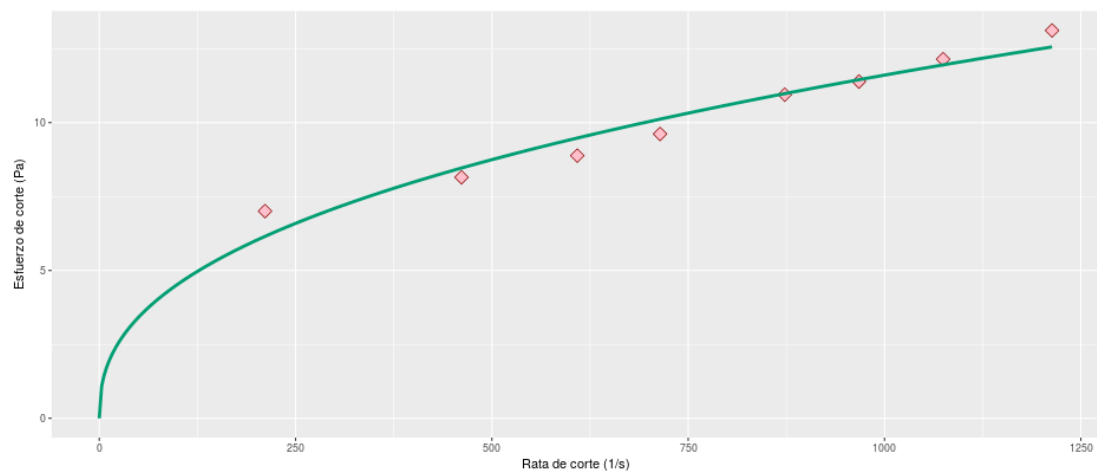


Figura 5.6: Lodo convencional A, 50°C, Línea 2

Tabla 5.9.
Lodo convencional A, 50°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,69E+02	7.851.060	6.058.455	110.017	0.0182	1140.26	Laminar
2,42E+02	7.691.791	5.459.617	107.785	0.0197	945.16	Laminar
2,18E+02	7.313.269	4.901.573	102.481	0.0209	801.25	Laminar
1,83E+02	6.764.446	4.121.790	94.791	0.0230	612.56	Laminar
1,54E+02	6.192.181	3.461.974	86.771	0.0251	472.07	Laminar
1,32E+02	5.691.622	2.969.315	79.757	0.0269	377.82	Laminar
1,08E+02	5.411.006	2.440.695	75.825	0.0311	268.51	Laminar
6,18E+01	4.582.256	1.391.556	64.211	0.0461	103.07	Laminar
9,75E+00	3.834.864	219.749	53.738	0.2445	3.07	Laminar

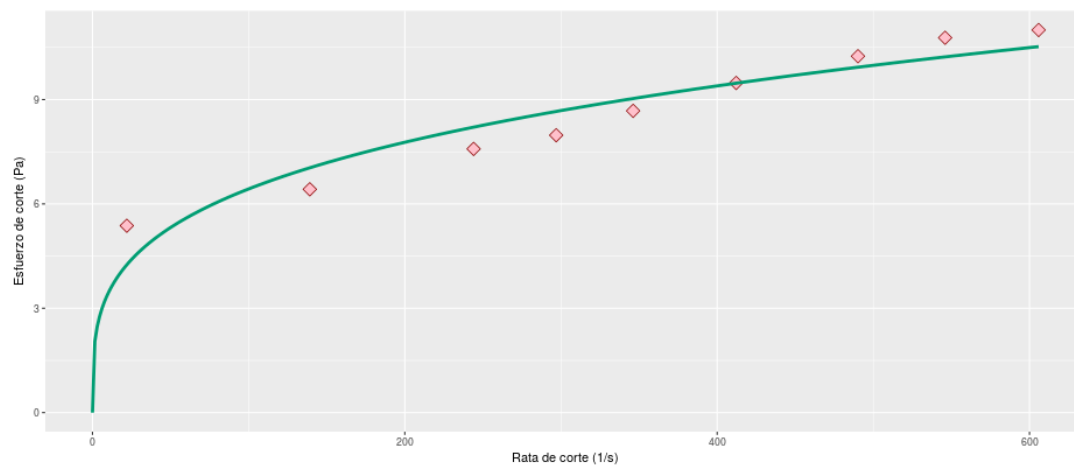


Figura 5.7: Lodo convencional A, 50°C, Línea 3

Tabla 5.10.
Lodo convencional A, 65°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,58E+02	15674.54	19.526.946	134.043	0.0069	3123.59	Indeterminado
1,45E+02	14940.94	17.980.744	127.770	0.0071	2778.55	Indeterminado
1,28E+02	14295.59	15.826.520	122.251	0.0077	2249.83	Indeterminado
1,10E+02	13733.67	13.609.855	117.445	0.0086	1731.81	Laminar
8,82E+01	13063.50	10.907.709	111.714	0.0102	1169.47	Laminar
6,57E+01	12049.97	8.125.951	103.047	0.0127	703.63	Laminar
3,41E+01	10881.65	4.221.615	93.056	0.0220	210.30	Laminar

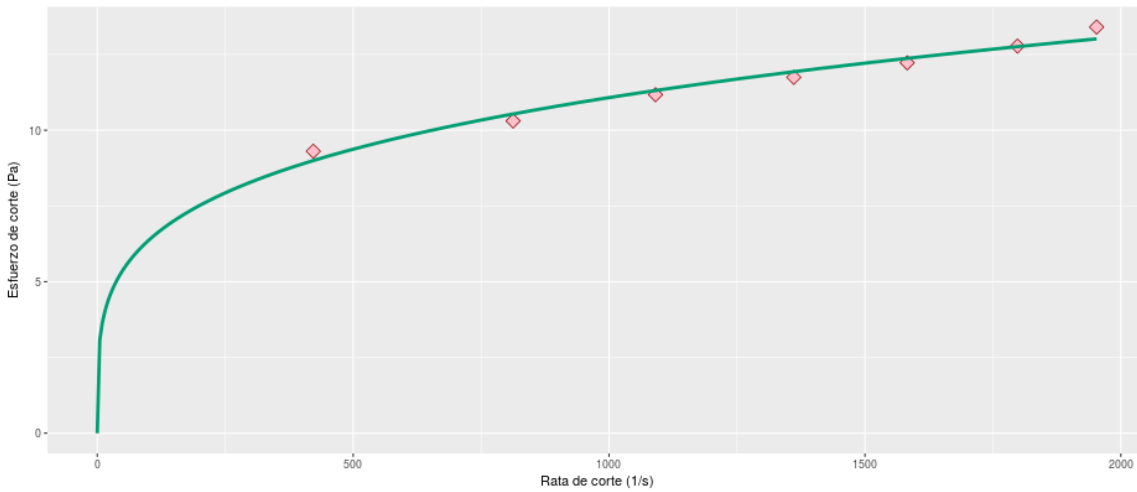


Figura 5.8: Lodo convencional A, 65°C, Línea 1

Tabla 5.11.
Lodo convencional A, 65°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,28E+02	11.385.313	11.853.116	124.189	0.0105	2217.44	Indeterminado
2,16E+02	10.671.016	11.196.264	116.398	0.0104	2110.93	Indeterminado
1,94E+02	10.095.304	10.052.419	110.118	0.0110	1798.68	Laminar
1,70E+02	9.595.434	8.830.027	104.665	0.0119	1460.13	Laminar
1,48E+02	9.070.053	7.679.963	98.935	0.0129	1168.53	Laminar
1,17E+02	8.155.808	6.059.925	88.962	0.0147	809.10	Laminar
8,32E+01	7.203.642	4.315.520	78.576	0.0182	464.57	Laminar
4,20E+01	6.155.639	2.179.033	67.145	0.0308	138.61	Laminar

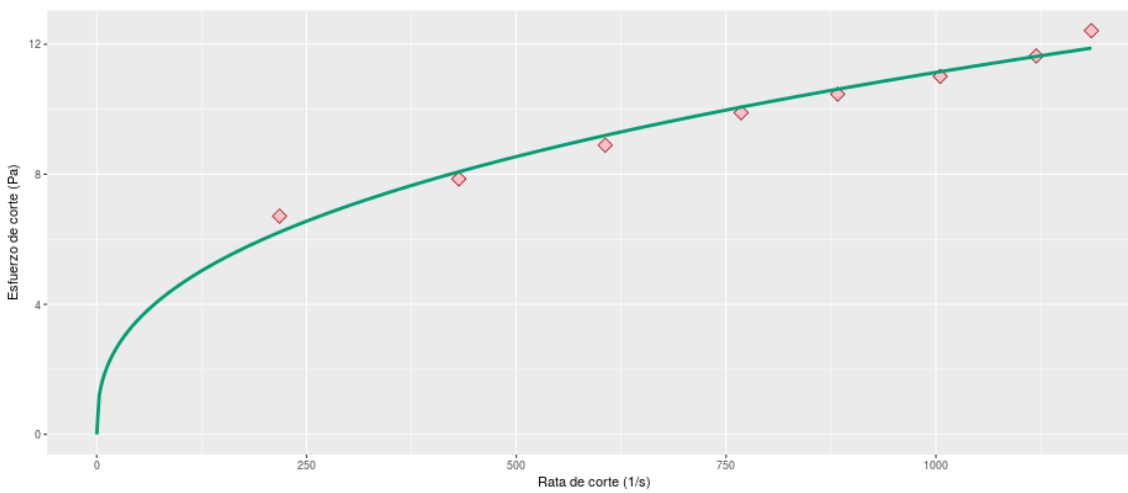


Figura 5.9: Lodo convencional A, 65°C, Línea 2

Tabla 5.12.
Lodo convencional A, 65°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,35E+02	6.168.050	5.305.679	86.433	0.0163	1113.12	Laminar
2,10E+02	6.336.971	4.726.172	88.800	0.0188	859.69	Laminar
1,88E+02	6.131.508	4.237.635	85.921	0.0203	714.31	Laminar
1,76E+02	5.777.807	3.954.918	80.965	0.0205	660.27	Laminar
1,60E+02	5.288.968	3.610.937	74.115	0.0205	601.28	Laminar
1,02E+02	4.324.392	2.293.295	60.598	0.0264	296.62	Laminar
6,39E+01	3.801.080	1.440.168	53.265	0.0370	133.08	Laminar

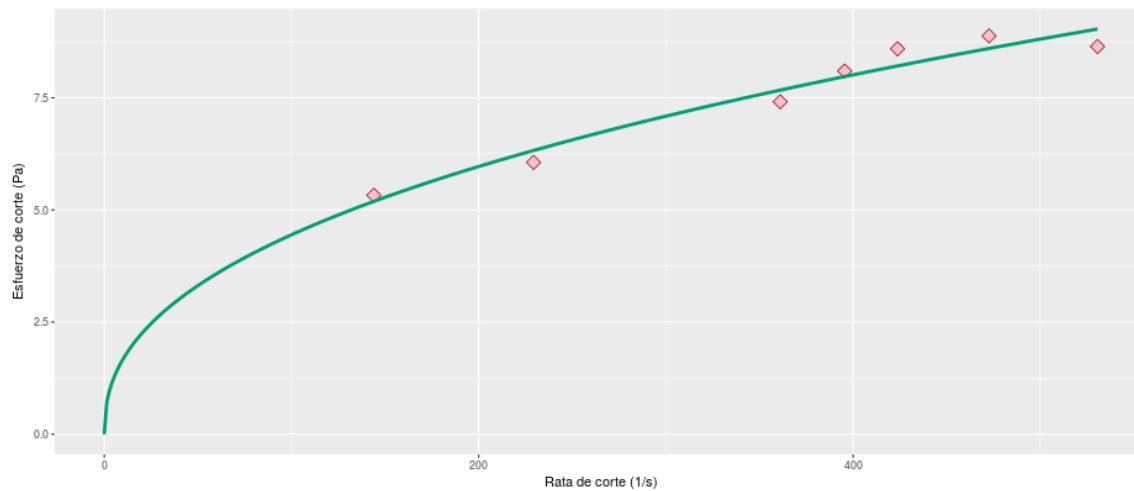


Figura 5.10: Lodo convencional A, 65°C, Línea 3

Tabla 5.13.

Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,10E+02	23361.51	13.646.539	199.779	0.0146	1023.59	Laminar
9,22E+01	22093.56	11.405.678	188.936	0.0166	756.06	Laminar
7,98E+01	21249.64	9.875.867	181.719	0.0184	589.36	Laminar
6,43E+01	20225.77	7.950.335	172.964	0.0218	401.28	Laminar
3,24E+01	18713.06	4.004.827	160.027	0.0400	110.05	Laminar
1,33E+01	17364.45	1.648.840	148.495	0.0901	20.10	Laminar

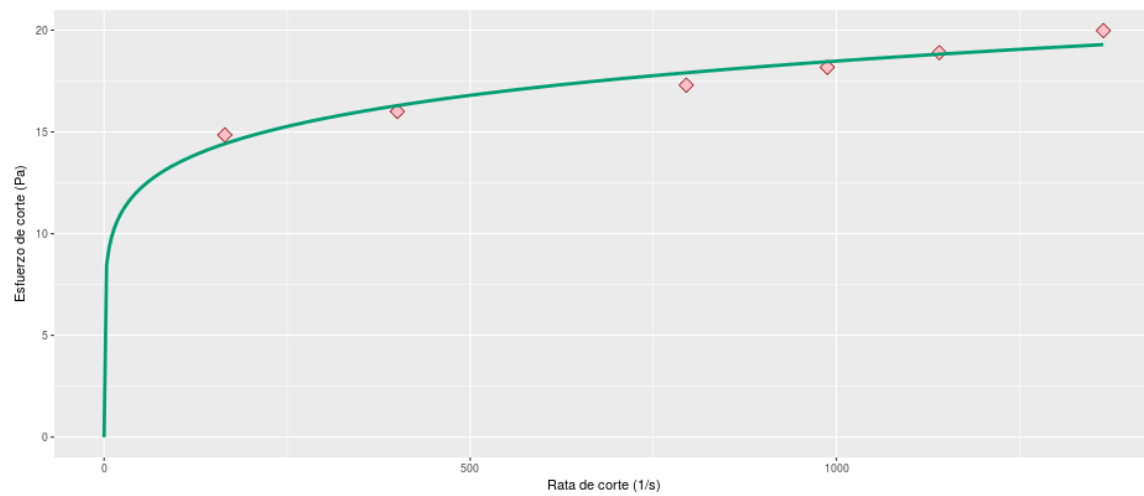


Figura 5.11: Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.14.
Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,02E+02	16686.69	10.473.302	182.016	0.0174	1181.22	Laminar
1,84E+02	16272.32	9.553.971	177.496	0.0186	1007.98	Laminar
1,59E+02	15613.18	8.254.995	170.306	0.0206	784.29	Laminar
1,28E+02	14099.78	6.661.794	153.798	0.0231	565.59	Laminar
9,13E+01	13428.92	4.736.076	146.480	0.0309	300.14	Laminar
7,65E+01	12279.56	3.967.621	133.944	0.0338	230.36	Laminar
3,08E+01	10304.90	1.597.129	112.404	0.0704	44.48	Laminar

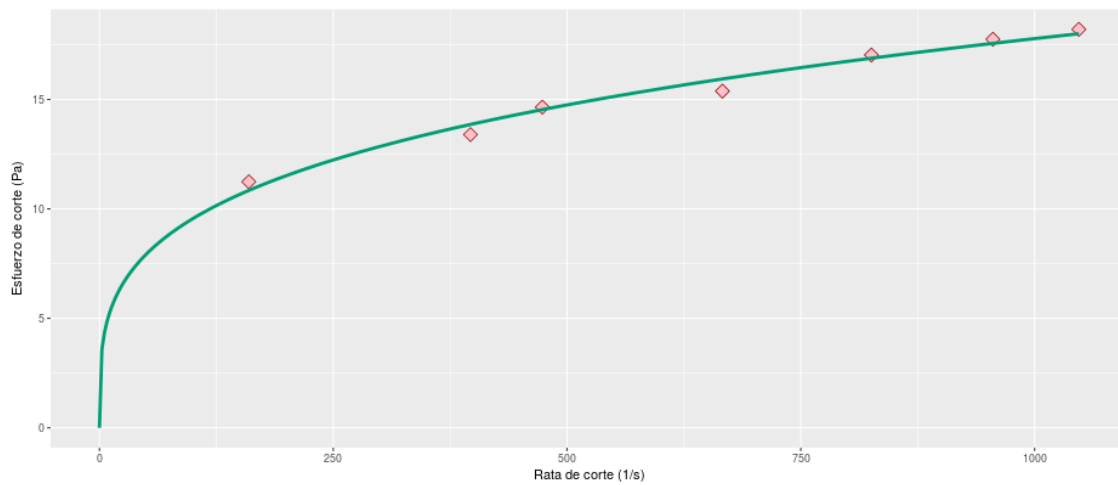


Figura 5.12: Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.15.
Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,21E+02	10.658.605	4.982.025	149.360	0.0300	567.96	Laminar
2,04E+02	10.060.140	4.597.250	140.973	0.0307	512.39	Laminar
1,80E+02	9.768.492	4.045.319	136.886	0.0338	408.59	Laminar
1,55E+02	9.485.807	3.485.996	132.925	0.0381	312.45	Laminar
1,24E+02	8.930.090	2.789.081	125.138	0.0449	212.46	Laminar
9,91E+01	8.021.361	2.232.743	112.404	0.0503	151.58	Laminar
4,61E+01	7.240.185	1.039.189	101.457	0.0976	36.38	Laminar

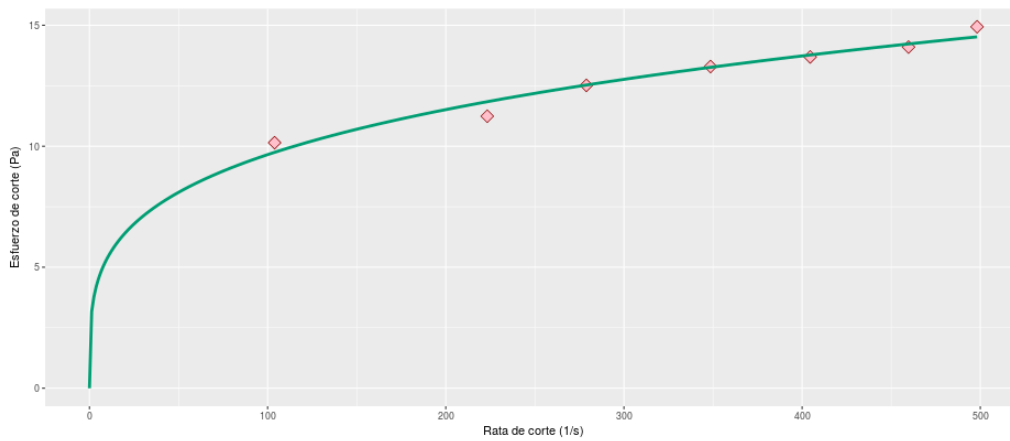


Figura 5.13: Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 5.16.
Lodo convencional B, 50° C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,43E+02	18311.10	17.695.856	156.590	0.0088	2195.88	Indeterminado
1,27E+02	17394.78	15.733.639	148.754	0.0095	1827.34	Laminar
1,12E+02	16955.59	13.800.301	144.998	0.0105	1442.26	Laminar
1,02E+02	16016.52	12.654.504	136.968	0.0108	1283.82	Laminar
7,63E+01	15087.11	9.435.656	129.020	0.0137	757.74	Laminar
4,79E+01	13659.89	5.929.579	116.815	0.0197	330.51	Laminar
1,39E+01	12243.71	1.715.574	104.704	0.0610	30.87	Laminar

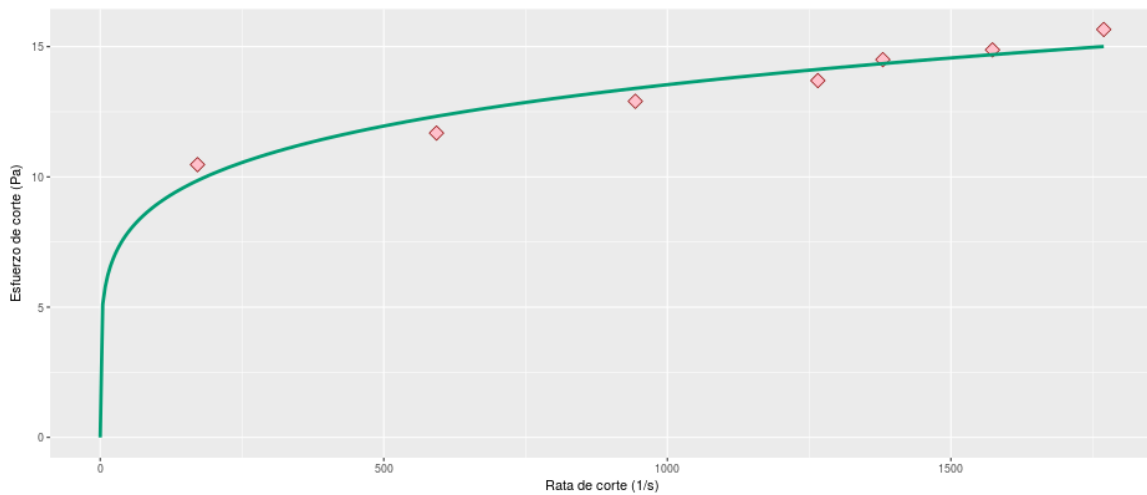


Figura 5.14: Lodo convencional B, 50° C, Línea 1

Tabla 5.17.
Lodo convencional B, 50° C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,98E+02	12.854.585	10.274.315	140.216	0.0136	1475.64	Laminar
1,78E+02	12.109.952	9.225.382	132.093	0.0143	1262.87	Laminar
1,59E+02	11.634.213	8.255.650	126.904	0.0154	1052.68	Laminar
1,55E+02	11.013.685	8.025.571	120.136	0.0150	1050.88	Laminar
1,34E+02	10.266.983	6.961.583	111.991	0.0161	848.21	Laminar
9,57E+01	9.449.954	4.964.845	103.079	0.0208	468.72	Laminar
5,83E+01	8.217.172	3.026.690	89.632	0.0296	200.33	Laminar

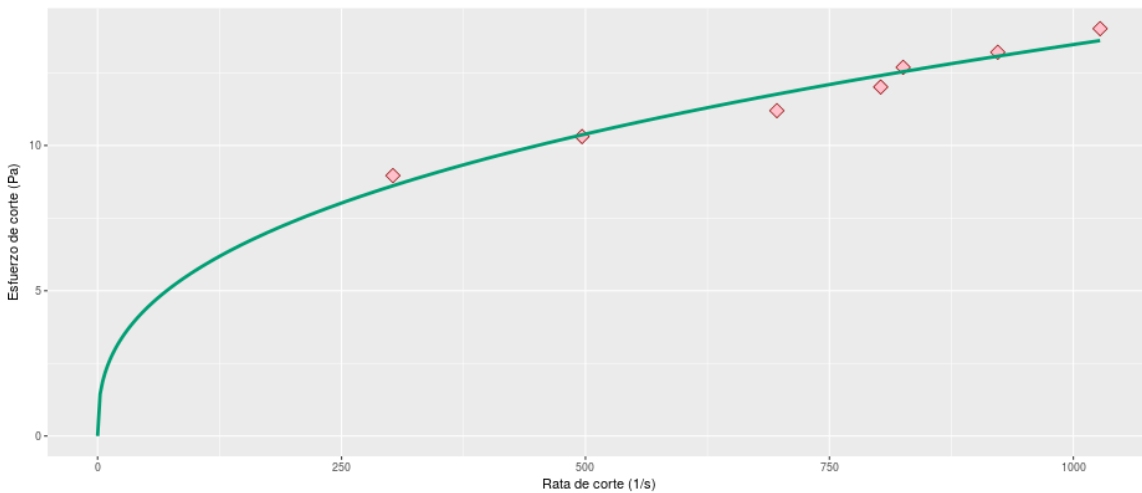


Figura 5.15: Lodo convencional B, 50° C, Línea 2

Tabla 5.18.
Lodo convencional B, 50° C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,13E+02	8.863.210	4.808.471	124.201	0.0258	636.25	Laminar
1,95E+02	8.362.651	4.384.040	117.186	0.0267	560.55	Laminar
1,72E+02	8.338.520	3.869.633	116.848	0.0302	437.98	Laminar
1,60E+02	7.765.565	3.601.983	108.819	0.0302	407.49	Laminar
1,39E+02	7.547.691	3.125.101	105.766	0.0338	315.59	Laminar
1,03E+02	6.714.804	2.319.307	94.095	0.0406	195.38	Laminar
7,38E+01	6.192.181	1.663.755	86.771	0.0522	109.03	Laminar
2,25E+01	5.422.037	506.020	75.979	0.1502	11.52	Laminar

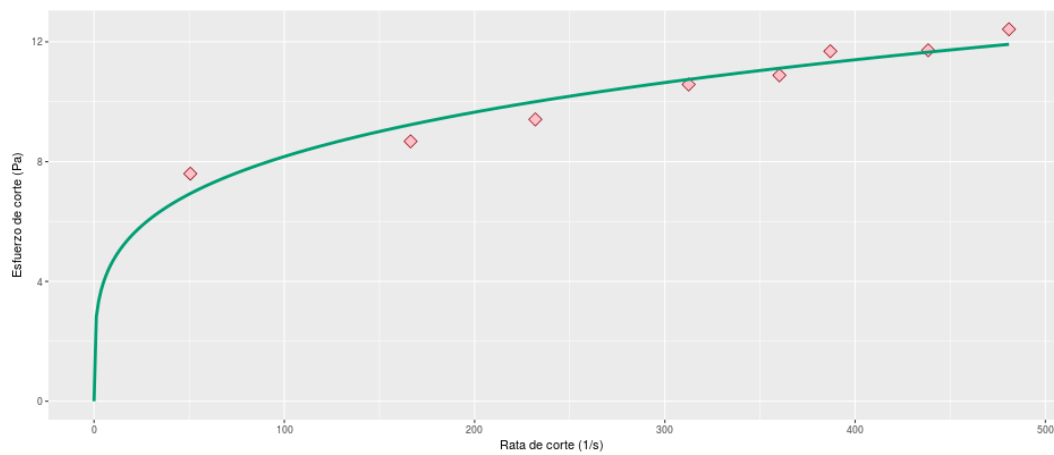


Figura 5.16: Lodo convencional B, 50° C, Línea 3

Tabla 5.19.
Lodo convencional B, 65° C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,32E+02	17905.68	16.377.564	153.123	0.0093	1923.48	Laminar
1,17E+02	16601.32	14.499.146	141.969	0.0098	1626.01	Laminar
1,12E+02	15832.43	13.849.473	135.393	0.0098	1555.61	Laminar
9,16E+01	14794.08	11.326.066	126.514	0.0112	1113.40	Laminar
6,13E+01	13672.99	7.585.053	116.927	0.0154	540.30	Laminar
3,08E+01	12305.76	3.809.698	105.234	0.0276	151.44	Laminar

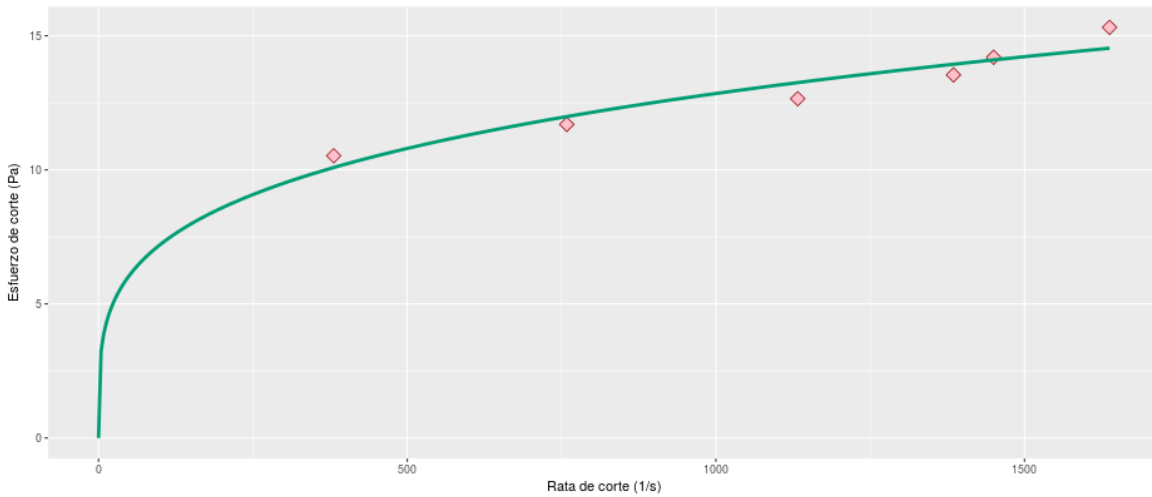


Figura 5.17: Lodo convencional B, 65° C, Línea 1

Tabla 5.20.
Lodo convencional B, 65° C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,93E+02	11.940.341	9.995.145	130.243	0.0130	1503.47	Laminar
1,75E+02	11.269.481	9.053.232	122.926	0.0136	1306.88	Laminar
1,45E+02	10.535.189	7.512.723	114.916	0.0153	962.69	Laminar
1,32E+02	10.010.498	6.832.961	109.193	0.0160	838.10	Laminar
9,97E+01	9.021.790	5.173.322	98.408	0.0190	533.06	Laminar
8,63E+01	8.424.014	4.477.197	91.888	0.0205	427.59	Laminar
3,52E+01	7.338.780	1.823.607	80.050	0.0439	81.43	Laminar

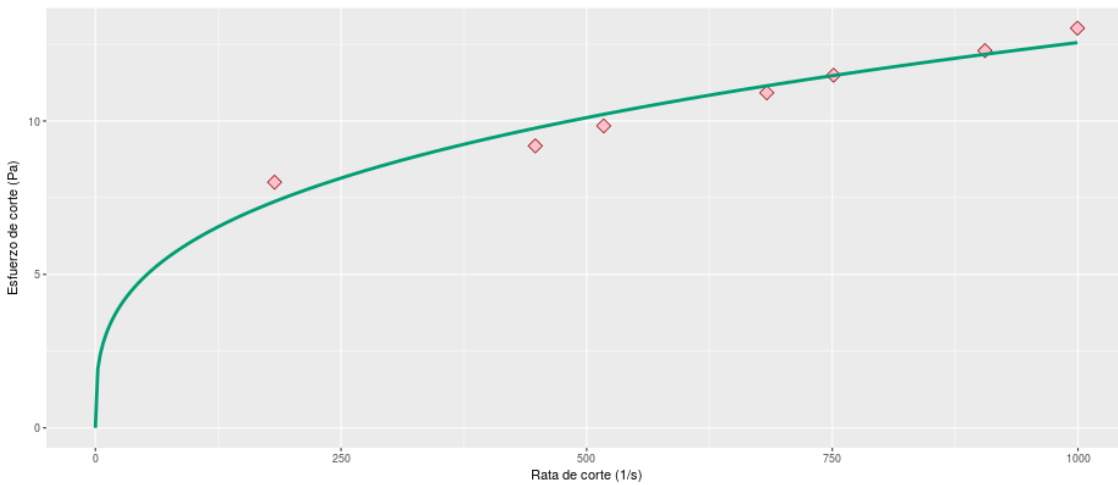


Figura 5.18: Lodo convencional B, 65° C, Línea 2

Tabla 5.21.
Lodo convencional B, 65° C, Linea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,97E+02	8.119.266	4.448.287	113.776	0.0256	594.40	Laminar
1,81E+02	7.558.033	4.077.869	105.911	0.0260	536.62	Laminar
1,74E+02	7.411.175	3.923.931	103.853	0.0265	506.71	Laminar
1,46E+02	7.020.931	3.288.136	98.385	0.0299	375.59	Laminar
1,16E+02	6.556.225	2.623.487	91.873	0.0350	256.04	Laminar
8,57E+01	6.201.039	1.931.580	86.895	0.0450	146.75	Laminar
5,36E+01	5.577.859	1.207.089	78.163	0.0648	63.71	Laminar

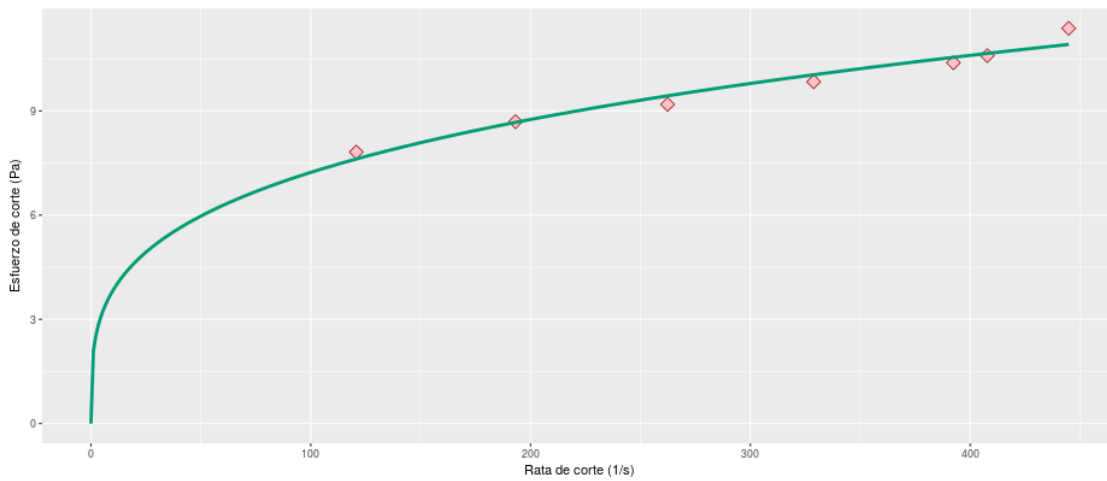


Figura 5.19: Lodo convencional B, 65° C, Linea 3

Tabla5.22.

Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,23E+02	20654.62	15.220.059	176.631	0.0116	1440.11	Laminar
1,13E+02	19483.21	14.029.773	166.613	0.0119	1297.24	Laminar
9,96E+01	18822.00	12.325.907	160.959	0.0131	1036.46	Laminar
8,17E+01	17930.51	10.113.144	153.335	0.0152	732.42	Laminar
6,30E+01	16712.20	7.789.548	142.917	0.0183	466.20	Laminar
4,23E+01	15431.16	5.238.822	131.962	0.0252	228.38	Laminar

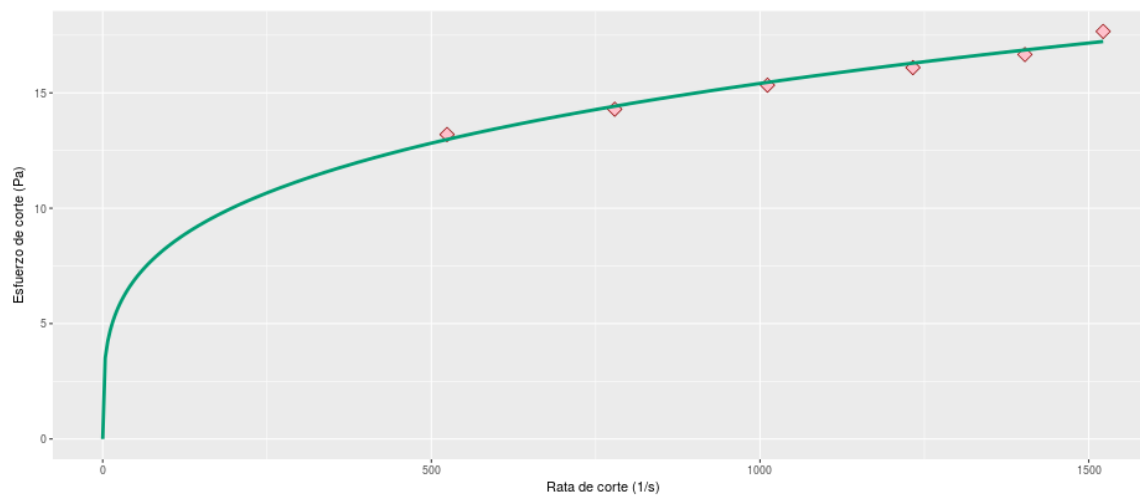


Figura 5.20: Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.23.
Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,01E+02	14.062.547	10.424.537	153.392	0.0147	1388.62	Laminar
1,85E+02	13.319.292	9.579.499	145.285	0.0152	1238.05	Laminar
1,68E+02	12.475.374	8.697.151	136.079	0.0156	1089.51	Laminar
1,38E+02	11.646.624	7.145.514	127.040	0.0178	787.77	Laminar
1,23E+02	10.829.595	6.374.769	118.127	0.0185	674.29	Laminar
8,55E+01	9.889.840	4.436.941	107.877	0.0243	357.69	Laminar
4,98E+01	8.852.179	2.584.206	96.558	0.0374	135.56	Laminar

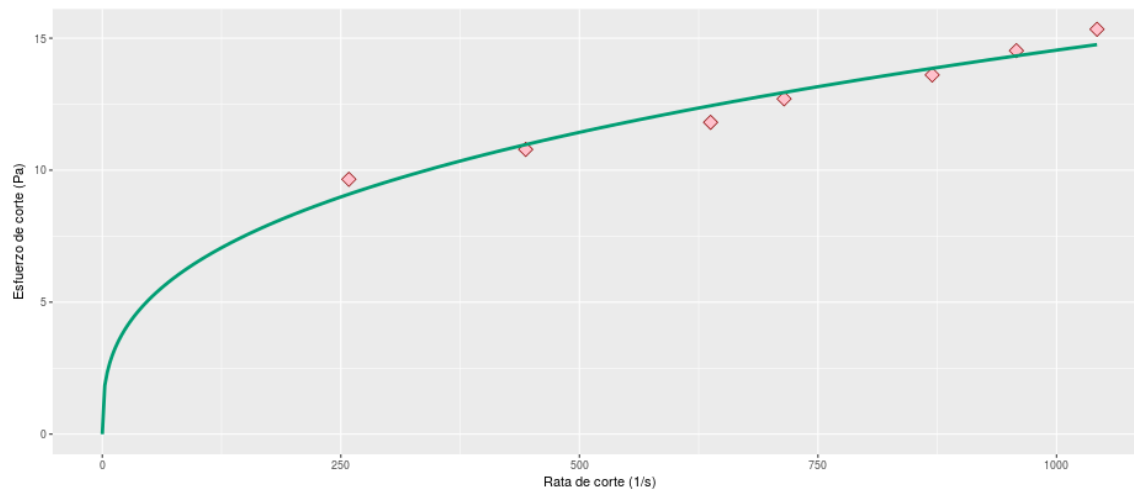


Figura 5.21: Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.24.
Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,27E+02	9.767.803	5.108.814	136.877	0.0268	651.70	Laminar
2,03E+02	9.119.006	4.584.174	127.785	0.0279	562.06	Laminar
1,85E+02	8.888.032	4.171.824	124.548	0.0299	477.59	Laminar
1,59E+02	8.301.288	3.572.844	116.326	0.0326	375.05	Laminar
1,32E+02	7.851.060	2.965.762	110.017	0.0371	273.24	Laminar
9,84E+01	7.081.605	2.217.676	99.235	0.0447	169.38	Laminar
7,01E+01	6.264.577	1.580.318	87.786	0.0555	97.23	Laminar
1,63E+01	5.386.184	366.296	75.477	0.2061	6.08	Laminar

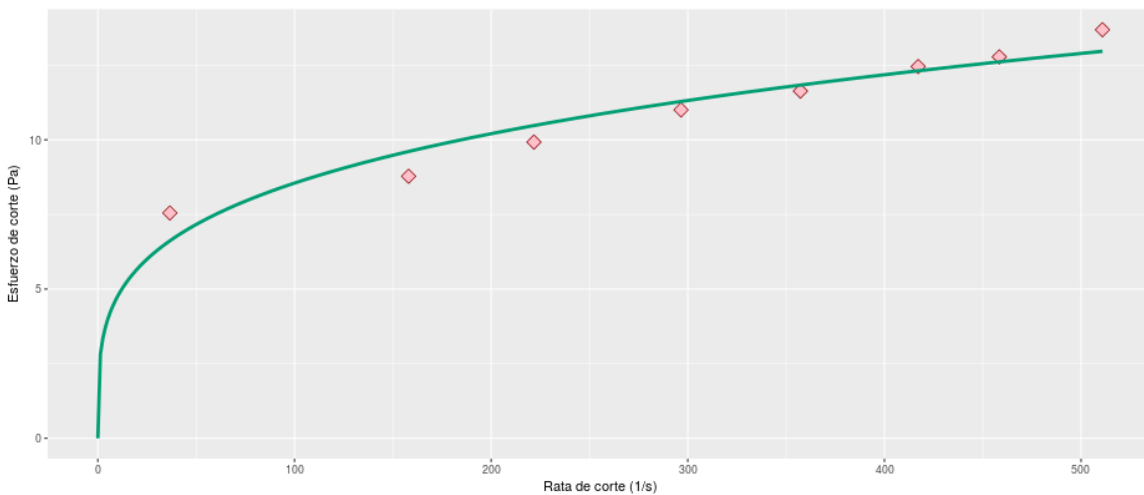


Figura 5.22: Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 3

5.2.2. Fluidos con Sábila

Tabla 5.25.
Lodo Sábila A, 50°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,62E+02	12.953.181	20.015.549	110.771	0.0055	3971.36	Indeterminado
1,56E+02	12.378.158	19.256.887	105.854	0.0055	3846.78	Indeterminado
1,47E+02	11.353.597	18.176.653	97.092	0.0053	3736.59	Indeterminado
1,37E+02	10.071.862	16.990.269	86.131	0.0051	3680.20	Indeterminado
1,26E+02	8.912.163	15.604.073	76.214	0.0049	3508.11	Indeterminado
1,13E+02	7.462.196	13.949.380	63.814	0.0046	3348.30	Indeterminado
9,81E+01	6.057.734	12.138.583	51.804	0.0043	3123.25	Indeterminado
8,53E+01	4.775.998	10.558.038	40.843	0.0039	2996.97	Indeterminado
6,36E+01	3.604.579	7.872.283	30.825	0.0039	2207.64	Indeterminado
4,33E+01	1.909.158	5.351.997	16.326	0.0031	1926.51	Laminar
2,53E+01	1.577.521	3.131.430	13.490	0.0043	798.16	Laminar

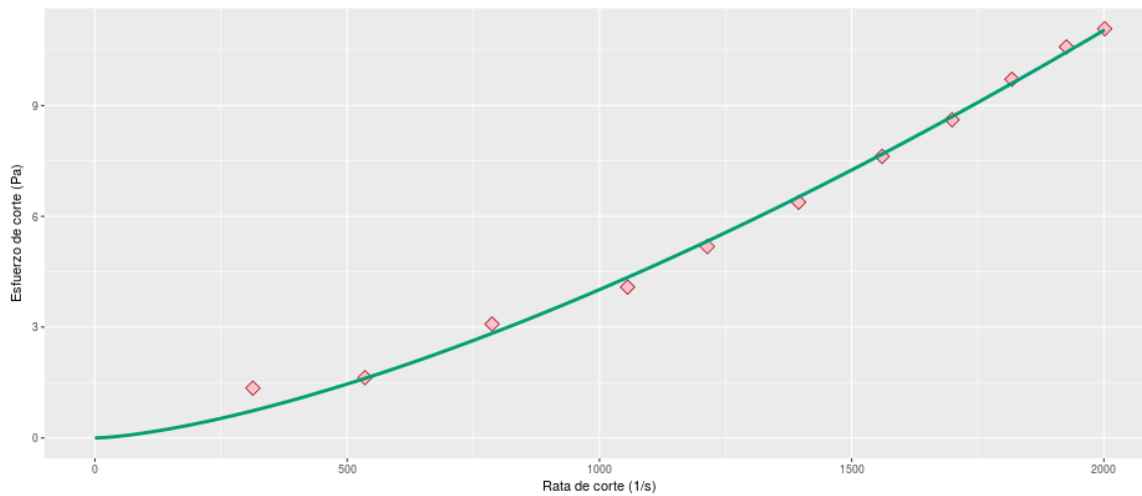


Figura 5.23: Lodo Sábila A, 50°C, Línea 1

Tabla 5.26.
Lodo Sábila A, 50°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,54E+02	98.760.504	13.184.821	107.726	0.0082	3162.99	Indeterminado
2,35E+02	88.770.000	12.196.106	96.829	0.0079	3010.99	Indeterminado
2,25E+02	79.730.973	11.646.275	86.969	0.0075	3056.89	Indeterminado
2,06E+02	70.933.263	10.680.143	77.373	0.0072	2889.59	Indeterminado
1,88E+02	59.487.966	9.728.412	64.889	0.0067	2858.82	Indeterminado
1,66E+02	49.952.517	8.633.658	54.487	0.0063	2681.42	Indeterminado
1,41E+02	38.121.113	7.310.791	41.582	0.0057	2519.39	Indeterminado
1,19E+02	32.012.358	6.172.182	34.919	0.0057	2138.42	Indeterminado
9,34E+01	19.574.216	4.842.769	21.351	0.0044	2152.96	Indeterminado
6,44E+01	13.961.884	3.339.570	15.229	0.0046	1435.39	Laminar
3,15E+01	9.190.711	1.633.457	10.025	0.0061	521.67	Laminar

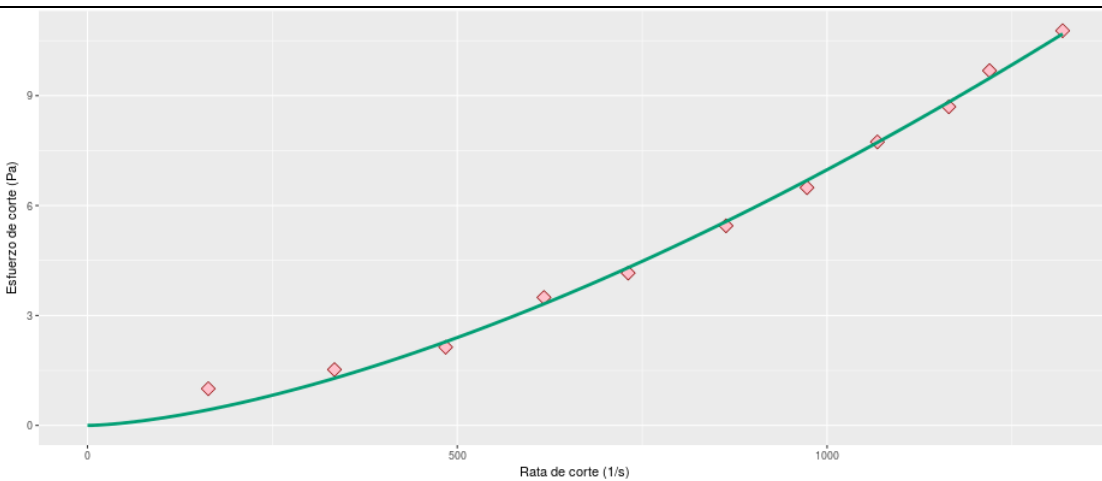


Figura 5.24: Lodo Sábila A, 50°C, Línea 2

Tabla 5.27.
Lodo Sábila A, 50°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,90E+02	52.875.894	6.528.229	74.095	0.0113	1965.80	Laminar
2,71E+02	48.132.301	6.095.554	67.448	0.0111	1882.77	Laminar
2,57E+02	43.368.023	5.793.363	60.772	0.0105	1887.55	Laminar
2,29E+02	37.031.741	5.162.259	51.893	0.0101	1755.14	Laminar
2,26E+02	31.771.042	5.081.097	44.521	0.0088	1981.94	Laminar
1,91E+02	24.690.126	4.303.020	34.598	0.0080	1829.07	Laminar
1,65E+02	21.415.116	3.720.954	30.009	0.0081	1576.87	Laminar
1,36E+02	15.299.466	3.072.225	21.439	0.0070	1504.65	Laminar
1,06E+02	11.397.034	2.392.509	15.971	0.0067	1224.96	Laminar
7,46E+01	9.811.240	1.681.522	13.749	0.0082	702.89	Laminar
3,56E+01	6.646.546	802.952	0.9314	0.0116	236.59	Laminar

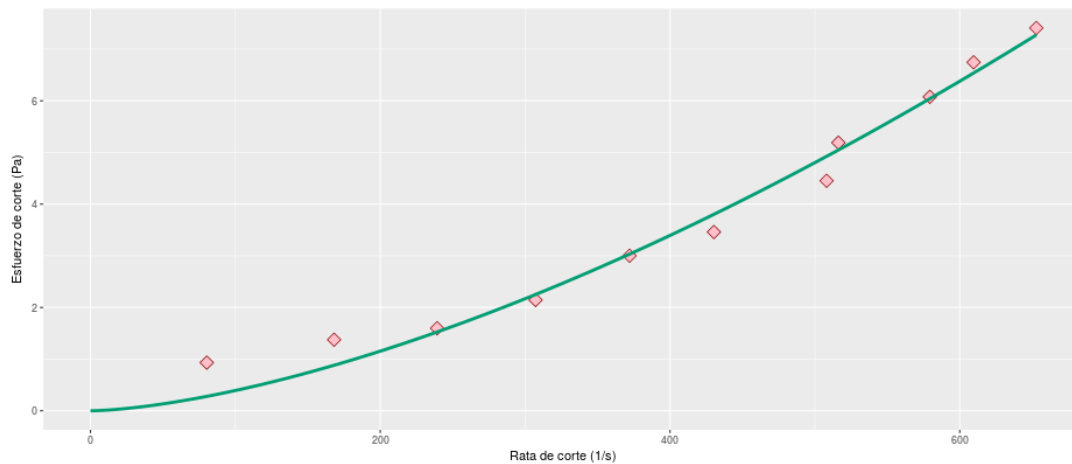


Figura 5.25: Lodo Sábila A, 50°C, Línea 3

Tabla 5.28.
Lodo Sábila A, 65°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,78E+02	14.074.958	22.042.548	120.364	0.0055	4432.59	Turbulento
1,69E+02	13.124.171	20.898.312	112.233	0.0054	4272.98	Turbulento
1,58E+02	11.818.303	19.583.143	101.066	0.0052	4166.68	Turbulento
1,45E+02	10.464.173	17.927.669	89.486	0.0050	3943.88	Indeterminado
1,30E+02	9.143.827	16.105.945	78.195	0.0049	3642.71	Indeterminado
1,16E+02	7.728.333	14.369.297	66.090	0.0046	3430.57	Indeterminado
9,93E+01	6.044.634	12.284.539	51.692	0.0042	3205.74	Indeterminado
8,37E+01	4.665.682	10.351.982	39.899	0.0039	2949.26	Indeterminado
6,62E+01	3.397.736	8.193.856	29.056	0.0035	2537.28	Indeterminado
6,09E+01	1.884.337	7.531.198	16.114	0.0021	3865.01	Indeterminado

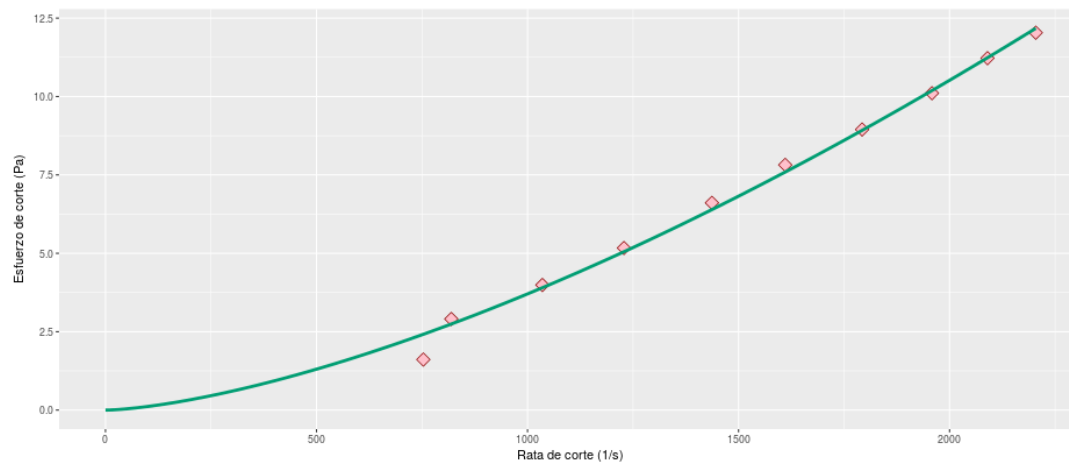


Figura 5.26: Lodo Sábila A, 65°C, Línea 1

Tabla 5.29.
Lodo Sábila A, 65°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,62E+02	98.401.976	13.570.357	107.335	0.0079	3362.88	Indeterminado
2,47E+02	89.450.074	12.829.989	97.571	0.0076	3306.77	Indeterminado
2,30E+02	79.606.868	11.906.463	86.834	0.0073	3199.98	Indeterminado
2,09E+02	68.623.519	10.849.020	74.853	0.0069	3082.06	Indeterminado
1,90E+02	56.799.011	9.837.069	61.955	0.0063	3061.42	Indeterminado
1,69E+02	47.284.246	8.761.952	51.577	0.0059	2917.55	Indeterminado
1,47E+02	38.486.535	7.645.599	41.980	0.0055	2729.27	Indeterminado
1,25E+02	27.730.714	6.481.789	30.248	0.0047	2722.46	Indeterminado
9,84E+01	20.911.799	5.105.248	22.810	0.0045	2239.62	Indeterminado
6,61E+01	12.119.451	3.428.445	13.220	0.0039	1742.79	Laminar
4,14E+01	7.487.706	2.147.942	0.8167	0.0038	1107.21	Laminar

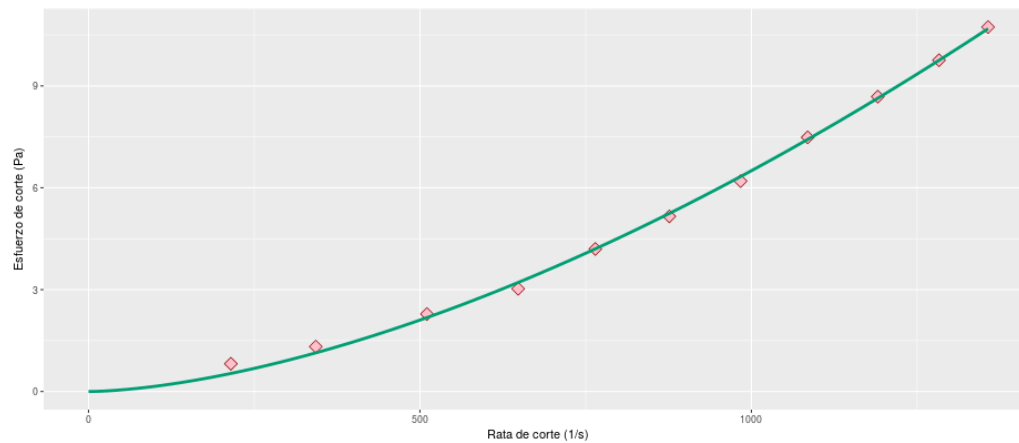


Figura 5.27: Lodo Sábila A, 65°C, Línea 2

Tabla 5.30.
Lodo Sábila A, 65°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,88E+02	51.662.416	6.486.866	72.395	0.0112	1986.56	Laminar
2,68E+02	47.036.034	6.036.423	65.912	0.0109	1889.45	Laminar
2,53E+02	40.423.962	5.694.149	56.646	0.0099	1956.26	Laminar
2,31E+02	34.825.419	5.196.515	48.801	0.0094	1891.19	Laminar
2,12E+02	30.426.564	4.785.445	42.637	0.0089	1835.69	Laminar
1,84E+02	26.648.237	4.149.650	37.342	0.0090	1576.02	Laminar
1,60E+02	19.326.005	3.601.983	27.082	0.0075	1637.37	Laminar
1,39E+02	13.348.250	3.125.954	18.705	0.0060	1785.45	Laminar
1,10E+02	9.080.395	2.480.352	12.724	0.0051	1652.45	Laminar
8,04E+01	6.749.967	1.812.007	0.9459	0.0052	1186.38	Laminar
4,36E+01	4.236.445	981.875	0.5937	0.0060	555.03	Laminar

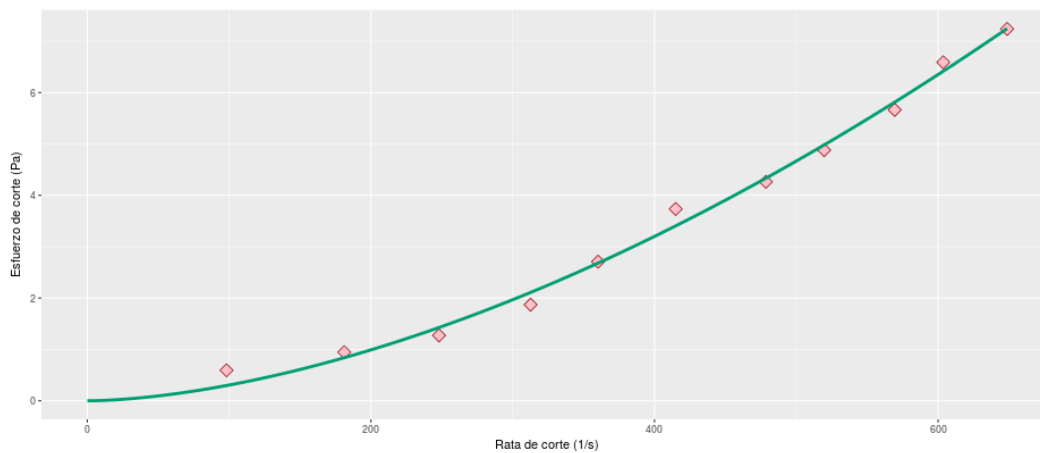


Figura 5.28: Lodo Sábila A, 65°C, Línea 3

Tabla 5.31.
Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,52E+02	14.685.833	18.750.333	125.588	0.0067	3073.97	Indeterminado
1,46E+02	13.879.836	18.120.456	118.695	0.0066	3037.63	Indeterminado
1,40E+02	12.755.990	17.345.404	109.085	0.0063	3028.55	Indeterminado
1,26E+02	11.230.870	15.550.218	96.042	0.0062	2764.65	Indeterminado
1,14E+02	10.009.809	14.084.409	85.600	0.0061	2544.67	Indeterminado
9,97E+01	8.094.445	12.337.614	69.221	0.0056	2414.66	Indeterminado
8,64E+01	6.727.904	10.684.482	57.535	0.0054	2178.75	Indeterminado
6,74E+01	5.336.542	8.332.787	45.636	0.0055	1670.71	Laminar
5,25E+01	3.688.695	6.490.770	31.544	0.0049	1466.56	Laminar
3,25E+01	2.493.834	4.022.779	21.326	0.0053	833.23	Laminar

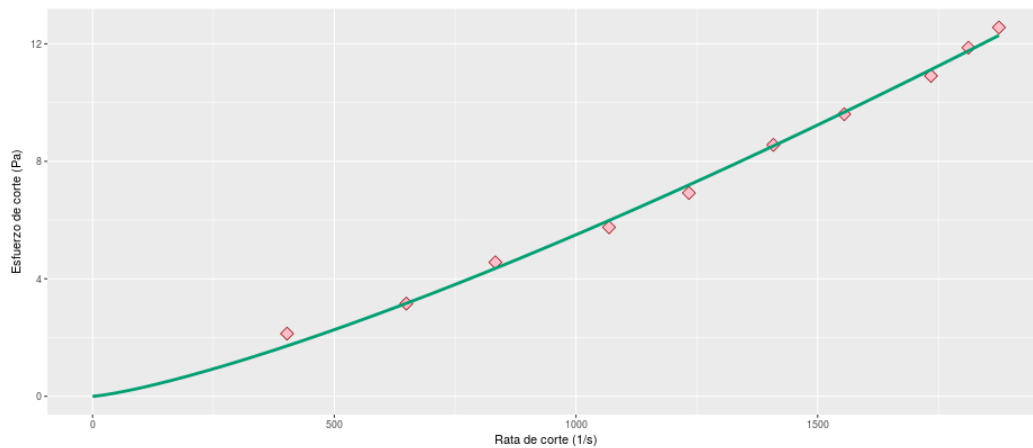


Figura 5.29: Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.32.
Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,61E+02	11.133.654	13.519.301	121.444	0.0090	2949.87	Indeterminado
2,43E+02	10.096.683	12.599.316	110.133	0.0087	2825.19	Indeterminado
2,22E+02	8.852.179	11.531.072	96.558	0.0084	2699.12	Indeterminado
2,06E+02	7.971.718	10.660.834	86.954	0.0082	2561.90	Indeterminado
1,85E+02	6.666.541	9.619.427	72.718	0.0076	2494.20	Indeterminado
1,60E+02	5.373.774	8.294.923	58.616	0.0071	2300.79	Indeterminado
1,38E+02	4.336.113	7.148.787	47.298	0.0066	2117.86	Indeterminado
1,13E+02	3.275.699	5.862.902	35.731	0.0061	1885.62	Laminar
8,47E+01	2.213.907	4.393.086	24.149	0.0055	1566.44	Laminar

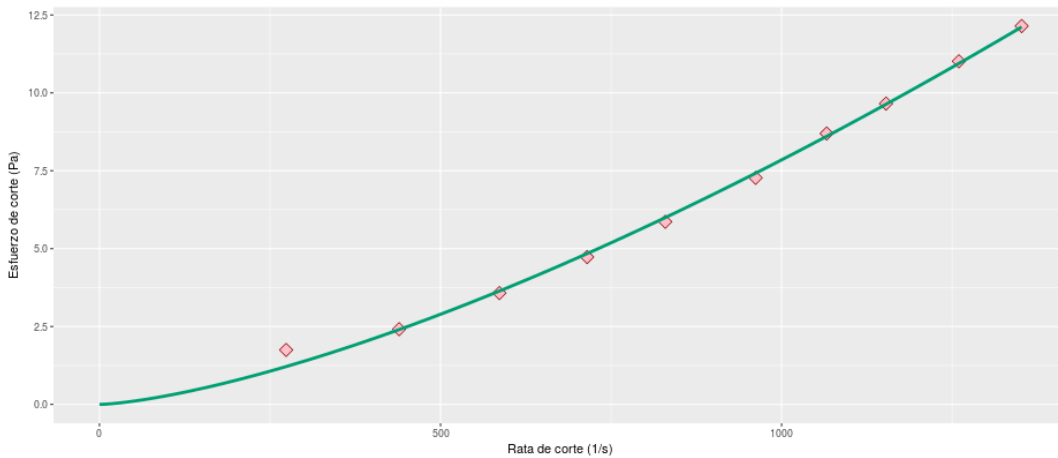


Figura 5.30: Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.33.
Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,83E+02	5.972.928	6.378.555	83.699	0.0131	1661.36	Laminar
2,63E+02	5.581.306	5.928.396	78.211	0.0132	1535.84	Laminar
2,45E+02	5.008.352	5.528.413	70.182	0.0127	1488.38	Laminar
2,30E+02	4.348.523	5.187.418	60.936	0.0117	1509.27	Laminar
2,09E+02	3.799.701	4.697.460	53.245	0.0113	1416.39	Laminar
1,88E+02	3.128.841	4.238.061	43.845	0.0103	1400.10	Laminar
1,61E+02	2.543.476	3.637.233	35.642	0.0098	1268.59	Laminar
1,31E+02	2.092.559	2.958.513	29.323	0.0099	1020.18	Laminar
9,88E+01	1.884.337	2.224.925	26.405	0.0119	640.74	Laminar
6,80E+01	1.516.847	1.530.995	21.256	0.0139	376.89	Laminar
2,56E+01	1.432.041	575.811	20.067	0.0349	56.47	Laminar

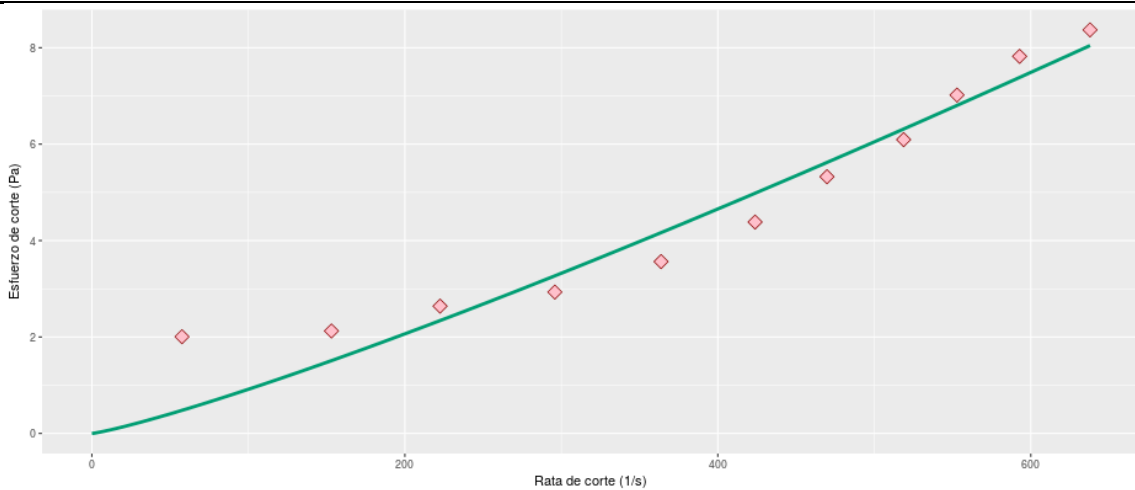


Figura 5.31: Lodo Sábila A, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 5.34.
Lodo Sábila B, 50°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,62E+02	14.025.315	20.017.110	119.939	0.0060	3668.35	Indeterminado
1,55E+02	13.160.713	19.207.715	112.546	0.0059	3599.59	Indeterminado
1,45E+02	12.008.787	17.989.472	102.695	0.0057	3460.34	Indeterminado
1,35E+02	10.650.279	16.684.427	91.077	0.0055	3356.16	Indeterminado
1,20E+02	9.132.106	14.822.777	78.095	0.0053	3089.36	Indeterminado
1,08E+02	7.838.650	13.360.090	67.033	0.0050	2923.87	Indeterminado
9,14E+01	6.021.192	11.312.797	51.491	0.0046	2729.22	Indeterminado
7,64E+01	4.678.782	9.457.511	40.011	0.0042	2454.72	Indeterminado
5,82E+01	3.385.326	7.194.015	28.950	0.0040	1963.01	Laminar
3,97E+01	2.238.728	4.907.103	19.145	0.0039	1381.11	Laminar
1,70E+01	1.016.977	2.098.807	0.8697	0.0041	556.18	Laminar

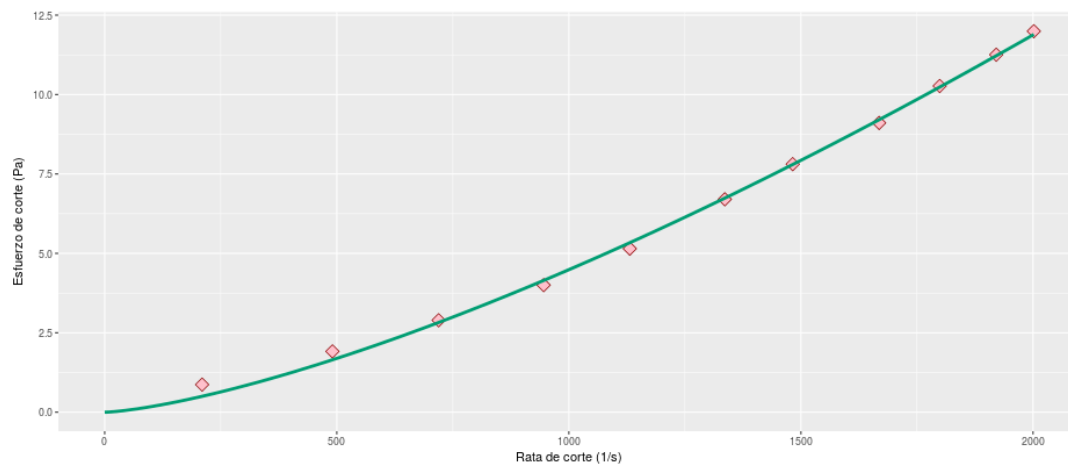


Figura 5.32: Lodo Sábila B, 50°C, Línea 1

Tabla 5.35.
Lodo Sábila B, 50°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,60E+02	102.187.198	13.493.119	111.464	0.0083	3201.55	Indeterminado
2,42E+02	94.120.332	12.567.570	102.665	0.0082	3015.45	Indeterminado
2,23E+02	82.785.351	11.585.728	90.301	0.0078	2913.57	Indeterminado
2,06E+02	71.181.474	10.664.106	77.644	0.0073	2870.88	Indeterminado
1,89E+02	59.956.809	9.782.413	65.400	0.0067	2868.05	Indeterminado
1,65E+02	50.207.623	8.579.003	54.766	0.0064	2634.13	Indeterminado
1,44E+02	41.540.913	7.467.558	45.312	0.0061	2412.20	Indeterminado
1,20E+02	31.288.409	6.220.947	34.129	0.0055	2222.60	Indeterminado
9,32E+01	20.677.377	4.835.569	22.555	0.0047	2032.04	Indeterminado
6,90E+01	11.762.456	3.581.103	12.830	0.0036	1959.15	Laminar
3,48E+01	7.722.128	1.803.970	0.8423	0.0047	757.28	Laminar

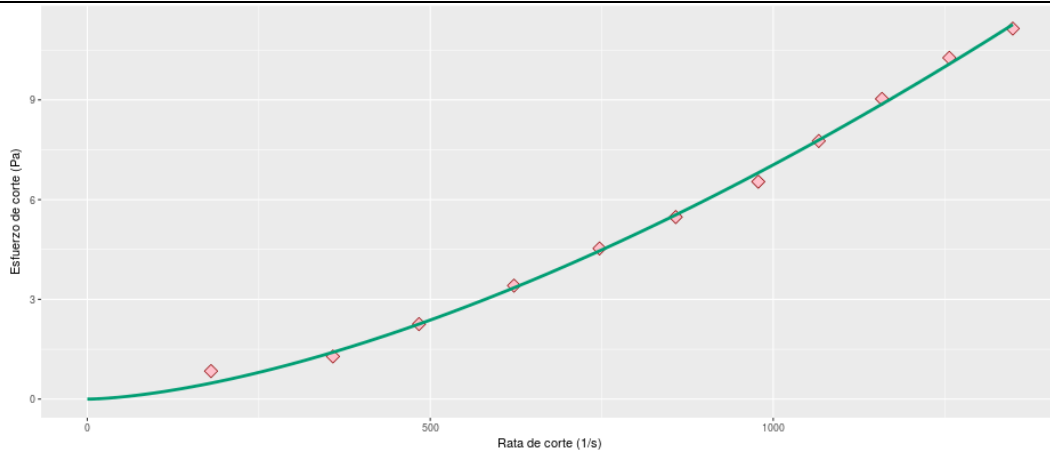


Figura 5.33: Lodo Sábila B, 50°C, Línea 2

Tabla 5.36
Lodo Sábila B, 50°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	Ua	Re	Regimen
2,88E+02	5.520.632	6.489.141	77.361	0.0119	1860.34	Laminar
2,69E+02	5.142.110	6.059.734	72.057	0.0119	1741.70	Laminar
2,51E+02	4.556.745	5.650.938	63.854	0.0113	1709.20	Laminar
2,29E+02	3.945.870	5.161.264	55.294	0.0107	1646.55	Laminar
2,07E+02	3.263.289	4.674.291	45.729	0.0098	1632.99	Laminar
1,82E+02	2.677.234	4.105.871	37.516	0.0091	1535.79	Laminar
1,57E+02	2.177.364	3.539.157	30.512	0.0086	1403.06	Laminar
1,33E+02	1.554.078	2.993.479	21.777	0.0073	1406.33	Laminar
1,06E+02	1.065.929	2.392.367	14.937	0.0062	1309.59	Laminar
0 7.290072e-05	626.044	1.642.434	0.8773	0.0053	1050.94	Laminar

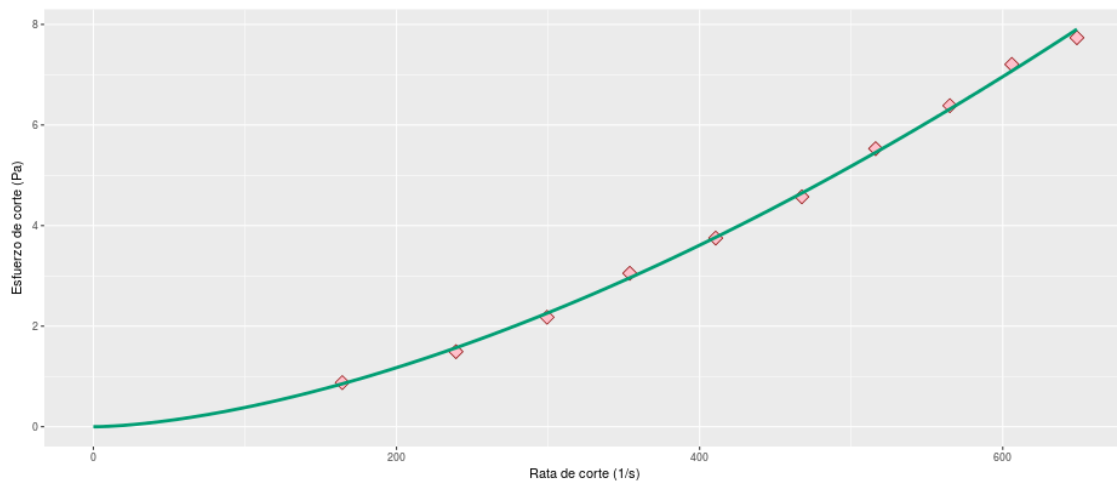


Figura 5.34: Lodo Sábila B, 50°C, Línea 3

Tabla 5.37.
Lodo Sábila B, 65°C, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,74E+02	14.197.684	21.543.799	121.414	0.0056	4197.66	Turbulento
1,67E+02	13.196.566	20.604.838	112.852	0.0055	4131.03	Turbulento
1,43E+02	10.561.389	17.638.097	90.317	0.0051	3782.36	Indeterminado
1,28E+02	8.692.910	15.812.471	74.339	0.0047	3693.30	Indeterminado
1,13E+02	7.411.864	13.965.770	63.384	0.0045	3378.96	Indeterminado
9,79E+01	6.143.918	12.111.265	52.541	0.0043	3065.59	Indeterminado
8,20E+01	4.655.340	10.139.682	39.811	0.0039	2835.81	Indeterminado
6,42E+01	3.348.784	7.943.310	28.638	0.0036	2419.34	Indeterminado
4,40E+01	2.287.680	5.444.098	19.563	0.0036	1663.56	Laminar
0 2.239071e-05	1.016.977	2.770.051	0.8697	0.0031	968.82	Laminar

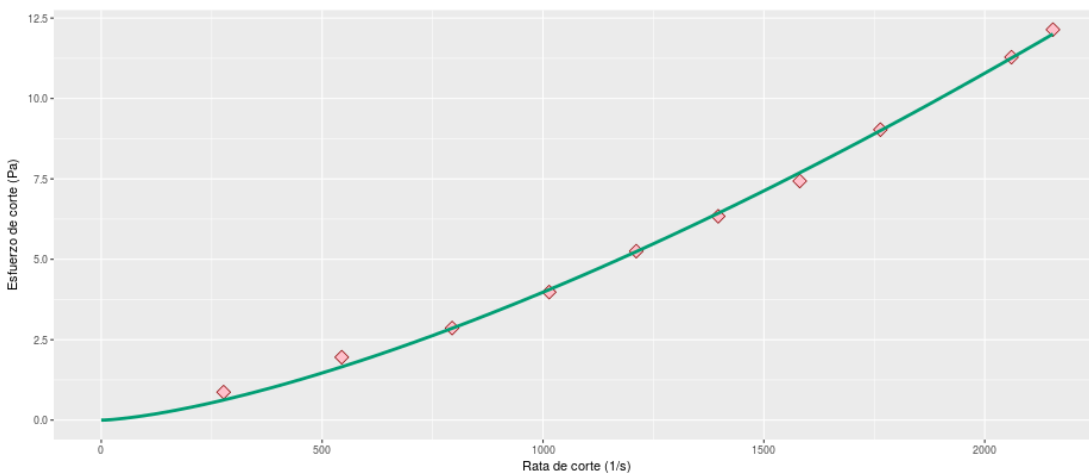


Figura 5.35: Lodo Sábila B, 65°C, Línea 1

Tabla 5.38.
Lodo Sábila B, 65°C, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,68E+02	100.842.720	13.923.165	109.998	0.0079	3454.33	Indeterminado
2,48E+02	89.493.950	12.869.322	97.619	0.0076	3325.45	Indeterminado
2,29E+02	80.089.501	11.904.172	87.360	0.0073	3179.47	Indeterminado
2,10E+02	69.830.102	10.879.784	76.170	0.0070	3046.00	Indeterminado
1,93E+02	57.647.066	10.007.582	62.880	0.0063	3121.86	Indeterminado
1,70E+02	47.884.089	8.839.845	52.231	0.0059	2932.45	Indeterminado
1,48E+02	37.376.479	7.664.254	40.770	0.0053	2824.06	Indeterminado
1,25E+02	27.985.820	6.464.116	30.526	0.0047	2682.95	Indeterminado
9,97E+01	19.208.794	5.173.649	20.953	0.0040	2503.95	Indeterminado
7,21E+01	11.514.245	3.740.488	12.560	0.0034	2183.50	Indeterminado
4,01E+01	4.791.856	2.078.558	0.5227	0.0025	1620.14	Laminar

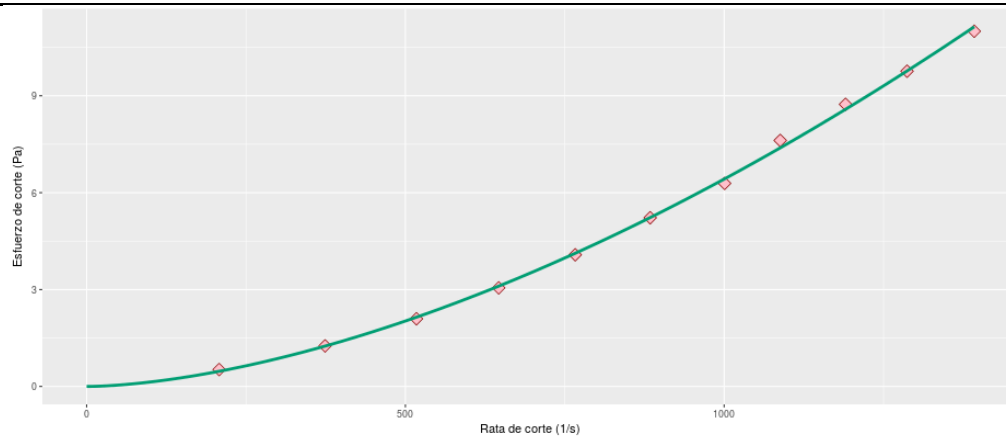


Figura 5.36: Lodo Sábila B, 65°C, Línea 2

Tabla 5.39.
Lodo Sábila B, 65°C, Línea 3

Q	DP	SR	SS	Ua	Re	Regimen
2,96E+02	52.889.683	6.657.861	74.115	0.0111	2044.11	Indeterminado
2,82E+02	48.614.934	6.350.127	68.124	0.0107	2023.03	Indeterminado
2,61E+02	42.382.073	5.882.627	59.390	0.0101	1991.44	Laminar
2,38E+02	36.169.897	5.360.829	50.685	0.0095	1937.86	Laminar
2,11E+02	32.632.886	4.762.560	45.729	0.0096	1695.24	Laminar
1,89E+02	25.193.443	4.248.580	35.304	0.0083	1747.46	Laminar
1,66E+02	18.719.266	3.729.909	26.231	0.0070	1812.65	Laminar
1,41E+02	13.713.672	3.181.957	19.217	0.0060	1800.70	Laminar
1,11E+02	9.080.395	2.494.992	12.724	0.0051	1672.02	Laminar
9,11E+01	6.632.757	2.052.083	0.9295	0.0045	1548.47	Laminar
4,73E+01	2.840.640	1.064.917	0.3981	0.0037	973.69	Laminar

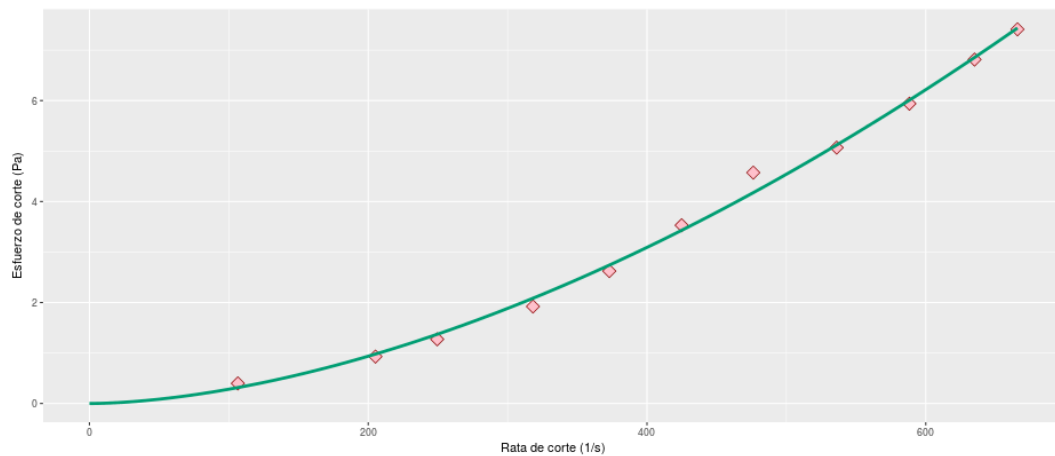


Figura 5.37: Lodo Sábila B, 65°C, Línea 3

Tabla 5.40.
Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 1

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
1,62E+02	14.025.315	20.017.110	119.939	0.0060	3668.35	Indeterminado
1,55E+02	13.160.713	19.207.715	112.546	0.0059	3599.59	Indeterminado
1,45E+02	12.008.787	17.989.472	102.695	0.0057	3460.34	Indeterminado
1,35E+02	10.650.279	16.684.427	91.077	0.0055	3356.16	Indeterminado
1,20E+02	9.132.106	14.822.777	78.095	0.0053	3089.36	Indeterminado
1,08E+02	7.838.650	13.360.090	67.033	0.0050	2923.87	Indeterminado
9,14E+01	6.021.192	11.312.797	51.491	0.0046	2729.22	Indeterminado
7,64E+01	4.678.782	9.457.511	40.011	0.0042	2454.72	Indeterminado
5,82E+01	3.385.326	7.194.015	28.950	0.0040	1963.01	Laminar
3,97E+01	2.238.728	4.907.103	19.145	0.0039	1381.11	Laminar
1,70E+01	1.016.977	2.098.807	0.8697	0.0041	556.18	Laminar

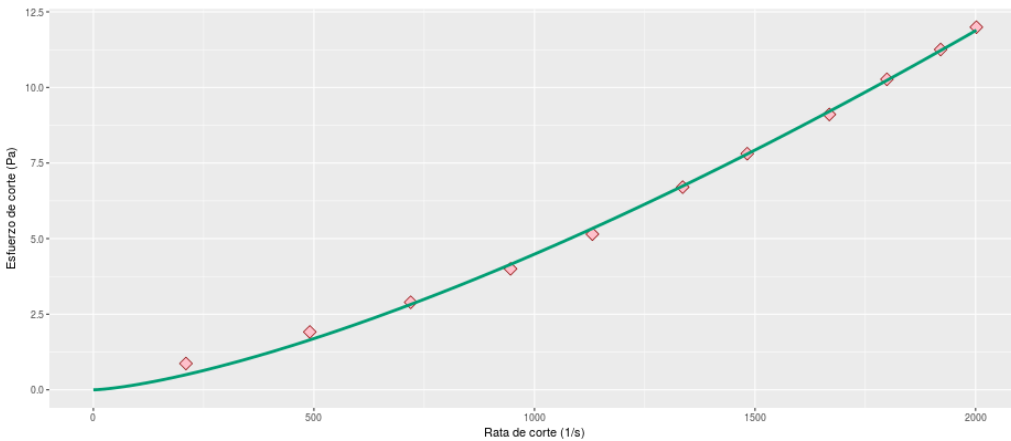


Figura 5.38: Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.41.
Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 2

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,60E+02	102.187.198	13.493.119	111.464	0.0083	3201.55	Indeterminado
2,42E+02	94.120.332	12.567.570	102.665	0.0082	3015.45	Indeterminado
2,23E+02	82.785.351	11.585.728	90.301	0.0078	2913.57	Indeterminado
2,06E+02	71.181.474	10.664.106	77.644	0.0073	2870.88	Indeterminado
1,89E+02	59.956.809	9.782.413	65.400	0.0067	2868.05	Indeterminado
1,65E+02	50.207.623	8.579.003	54.766	0.0064	2634.13	Indeterminado
1,44E+02	41.540.913	7.467.558	45.312	0.0061	2412.20	Indeterminado
1,20E+02	31.288.409	6.220.947	34.129	0.0055	2222.60	Indeterminado
9,32E+01	20.677.377	4.835.569	22.555	0.0047	2032.04	Indeterminado
6,90E+01	11.762.456	3.581.103	12.830	0.0036	1959.15	Laminar
3,48E+01	7.722.128	1.803.970	0.8423	0.0047	757.28	Laminar

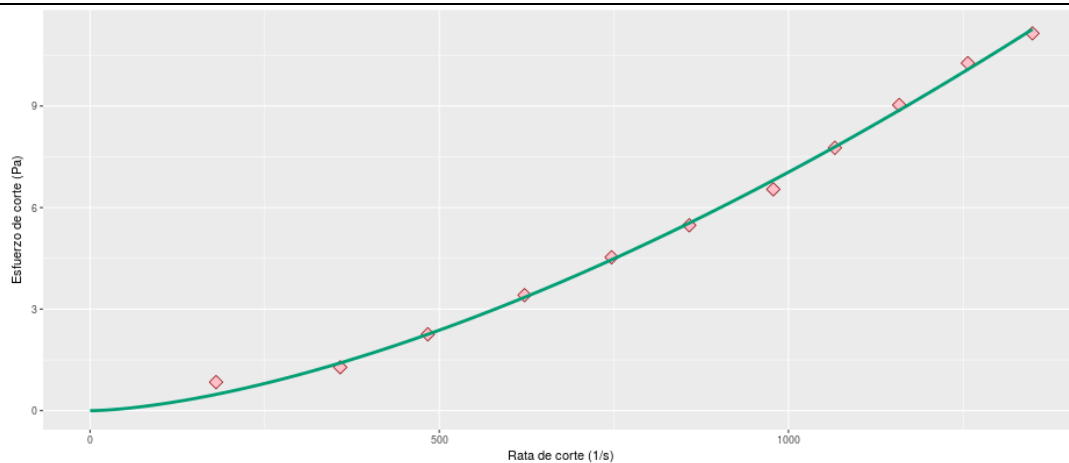


Figura 5.39: Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.42.
Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 3

Q	DP	SR	SS	ua	Re	Regimen
2,88E+02	5.520.632	6.489.141	77.361	0.0119	1860.34	Laminar
2,69E+02	5.142.110	6.059.734	72.057	0.0119	1741.70	Laminar
2,51E+02	4.556.745	5.650.938	63.854	0.0113	1709.20	Laminar
2,29E+02	3.945.870	5.161.264	55.294	0.0107	1646.55	Laminar
2,07E+02	3.263.289	4.674.291	45.729	0.0098	1632.99	Laminar
1,82E+02	2.677.234	4.105.871	37.516	0.0091	1535.79	Laminar
1,57E+02	2.177.364	3.539.157	30.512	0.0086	1403.06	Laminar
1,33E+02	1.554.078	2.993.479	21.777	0.0073	1406.33	Laminar
1,06E+02	1.065.929	2.392.367	14.937	0.0062	1309.59	Laminar
7,29E+01	626.044	1.642.434	0.8773	0.0053	1050.94	Laminar

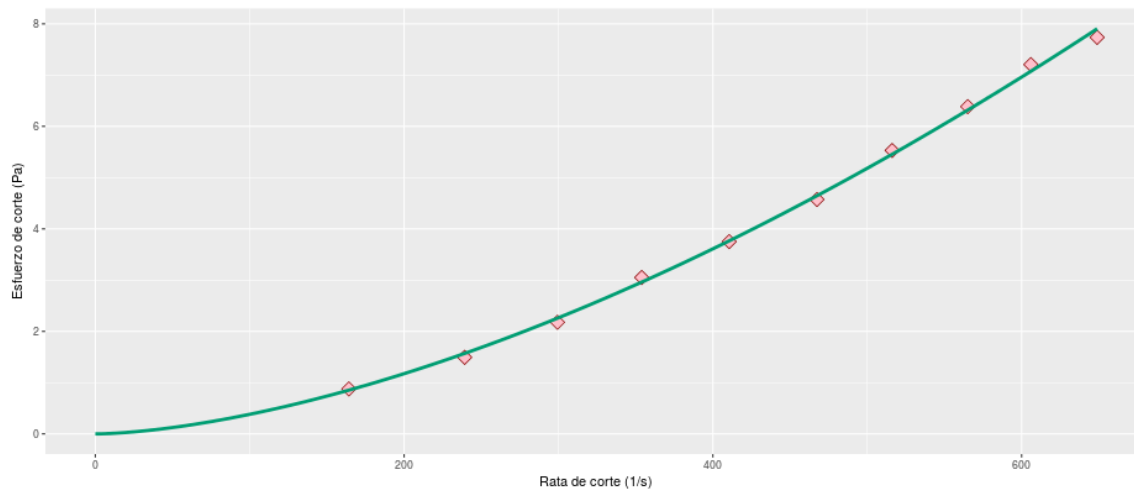


Figura 5.40: Lodo Sábila B, Temperatura ambiente, Línea 3

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. RESULTADOS CON VISCOSÍMETRO ROTACIONAL

6.1.1. Fluidos Convencionales

Los valores de esfuerzo de corte obtenidos de las pruebas en el viscosímetro Fann para fluidos convencionales presentaron coherencia respecto a presentar una tendencia sostenida de la relación con la composición, siendo esta de proporcionalidad directa a lo largo de las pruebas realizadas. Además, los reogramas no presentaron puntos de inflexión indeseados causados por valores atípicos.

Los valores de viscosidad plástica obtenidos, que van de los 9 a los 14 centipoises, se encuentran por encima de los valores típicos establecidos, que corresponden a un rango entre 5 y 7 centipoises, sin embargo, esta diferencia no representa efectos negativos en el funcionamiento del lodo en condiciones de pozo y por lo tanto no es una desviación lo suficientemente grande para considerarse indeseada.

Las curvas de flujo generadas por los grupos de datos adquiridos presentaron una forma no lineal y no pasaron por el origen, por lo cual, y como es de esperar en el caso de un fluido de perforación, sabemos que los lodos tratados se clasifican como No Newtonianos. En cuanto a comportamientos de los fluidos observados, se pueden resaltar la viscoplasticidad que hace que se requiera un esfuerzo cortante inicial para que el fluido comience a fluir, sumada a una pseudoplasticidad que provee la forma curva del reograma en valores bajos de la tasa de corte y que evidencia un decremento en la viscosidad aparente mientras la tasa de corte aumenta. Para valores mayores de la tasa de corte se observó que siempre hubo un punto después del cual el reograma adquiría una tendencia lineal, lo cual significa a su vez una estabilización del valor de la viscosidad aparente en la gráfica.

La forma observada en todas las curvas resultantes, descrita anteriormente, concuerda en términos generales con el modelo reológico de Herschel Bulkley, aunque con cercanía al modelo de Ley de Potencia al no presentar esfuerzos cedentes de gran magnitud y altas pendientes en valores bajos de la tasa de corte.

Cabe mencionar que las pruebas realizadas en el viscosímetro rotacional, tanto para los fluidos convencionales como para los fluidos con contenido de sábila, sirvieron a su vez como pruebas preliminares en la determinación de la composición de los lodos utilizados en las pruebas con el reómetro de tubos, seleccionándose las dos composiciones con mejor desempeño en cada caso. Simultáneamente, las pruebas de pH, densidad, sólidos y filtrado contribuyeron factores adicionales a tener en cuenta en este proceso de selección.

En el caso de los fluidos convencionales, la prueba de pH fue exitosa y de igual resultado para todas las composiciones utilizadas, alcanzando el valor objetivo de 9.5. De igual manera, la prueba de densidad arrojó valores mayormente consistentes, presentando únicamente variaciones mínimas a la magnitud esperada de 8.5 libras por galón que no representan afectaciones significativas en aspectos como tasa de penetración y estabilidad del pozo, entre otros.

En cuanto a porcentaje de sólidos, se presentó una variación en los resultados con valores que se encuentran en el rango de 1.8% hasta 5.55%, la cual satisface el principio de mantener su magnitud por debajo del 6% para evitar impactos operacionales negativos, por lo cual este parámetro fue descartado en el proceso de selección de los mejores lodos a menos de que llegara a ser el único factor diferenciador entre dos o más candidatos.

La prueba de filtrado arrojó valores que cumplieron en solo cinco ocasiones del total de dieciséis con el rango óptimo de 12 a 15 ml esperado para este tipo de fluidos, por lo cual se favorecieron estas formulaciones sobre las demás al comparar rendimientos. Cabe mencionar que con una única excepción en el caso del lodo 4 con 22 ml de filtrado, los valores por fuera del rango mencionado sólo excedieron el límite superior por un máximo de 3 ml, lo cual puede llegar a ser aceptable dependiendo de las condiciones operacionales, por lo cual las demás composiciones pudieron ser consideradas en caso de exhibir un comportamiento mucho mejor en otras pruebas. Además, los revoques obtenidos fueron delgados e impermeables para todas las muestras.

Finalmente, como método para ayudar a establecer la calidad de los lodos muestreados y comparar los resultados del reómetro de tubos con los del rotacional, se llevó a cabo el cálculo del Índice de Capacidad de Acarreo para dos caudales de bomba diferentes. Este se calculó mediante la ecuación 10.1:

$$CCI = \frac{K(AV)(MW)}{400,000}$$

Ecuación 10.1. Ecuación para el cálculo del Índice de Capacidad de Acarreo. (DrillingFormulas.com, 2011).

Donde K es la constante de la Ley de Potencia, AV es la velocidad anular en pies por minuto y MW es la densidad del lodo en libras por galón.

La constante de la Ley de Potencia, K, puede ser hallada con la ecuación:

$$K = (511)^{1-n}(PV + YP)$$

Ecuación 10.2. Ecuación para el cálculo de la constante de Ley de la Potencia. (DrillingFormulas.com, 2011).

Donde PV es la viscosidad plástica en centipoises, YP es el punto cedente en libras sobre 100 pies cuadrados y n es el índice de comportamiento de flujo. Definido por la ecuación:

$$n = 3.322 \log\left(\frac{2PV + YP}{PV + YP}\right)$$

Ecuación 10.2. Ecuación para el cálculo del Índice de Comportamiento de Flujo. (DrillingFormulas.com, 2011).

Una vez obtenido el Índice de Capacidad de Acarreo se sabe que valores de 0.5 y menores para este mismo son considerados malos, pudiendo evidenciar problemas de hoyo, mientras que valores de 1.0 y superiores demuestran una limpieza de pozo buena.

Los cálculos del Índice de Capacidad de Acarreo fueron realizados bajo las siguientes consideraciones para condiciones operacionales: sección de 12 ¼”, diámetro del hueco abierto 12 ¼”, diámetro externo del drill pipe 5 pulgadas, diámetro del revestimiento 9 5/8” y bomba PZ-9 Gardner Denver con caudales de 500 y 900 gal/min.

Los resultados de los cálculos del Índice de capacidad de Acarreo son presentados en la tabla 6.1

Tabla 6.1:
Resultados de Índice de Capacidad de Carreo para lodos convencionales.

-	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6	Lodo7
n	0,58497516	0,53434799	0,40600115	0,3692418	0,5360645	0,4947754	0,45944156
K	292,741723	529,151003	1625,0207	2452,44866	361,046044	513,787511	1048,00238
CCI 500gal/min	0,60957868	1,10185582	3,38379498	5,10675553	0,75180937	1,06986428	2,18226462
CCI 900gal/min	1,09724162	1,98334047	6,09083096	9,19215995	1,35325687	1,9257557	3,92807632

Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12	Lodo 13	Lodo 14	Lodo15	Lodo16
0,462982	0,36257793	0,40526525	0,37851982	0,33162867	0,32862986	0,32510241	0,29956677	0,26710985
1053,5921	1864,12619	1510,05842	1928,81205	2874,68917	2830,22767	3061,38629	4102,71504	5699,37203
2,19390415	3,88168645	3,14440801	4,01638239	5,98599068	5,89340811	6,37475175	8,54311982	11,8678528
3,94902747	6,98703561	5,65993441	7,22948829	10,7747832	10,6081346	11,4745531	15,3776157	21,362135

Los datos resultantes del cálculo del Índice de Capacidad de Acarreo permiten observar que todas las formulaciones utilizadas exhiben una limpieza de pozo buena a ambos caudales de bomba considerados a excepción del lodo 1 y el lodo 5, que no obtuvieron valores mayores a 1.0 para el caudal de 500 gal/min; no obstante, el valor se encontró por encima de 0.5 en ambos casos, lo que describe una calidad intermedia en cuanto a limpieza de pozo.

De tales valores obtenidos para el Índice de Capacidad de Acarreo podemos concluir que, incluso tratándose de fluidos con una composición que busca reducir la cantidad de sólidos presentes en su composición, podemos ver que alcanzar un nivel ideal de limpieza de pozo es una meta totalmente realista y alcanzable, al menos para las condiciones consideradas en estos cálculos, las cuales son a su vez bastante comunes en escenarios reales. Además de esto, debemos tener en cuenta que los fluidos

muestreados usando el reómetro de tubos no presentan sacrificios en el ámbito de la limpieza de pozo, sino que por lo contrario, la satisfacen adecuadamente a pesar de su baja concentración de componentes.

En cuanto a la selección final de los dos mejores lodos convencionales para ser usados en el reómetro de tubos, teniendo en cuenta los resultados de las diferentes pruebas preliminares, se decidió escoger los lodos con formulaciones número 5 y 6, los cuales obtuvieron resultados significativamente sobresalientes en el área de reología, exhibiendo las viscosidades y puntos cedentes que más se acoplaron a los parámetros óptimos esperados en un fluido no disperso bajo en sólidos, incluso cuando el lodo 5 pudo haber demostrado un mejor Índice de Capacidad de Acarreo.

6.1.2. Fluidos con Sábila

La forma de los reogramas generados usando los datos obtenidos de las pruebas con aditivo de cáscara de sábila no mostró comportamientos que atípicos en un fluido no newtoniano, sin embargo, se observó la presencia de diferencias significativas en la dispersión de los puntos para cada línea, debida probablemente a las formas y tamaños irregulares de las partículas de aditivo, sumado al hecho de que el método provee de sólo seis puntos para definir la forma de la curva.

A pesar de las mencionadas variaciones, la forma general de los reogramas correspondió a un fluido del mismo tipo de los presentes en el caso de las pruebas de los fluidos convencionales, es decir, la de fluidos No Newtonianos que obedecen al modelo de Herschel con bajo punto de cedencia que los acerca al comportamiento de la Ley de Potencia.

Al igual que con los lodos convencionales, las pruebas de pH y densidad obtuvieron resultados consistentes que concuerdan con los valores óptimos en la formulación de un fluido no disperso bajo en sólidos.

En cuanto a porcentaje de sólidos, se presentaron resultados, a excepción de un valor atípico de 8.72% para el lodo 13, con valores generalmente inferiores a los obtenidos en los fluidos convencionales, demostrando una ventaja de la cáscara de sábila frente a la goma xántica en este aspecto. Adicionalmente, cabe reafirmar que los valores estuvieron dentro de los rangos recomendados excluyendo al valor atípico mencionado.

La prueba de filtrado arrojó valores que cumplieron en alrededor de la mitad de los casos con el rango recomendado para lodos de este tipo, sin embargo, los valores que se encontraron por encima de este rango demostraron ser significativamente mayores a los de los lodos convencionales, especialmente al incrementar el contenido de sábila y bentonita, lo que denota una desventaja del aditivo frente a la goma xántica, presentando además revoques menos definidos e impermeables.

Al corresponder al mismo método de medición reológica y demostrar un comportamiento similar al de los fluidos convencionales, el Índice de Capacidad de Acarreo fue hallado a través del mismo procedimiento y los valores resultantes son presentados en la tabla 6.2.

Tabla 6.2:

Resultados de Índice de Capacidad de Carreo para lodos con sábila.

-	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Lodo 4	Lodo 5	Lodo 6
n	0,485437335	0,5305262	0,44058213	0,39593725	0,54058008	0,51458431
K	247,5439278	168,180315	458,423732	821,882603	193,061285	288,960202
CCI 500gal/min	0,51546291	0,35020336	0,95457979	1,71141341	0,40201322	0,60170439
CCI 900gal/min	0,927833238	0,63036604	1,71824363	3,08054414	0,7236238	1,08306789

Lodo7	Lodo 8	Lodo 9	Lodo 10	Lodo 11	Lodo 12
0,67808658	0,61299015	0,58497516	0,44058213	0,41504648	0,45944156
111,67817	189,947902	159,677303	458,423732	575,959028	465,778835
0,23254844	0,3955302	0,33249746	0,95457979	1,19932458	0,96989539
0,41858719	0,71195435	0,59849543	1,71824363	2,15878424	1,7458117

Lodo 13	Lodo 14	Lodo15	Lodo16	Lodo17	Lodo18
0,65209081	0,41504648	0,3870315	0,36257793	0,34793083	0,46949545
61,2890032	460,767222	594,456455	745,650476	641,904531	355,445463
0,12762263	0,95945966	1,23784194	1,55267458	1,33664348	0,74014723
0,22972074	1,72702739	2,22811548	2,79481424	2,40595827	1,33226502

Lodo19	Lodo20	Lodo21	Lodo22	Lodo23	Lodo24
0,44058213	0,41504648	0,28011398	0,51458431	0,39593725	0,54058008
458,423732	575,959028	1247,04571	288,960202	821,882603	386,12257
0,95457979	1,19932458	2,59673431	0,60170439	1,71141341	0,80402644
1,71824363	2,15878424	4,67412175	1,08306789	3,08054414	1,4472476

Los valores obtenidos de Índice de Capacidad de Acarreo fueron generalmente bastante menores a los observados en los fluidos convencionales, con pocos de estos situándose por encima de la unidad en el caudal de 500 gal/min y algunos incluso alcanzando valores por debajo de 0.3, pero con resultados más alentadores en el caudal de 900 gal/min, donde se mostró un buen nivel de limpieza en casi todas las muestras.

De acuerdo a la magnitud de los valores obtenidos para CCI en lodos con sábila podemos ver que desafortunadamente la presencia de este componente afectó en gran manera la capacidad de limpieza de pozo de los fluidos muestreados, no obstante, el rango de posible disminución de este factor establecido por los resultados en fluidos convencionales era lo suficientemente grande para que varias formulaciones se encontraran en un rango favorable de limpieza de pozo y por ello la presencia del componente, mientras es un factor a considerar, no imposibilita el uso del componente en fluidos de perforación, especialmente cuando demuestra aumentar la viscosidad del

fluido, que es el objetivo principal de su uso, al reemplazar la presencia de otro viscosificante por una alternativa natural y económica.

Con respecto a la elección de los fluidos a utilizar en las pruebas del reómetro de tubos, las formulaciones número 15 y 19 coincidieron en ofrecer tanto un buen nivel de limpieza de pozo como un comportamiento cómodo en cuanto a reología se refiere, además de lecturas satisfactorias en pruebas de sólidos y filtrado.

6.2. RESULTADOS CON REOMETRO DE TUBOS

6.2.1. Fluidos Convencionales

Los datos para fluidos convencionales arrojados por la herramienta de caracterización reológica, así como las gráficas resultantes arrojadas por la misma, evidencian una tendencia mayormente lineal de los puntos, sin embargo, en el caso de ambas composiciones utilizadas, se puede observar que algunas de las gráficas presentan una mayor pendiente en los valores más bajos alcanzados del eje horizontal, lo cual evidenciaría una concordancia con el modelo de Ley de Potencia mostrado por la línea de tendencia. Respecto a esta ocurrencia, es necesario denotar que el panorama deseado en cuanto a la gráfica respecta sería el de poder diferenciar con claridad la tendencia del modelo reológico demostrado por el fluido a lo largo de una cantidad significativa de puntos, lo cual representaría una posible debilidad de este método de caracterización. Al mismo tiempo, se debe tener en cuenta que el método rotacional, incluso cuando se encuentra limitado por valerse de únicamente seis puntos para conformar un reograma, siempre posee dos de ellos ligados a valores de rata de corte muy bajos, lo que representa una ventaja sobre el método del reómetro de tubos. La causa de esta restricción en valores bajos de la rata de corte es el hecho de que no es posible llenar las tuberías con los caudales más bajos, y por lo tanto realizar mediciones, si no se trabaja con un determinado caudal mínimo; lo que a su vez establece un valor mínimo de rata de corte a la que se somete el fluido, causando un intervalo de incertidumbre en una región del reograma. En cuanto a posibles modificaciones a realizar al montaje para solventar el problema está el reducir la longitud de las tuberías que lo conforman o incluso más directamente, reducir el diámetro interno de las tuberías, no obstante, la viabilidad de estos cambios no se puede confirmar desde esta posición, ya que requeriría un nuevo planteamiento y diseño del sistema, así como la disponibilidad en el mercado de partes con diferentes dimensiones a las presentes.

Al analizar comparativamente las gráficas arrojadas por el software para una misma muestra de fluido en una temperatura determinada, se observó que la pendiente de la parte lineal de la gráfica y el resto de la línea de tendencia no presentaron variaciones inesperadas o incoherentes al cambiar el diámetro de la tubería por la que se daba el flujo, notándose que un cambio significativo entre estas era la magnitud de los valores que componen cada punto, demostrando una relación inversamente proporcional al diámetro de la tubería tanto en el caso de la rata de corte como en el del esfuerzo de corte. Por esto, en el caso de los fluidos convencionales usados, se denota una utilidad directamente práctica en el análisis de los reogramas resultantes para una misma temperatura y composición, resaltando a su vez que las tablas de datos generadas por el software proveen una caracterización extensiva del flujo a estas condiciones y también pueden llegar a ser de utilidad para extrapolar su magnitud a diámetros de tubería

mayores o menores, al tener ya tres puntos diferentes de estos parámetros y permitir esto el estudio o predicción de comportamientos de flujo, aunque probablemente no sea aplicable a anulares, los cuales demandan condiciones y consideraciones físicas diferentes. Esto último se manifiesta como una aparente ventaja sobre el método rotacional, que no cuenta con la variación de diámetros de su contraparte.

Continuando con los resultados para composiciones y temperaturas diferentes, tampoco se observaron inconsistencias que pongan en duda la coherencia de las tendencias que muestran los resultados, demostrando de igual manera una utilidad para el estudio del comportamiento de flujo de un producto y la posible predicción de este mismo a condiciones de mayor o menor magnitud, según sea necesario.

Es importante mencionar que la ausencia de tendencias incoherentes en los resultados obtenidos comprueba que se logró evitar exitosamente una potencial fuente de error en forma de la posible obstrucción de las tuberías del sistema, que hubiera podido alterar la composición y parámetros de flujo de pruebas posteriores.

Con respecto al cálculo del Índice de Capacidad de Acarreo, en el caso del reómetro de tubos, el procedimiento realizado correspondió, inicialmente, a convertir los valores de esfuerzo cortante de pascales a libras-fuerza por cien pies cuadrados, tanto como para lograr igualdad con respecto a los datos de reometría rotacional y poder graficar ambos reogramas en un mismo plano, como para insertar el valor obtenido en la expresión que ya se viene manejando en el hallazgo de éste índice, la cual maneja las mencionadas unidades. Luego de esto, se graficaron los puntos resultantes de datos para cada fluido a temperatura ambiente, al ser esta la usada en las pruebas del reómetro rotacional, para seguidamente generar una línea de tendencia usando Microsoft Excel que se acople a la serie de datos y extraer su ecuación, de la cual es factible extraer valores de esfuerzo cortante a cualquier valor de tasa de corte; de manera que en este caso se procedió a encontrar los esfuerzos de corte correspondientes a las velocidades del viscosímetro rotacional, lo que a su vez nos permite encontrar las variables necesarias para la resolución de la expresión del Índice de capacidad de Acarreo. Se debe mencionar que al graficar los puntos pertinentes, se decidió combinar datos de diferentes líneas para un mismo fluido y temperatura, los cuales se hacen compatibles luego del procesamiento realizado por el software de caracterización del reómetro, con el fin de generar un reograma y ecuación más completos.

En cuanto a ventajas fundamentales del método de tubos sobre el rotatorio, una de las más drásticas corresponde al hecho de poder generar una cantidad mucho mayor de puntos en los resultados de cada prueba gracias a la practicidad del control de frecuencia de la bomba, dando la capacidad de crear líneas mucho más densas y confiables si una situación en particular lo amerita. Además, otra virtud del método del reómetro de tubos es la de tomar una cantidad deseada de datos en un mismo caudal y promediarlos posteriormente, lo cual permite eliminar una cantidad considerable de incertidumbre y aumentar la precisión de las mediciones a realizar.

Finalmente, se debe resaltar la gran diferencia entre las cantidades usadas en los dos métodos de caracterización, que sitúa al reómetro de tubos en una notable desventaja respecto al rotacional, representando diferencias en costo y tiempo de preparación de muestras. En cuanto a la diferencia en costos, en el caso de que estos no sean

significativos con respecto al capital destinado por parte de una compañía de la industria en escenarios de explotación de un pozo o investigación, el impacto podrá ser menor, pero de presentarse casos de reactivos de alto valor u operaciones poco rentables, la mejor opción será hacer uso de un reómetro rotacional. Respecto al tiempo invertido en la preparación de las muestras, el método del reómetro de tubos tendrá mejor cabida en operaciones de investigación y no de perforación de un pozo, debido a la importancia crítica de la agilidad en este último tipo de escenario.

Es importante mencionar que la posible inversión por parte de compañías de la industria y consecuente evolución a largo plazo de los métodos de caracterización capilares; podría afectar en cierta medida la relación entre el método capilar y el de tubos.

Tabla 6.3:

Propiedades reológicas del lodo convencional A calculadas según datos del reómetro de tubos.

Usando ecuación potencial: $SS=5,405*(SR^{0,2812})$

SS 1021,8	37,9340654
SS 510,9	31,2161798

SS 5,109	9,8678324
SS 10,218	11,6870038

VP	6,71788558
YP	24,4982943
LSRYP	8,04866096
VP/YP	0,2742185
n	0,28103679
K	2764,61554

MW	8,5
VA 500gal/min	97,9910045
VA 900gal/min	176,383808

CCI 500	5,7567834
CCI 900	10,3622101

Tabla 6.4:

Propiedades reológicas del lodo convencional B calculadas según datos del reómetro de tubos.

Usando ecuación potencial: $SS=6,3773*(SR^{0,2293})$

SS a 1021,8 s-1	31,2380883
SS a 510,9 s-1	26,6476104

VP	4,5904779
YP	22,0571325

VP/YP	0,20811762
n	0,22916691
K	3261,35984

MW	8,5
VA 500gal/min	97,9910045
VA 900gal/min	176,383808

CCI 500	6,79115844
CCI 900	12,2240852

Es necesario mencionar que estos valores obtenidos para el CCI, incluso al cumplir aparentemente con el estándar para limpieza de pozo de estar cerca o por encima de la unidad, son significativamente mayores a los observados, incluso al punto de representar posibles problemas de bombeabilidad. Sin embargo, al haber realizado las pruebas preliminares con éxito, es posible descartar tales problemas y atribuir las tendencias desfavorables observadas a una clara imprecisión de los resultados obtenidos al usar el reómetro de tubos en comparación al valor arrojado por el reómetro rotacional, aceptado como patrón en la industria. La razón tras la diferencia los resultados de ambos métodos es la de la diferencia en la tendencia de cada reograma, que a su vez demuestra valores discrepantes de punto cedente y viscosidad plástica. Esto mismo se ha detallado con mayor profundidad en el análisis comparativo realizado, ya que en esta sección se detallan todos los puntos obtenidos en cuanto a reología se refiere a temperatura ambiente para ambas composiciones consideradas.

6.2.2. Fluidos con Sábila

Al analizar la forma de las líneas de tendencia resultantes de los datos obtenidos al realizar las pruebas del reometría capilar usando lodos con polvo de cáscara de sábila, se observó que, en comparación con las pruebas de fluidos convencionales, los resultados evidenciaron un nivel significativamente menor de consistencia a lo largo de las variaciones de temperatura, diámetro y composición; así como de coherencia con respecto a los fundamentos teóricos de modelos reológicos y comportamiento de flujo en lodos de perforación. No obstante, también se logró observar que bajo ciertas condiciones de temperatura y diámetro, el comportamiento de flujo de las muestras presentó valores y tendencias con un buen grado de consistencia y coherencia.

El menor grado de coherencia observado en estas pruebas corresponde al hecho de que en algunos de los grupos de resultados arrojados, los puntos presentaban un grado significativamente mayor de dispersión que en las pruebas con fluidos convencionales,

además de no mostrar tendencias similares a las líneas arrojadas en estas mismas, que en contraste, encajaban en los parámetros esperados en el caso de un lodo no disperso bajo en sólidos.

La presencia de mayor dispersión y presencia de datos atípicos en las muestras de datos parece tener una tendencia hacia las temperaturas y los diámetros menores. En el caso de la influencia de la temperatura en el comportamiento errático del flujo, explicada por la reducción de fuerzas cohesivas, se puede establecer que una muestra de lodo con presencia de aditivo de sábila presenta menor versatilidad térmica que un lodo convencional al poseer una viscosidad menor a la de un fluido convencional, facilitando la presencia de flujo turbulento. En cuanto a la sensibilidad a los diámetros de tubería, los resultados evidencian la tendencia de un fluido de adquirir flujo turbulento al disminuir el diámetro de la tubería, llegando en algunos casos a producir pocos o ningún dato correspondiente a régimen laminar, sin embargo, es de notar que esto solamente ocurre con fluidos con viscosidad suficientemente baja y que, de no presentarse esta condición, los diámetros menores tienden a facilitar las mediciones reológicas en valores de rata de corte mayores, contribuyendo así a la creación de reogramas más completos.

Respecto a las causas de la mayor dispersión de datos sobresale el hecho de que el tamaño y la forma de las partículas difiere de los normalmente encontrados en los componentes comerciales de un fluido de perforación, teniendo en cuenta a su vez que se trabajó en condiciones de menor eficiencia a las que se manejarían en un ambiente industrial de producción masiva del material.

Al prestar particular atención a la forma de las líneas de tendencia exhibidas en las muestras de datos, es notoria la prevalencia de una forma característica de reología dilatante, la cual representa una desventaja de la cascara de sábila como aditivo en un lodo de perforación, al exhibir un comportamiento contrario a la pseudoplasticidad deseada en un producto de este tipo y presente en modelos como la Ley de Potencia y Herschel-Bulkley, que aportan a propiedades claves en un lodo, como lo es la tixotropía responsable de la gelificación del lodo al dejarse en reposo, así como de la velocidad de perforación permitida y la elevación de los recortes de perforación efectuada por el fluido.

Tabla 6.5:

Propiedades reológicas del lodo con sábila A calculadas según datos del reómetro de tubos.

Usando ecuación polinómica de segundo grado:

$$SS=(0,00004*(SR^2))-(0,0071*1021,8) + 4,4984$$

SS a 1021,8 s-1	39,0066296
SS a 510,9 s-1	11,3117624

VP	27,6948672
	-
YP	16,3831048

	-
VP/YP	1,69045291
n	1,78485906
K	0,08468404

MW	8,5
VA 500gal/min	97,9910045
VA 900gal/min	176,383808

CCI 500	0,00017634
CCI 900	0,00031741

Tabla 6.6:

Propiedades reológicas del lodo con sábila B calculadas según datos del reómetro de tubos.

Usando ecuación potencial: $SS=0,0004*(SR^{1,662})$

SS a 1021,8 s-1	40,1445057
SS a 510,9 s-1	12,6856949

VP	27,4588108
	-
YP	14,7731159

	-
VP/YP	1,85870137
n	1,66103535
K	0,20556648

MW	8,5
VA 500gal/min	97,9910045
VA 900gal/min	176,383808

CCI 500	0,00042805
CCI 900	0,0007705

En contraste con los valores obtenidos para CCI en lodos convencionales, los resultados para lodos con sábila presentan valores demasiado bajos, lo cual normalmente representaría una pésima capacidad de limpieza de pozo. A pesar de esto, también es posible explicar los valores inusuales a la forma general de los reogramas obtenidos, que se acoplan en poco o nada al modelo de la Ley de Potencia observado en las pruebas con el viscosímetro rotacional. Con esto se puede determinar la presencia de una incompatibilidad entre la naturaleza física de las partículas de cáscara de sábila utilizadas y el montaje del reómetro de tubos como instrumento de medición reológica, lo cual se describe más extensivamente en el análisis comparativo.

6.3. ANÁLISIS COMPARATIVO

Comparando los resultados de las pruebas realizadas mediante los dos métodos para muestras de igual composición a la misma temperatura, tenemos que los reogramas sobrepuestos están representados en las figuras 6.1 a 6.4, con los puntos en rojo para el reómetro de tubos y en azul para el rotacional.

Figura 6.1:
Comparación de resultados para el lodo convencional A.

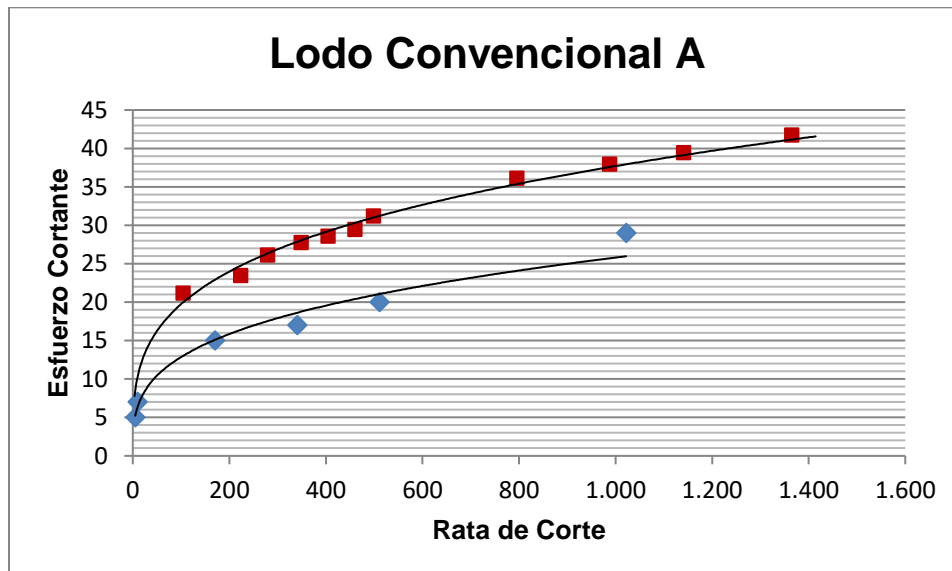


Figura 6.2:
Comparación de resultados para el lodo convencional B.

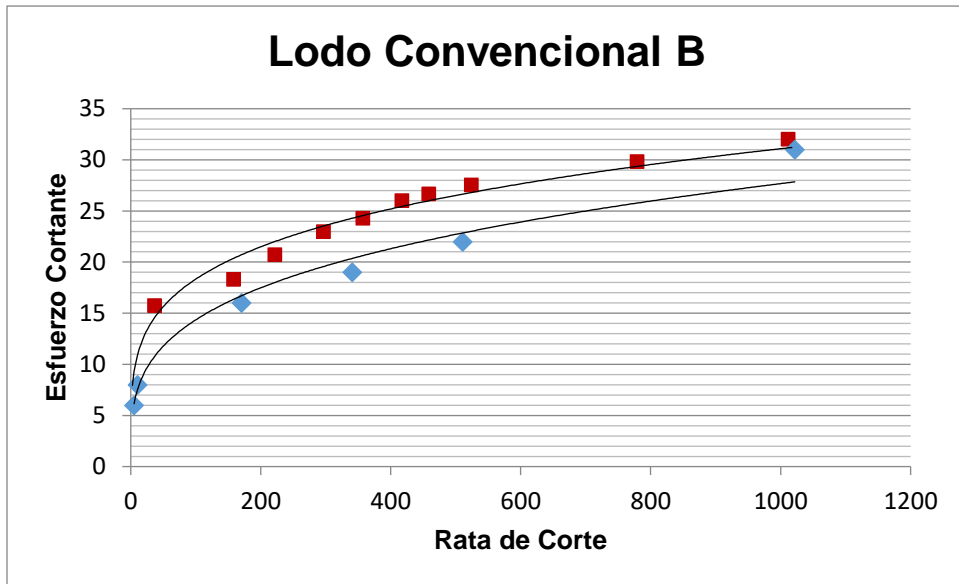


Figura 6.3:
Comparación de resultados para el lodo con sábila A.

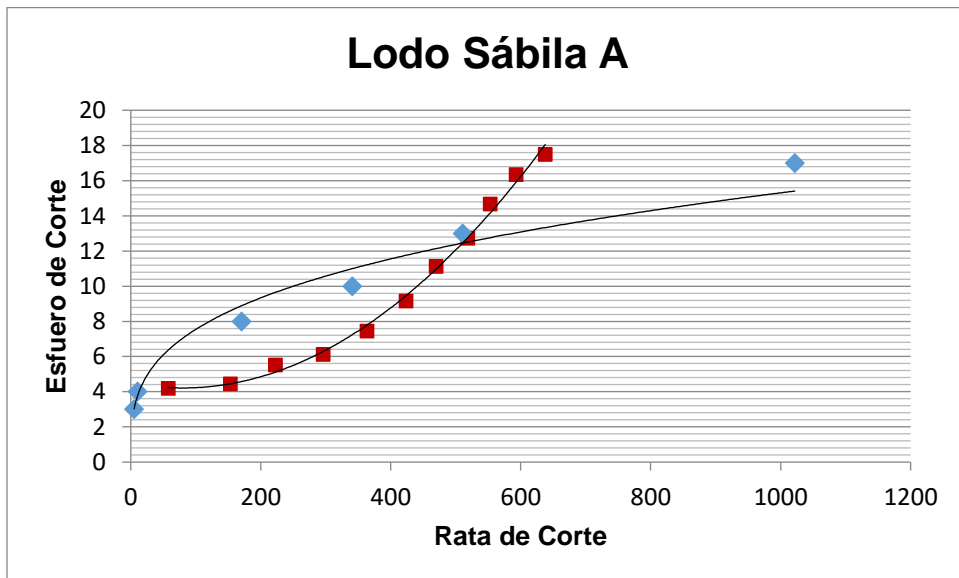
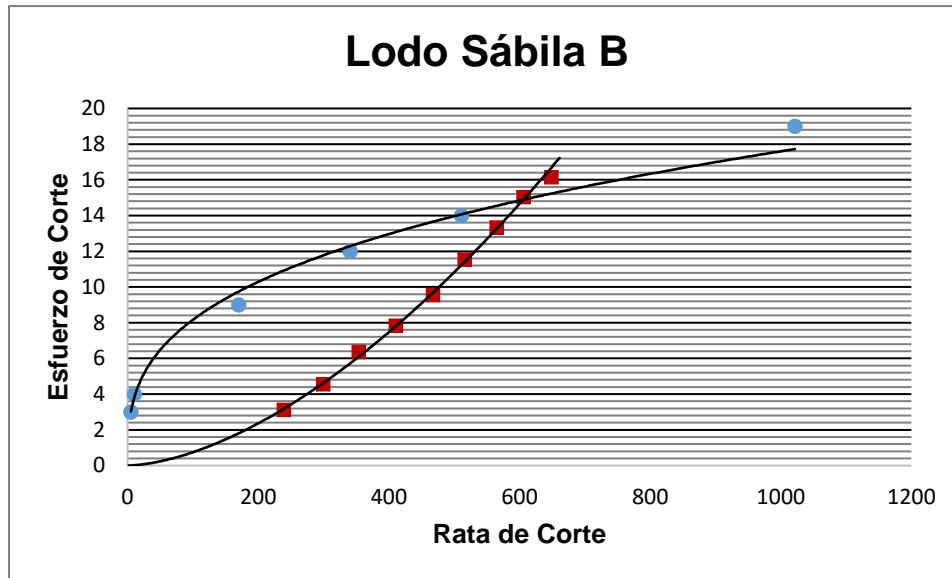


Figura 6.4:
Comparación de resultados para el lodo con sábila B.



Comparación de Reómetros Rotacional y de Tubos

Al observar la forma de las curvas generadas por los datos de los métodos convencional y capilar en las gráficas 6.1 y 6.2, se puede notar que ambas se acogen a la forma general del modelo de la Ley de Potencia, sin embargo es de notar una constante diferencia en la medida con la que los datos de esfuerzo de corte se hacen mayores, siendo más apresurada en el caso del reómetro de tubos y debiéndose, como es lógico, a una diferencia en los valores del coeficiente y el exponente de las respectivas ecuaciones potenciales. Esta discrepancia puede ser fácilmente atribuida, asumiendo que los viscosímetros rotacionales usados se encontraban debidamente calibrados y considerando el método rotatorio como patrón, a imprecisiones en la manipulación de los datos de entrada de los sensores presentes en el reómetro capilar, la cual se encuentra determinada por ecuaciones de ajuste para la presión, el caudal y la temperatura de cada línea que pueden establecerse desde la aplicación móvil vinculada al reómetro. No obstante, el diseño de cada ecuación de ajuste elude el campo de acción de este proyecto, ya que involucra un proceso de búsqueda empírica de la expresión que mejor describa el comportamiento de una variable en comparación con datos presuntamente erróneos, lo cual hace parte de la puesta en marcha del equipo.

En su estado actual, el uso del software adjunto al reómetro de tubos para evaluar una muestra de lodo, gracias a la obtención de valores de esfuerzo cortante mayores a los reales, podría conducir tanto a considerar un desempeño de buena limpieza en un fluido que es realmente débil en este aspecto, como a asumir problemas de bombeabilidad en un lodo que realmente posee un buen comportamiento reológico; lo cual conllevaría la toma errónea de decisiones de diseño de fluidos para un pozo determinado.

Con respecto a la comparación de los reogramas generados para los fluidos con sábila en ambos métodos manejados, es fácil observar una imprecisión de gran magnitud en cuanto a la generación de datos por parte del reómetro de tubos, esto es determinado al observar un alto nivel de discrepancia en cuanto a la tendencia exhibida por los datos en las pruebas de método capilar en comparación al método rotacional, que se acepta como correcto. La discrepancia en cuestión consiste en la diferencia fundamental de la forma de cada línea de tendencia resultante en los respectivos reogramas, ajustándose a la forma esperada por la ley de potencia, aunque con algo de dispersión, en el caso del método rotacional, pero mostrando un comportamiento altamente dilatante en el caso del método capilar, esto se debe a la misma fuente de error mencionada en el caso de los lodos convencionales, ya que una variación que cause el incremento del exponente en la ecuación potencial que describe el reograma desde un valor menor a la unidad hacia uno mayor a esta, generará a su vez un cambio del tipo observado en esta comparación. Lo cual nos lleva a concluir que la naturaleza física de la cáscara de sábila, que ostenta menor miscibilidad que la goma xántica al ser un producto natural sin haber sido sometido a manipulaciones de nivel industrial, afecta altamente los resultados en el reómetro de tubos, causando que el exponente en la fórmula de la ley de potencia sea alterado lo suficiente para cambiar de manera drástica la forma de los reogramas generados.

En adición a los problemas contemplados al comparar los resultados para fluidos convencionales, podemos ver que el usar el reómetro de tubos para caracterizar los efectos en la reología de la cáscara de sábila habría conllevado asumir este aditivo natural como causante de una drástica dilatación y pobre capacidad de limpieza de pozo, comportamientos que no fueron obtenidos en las pruebas con el reómetro de Fann, donde el aditivo se mostró competente en términos de ajuste al modelo de la ley de potencia y de limpieza. Esto mismo representa una consideración importante al escoger qué formulaciones caracterizar mediante este método.

Observando así que el efecto de las ecuaciones de ajuste utilizadas por el software del reómetro de tubos son las responsables de las imprecisiones causadas por el equipo en las muestras realizadas, debemos considerar que, aunque se trata de una fuente de error de magnitud considerable en el presente estado del reómetro, representa un aspecto mejorable por parte de un equipo investigativo que se encuentre dispuesto a realizar las calibraciones necesarias a la forma en la que el software procesa los datos, llevando a cabo este proceso a lo largo de una variedad de fluidos de composiciones diferentes y evitando, finalmente, discrepancias como las presentes en las curvas aquí generadas.

Comparación de Fluidos Convencional y con Cáscara de Sábila

En cuanto a la comparación del desempeño de los fluidos convencionales y los fluidos con contenido de cáscara de sábila, podemos observar, en primera instancia, que los fluidos convencionales exhibieron resultados con valores mayores de esfuerzo de corte en una magnitud de alrededor de 10 Pa, lo que representa un indicio de que el efecto de la cáscara de sábila como viscosificante en lodos del mismo peso es menor, sin embargo no por esto mismo despreciable, ya que tenemos más factores por los cuales calificar el desempeño de ambos en la limpieza de pozo, ámbito que se tiene como objetivo final de los fluidos de perforación.

Cabe resaltar que la pendiente de las curvas de los lodos con sábila es en términos generales de mayor pendiente a la de los lodos convencionales a lo largo de los valores más bajos de tasa de corte pero logra estabilizarse bastante mejor en valores sobre 500 s-1, lo que lo hace mantenerse como un buen candidato como aditivo para lodos de perforación. Esto mismo teniendo en cuenta a su vez que el índice de comportamiento del flujo, el parámetro más relevante para describir la pendiente general de los reogramas, fue menor en ambos casos de los fluidos muestreados con contenido de sábila (0.39 y 0.44) que en los convencionales (0.54 y 0.49), lo que los hace en términos prácticos aún mejores candidatos para ser usados como fluidos de perforación con respecto a este ámbito.

Lo anterior teniendo en cuenta a su vez que un comportamiento dilatante no es necesariamente una desventaja para un material que se ha explorado tan poco como la cáscara de sábila y que podría representar un potencial lugar en otras industrias, especialmente por la capacidad de presentarse tanto en forma sólida como diluida en agua. Algunas industrias que hacen uso de sustancias dilatantes son: elementos de suspensión de vehículos, estructuras amortiguadas, materiales de protección personal y elementos de seguridad vial, resaltando su utilidad en todos los casos por su capacidad de recibir impactos minimizando la deformación del medio.

Finalmente, en cuanto a valores del parámetro que mejor describe la capacidad de limpieza de los fluidos puestos a prueba en este trabajo, tenemos que los valores resultantes del CCI para cada formulación demostraron una tendencia tanto de los lodos convencionales como los de sábila de encontrarse cerca o por encima de los niveles requeridos por éste índice (CCI mayor a 1) para determinar que los fluidos ofrecen buena limpieza de pozo y, al ser no dispersos bajos en sólidos, también representan sustancias de bajo costo relativo que además son fáciles de poner en marcha por parte de las bombas utilizadas.

7. CONCLUSIONES

- Se caracterizó exitosamente el comportamiento reológico de fluidos de perforación bajos en sólidos por los métodos rotatorio y de tubos, los cuales poseían una fórmula convencional según estándares teóricos e industriales, generando los reogramas correspondientes a dos composiciones diferentes en el caso de ambos reómetros y adicionalmente a tres temperaturas y diámetros diferentes en el caso del reómetro de tubos.

Mediante la caracterización se encontró que, aunque representa un mayor costo y duración de pruebas, el reómetro de tubos representa una alternativa que, ofrece mayor aplicabilidad, al proveer resultados a distintos diámetros, y mejor precisión, al poder generar una mayor cantidad de puntos en el reograma.

Sin embargo, la falta de mejor calibración de las herramientas de procesamiento de datos y varias limitaciones físicas impiden que este montaje de reometría de tubos sea recomendable en su estado actual.

- Se caracterizó exitosamente el comportamiento reológico de un aditivo natural para fluidos de perforación base agua (aloe vera), generando los reogramas correspondientes a dos composiciones diferentes en el caso de ambos reómetros y adicionalmente a tres temperaturas y diámetros diferentes en el caso del reómetro de tubos.

Mediante la caracterización se encontró que el reómetro rotacional genera resultados comprensibles para estas formulaciones, pero la presente carencia en términos de miscibilidad del material de cáscara de sábila llega a causar alteraciones significativas a la forma de los reogramas generados por el reómetro de tubos.

Adicionalmente, se logró observar que, a pesar de la debilidad ya mencionada para este aditivo, sigue representando una potencial alternativa al uso de aditivos como la goma xántica como viscosificante en lodos de perforación, ofreciendo una reología favorable y niveles buenos de limpieza de pozo.

- Se estableció que el método del reómetro de tubos se desenvuelve mejor en situaciones donde el costo y la duración de las pruebas no sean de alta importancia, tales como situaciones de investigación en la formulación de nuevos fluidos de perforación y el diseño previo de lodos para un determinado pozo, en las cuales se busca la caracterización detallada e integral del comportamiento de flujo de un fluido de perforación, mientras el método rotacional favorece a ambientes con presupuesto y tiempo limitados, tales como las pruebas de lodos para perforaciones que ya se encuentran en marcha.

Lo anterior asumiendo un funcionamiento óptimo en cuanto a la obtención de datos reológicos por parte del reómetro de tubos, la cual aún no se ha alcanzado, situando muy por encima al viscosímetro Fann en cuanto a aplicabilidad en la actualidad.

8. RECOMENDACIONES

- De tener la intención de realizar mediciones reológicas a un fluido en el reómetro capilar, debe considerarse la presencia de una región nula en el reograma para los valores más bajos de tasa de corte correspondiente al caudal necesario para llenar las tuberías. Sin embargo, la implementación de diferentes diámetros de tubería en el equipo contribuye a tener un mayor rango de datos confiables y por consiguiente a minimizar el impacto de este punto débil del montaje.
- Al correr el reómetro rotacional con el riesgo de descalibración con el paso del tiempo, si se requiere un alto nivel de precisión en una caracterización reológica, es prudente realizar mediciones adicionales mediante el método capilar, que ofrece la opción de un alto nivel de precisión en cuanto a números de puntos considerados.
- El método de reometría capilar se vería beneficiado en gran manera si se llevara a cabo el diseño y la fabricación de montajes con diferentes materiales a los del utilizado en este trabajo, así como con componentes de mayor calibre y precisión, lo cual contribuiría al perfeccionamiento de las mediciones y el alivio de las desventajas donde sea posible.
- De contarse con la disposición de explorar el alcance del funcionamiento del reómetro de tubos, puede ser de gran utilidad estimar la veracidad de llegar a extrapolar tendencias en la reología de un fluido tras la variación de parámetro como la temperatura, la composición y el diámetro de tubería; con el fin de calcular comportamientos sin necesidad de llevar el sistema a las condiciones deseadas.
- El procesamiento de material de cascara de sábila mediante métodos de secado y pulverizado de talla industrial podría conllevar a una mejor asimilación del aditivo por parte del lodo objetivo y por lo tanto a un mejor desempeño al momento de ser caracterizado y usado en campo.
- El potencial mostrado por el material de sábila amerita la experimentación que representa la adición de este mismo a diferentes tipos de composiciones de fluidos de perforación y la consecuente caracterización de sus capacidades de flujo.

9. BIBLIOGRAFIA

- Chevron. (2009). *Drilling Fluids Handbook*. (Version 2-09).
- Richardson, J. F., Chhabra, R. P., (2008). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. (2 ed.) Butterworth-Heinemann.
- Hernández, C. A., Arenas, J. A. & Perez, C. A. (2018). *Optimización y Modernización del Reómetro de Tubos del Laboratorio de Fluidos de Perforación y Completamiento de la Universidad Surcolombiana* (tesis de pregrado). Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia.
- Esterlin, J. G., Gómez, M. A. (2011) Metodología para el Cálculo de Reología e Hidráulica para Pozos Estratigráficos Profundos usando una Herramienta Software (Compass y Wellplan).
- Reyes, M. A., (2012) Modelo Reológico de Aceites de Yacimientos Naturalmente Fracturados.
- Pascual, E., (2016). Estudio del Comportamiento Reológico de un Fluido Reo-Espesante.
- Nguyen, T., (2012). *Drilling Engineering – PE 311. Chapter 2: Drilling Fluids. Drilling Fluid Components*. En New Mexico Tech University, Socorro, New Mexico, EU.
- Craddock, H. A., (2018). *Oilfield Chemistry and its Environmental Impact* (1 ed.) Wiley.
- Boul, P. J., Abdulquddos, S. y Thaemlitz, C. J., (2017). High Performance Brine Viscosifiers for High Temperatures. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 6-9 March, Manama, Kingdom of Bahrain*.
- Zhang, X. M., Jiang, G. C., Xuan, Y., Wang, L. y Huang, X. B., (2017). The Development of a Viscosifier for Clay Free and Water Based Drilling Fluid With High Density and High Temperature Resistant. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, 22-24 August, Singapore*.
- Vargas, J. P. & Polania, L. E., (1992), *Efectos de la Sábila en las Propiedades de los Lodos de Perforación Base Agua* (tesis de pregrado). Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila, Colombia.
- DrillingFormulas.com (2016). Types of Flow and Rheology Models of Drilling Mud. Grapevine, Texas, EU: Drilling Formulas. Recuperado de: <http://www.drillingformulas.com/types-of-flow-and-rheology-models-of-drilling-mud/>.
- DrillingFormulas.com (2011). Cutting Carrying Index – Simple Tool To Determine Hole Cleaning. Grapevine, Texas, EU: Drilling Formulas. Recuperado de: <https://www.drillingformulas.com/cutting-carrying-index-simple-tool-to-determine-hole-cleaning/>

10. ANEXOS

10.1. LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: Composición de la Sábila.

Tabla 4.1: Composiciones de lodos manejados en pruebas preliminares de lodos convencionales.

Tabla 4.2: Resultados de pruebas de pH y densidad para lodos convencionales.

Tabla 4.3: Resultados de pruebas de sólidos y líquidos para lodos convencionales.

Tabla 4.4: Resultados de pruebas de filtrado para lodos convencionales.

Tabla 4.5: Composiciones de lodos manejados en pruebas preliminares de lodos con sábila.

Tabla 4.6: Resultados de pruebas de pH y densidad para lodos con sábila.

Tabla 4.7: Resultados de pruebas de sólidos y líquidos para lodos con sábila.

Tabla 4.8: Resultados de pruebas de filtrado para lodos con sábila.

Tabla 5.1: Resultados de pruebas de reología para lodos convencionales.

Tabla 5.2: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos convencionales.

Tabla 5.3: Propiedades reológicas resultantes para lodos convencionales.

Tabla 5.4: Resultados de pruebas de reología para lodos con sábila.

Tabla 5.5: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos con sábila.

Tabla 5.6: Propiedades reológicas resultantes para lodos con sábila.

Tabla 5.7. Lodo convencional A, 50°C, Línea 1

Tabla 5.8. Lodo convencional A, 50°C, Línea 2

Tabla 5.9. Lodo convencional A, 50°C, Línea 3

Tabla 5.10. Lodo convencional A, 65°C, Línea 1

Tabla 5.11. Lodo convencional A, 65°C, Línea 2

Tabla 5.12. Lodo convencional A, 65°C, Línea 3

Tabla 5.13. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.14. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.15. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 5.16. Lodo convencional B, 50°C, Línea 1

Tabla 5.17. Lodo convencional B, 50°C, Línea 2

Tabla 5.18. Lodo convencional B, 50°C, Línea 3

Tabla 5.19. Lodo convencional B, 65°C, Línea 1

Tabla 5.20. Lodo convencional B, 65°C, Línea 2

Tabla 5.21. Lodo convencional B, 65°C, Línea 3

Tabla 5.22. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.23. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.24. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 5.25. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 1

Tabla 5.26. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 2

Tabla 5.27. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 3

Tabla 5.28. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 1

Tabla 5.29. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 2

Tabla 5.30. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 3

Tabla 5.31. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.32. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.33. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 5.34. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 1

Tabla 5.35. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 2

Tabla 5.36. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 3

Tabla 5.37. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 1

Tabla 5.38. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 2

Tabla 5.39. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 3

Tabla 5.40. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 1

Tabla 5.41. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 2

Tabla 5.42. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 3

Tabla 6.1: Resultados de Índice de Capacidad de Carreo para lodos convencionales.

Tabla 6.2: Resultados de Índice de Capacidad de Carreo para lodos con sábila.

Tabla 6.3: Propiedades reológicas del lodo convencional A calculadas según datos del reómetro de tubos.

Tabla 6.4: Propiedades reológicas del lodo convencional B calculadas según datos del reómetro de tubos.

Tabla 6.5: Propiedades reológicas del lodo con sábila A calculadas según datos del reómetro de tubos.

Tabla 6.6: Propiedades reológicas del lodo con sábila B calculadas según datos del reómetro de tubos.

10.2. LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Modelo plástico de Bingham. DrillingFormulas.com. (2016).

Figura 3.2: Modelo de la Ley de Potencia. DrillingFormulas.com. (2016).

Figura 3.3: Modelo plástico de Bingham. DrillingFormulas.com. (2016).

Figura 3.4: Obtención del producto de cáscara de sábila.

Figura 5.1: Resultados de pruebas de reología para lodos convencionales.

Figura 5.2: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos convencionales.

Figura 5.3: Resultados de pruebas de reología para lodos con sábila.

Figura 5.4: Resultados de pruebas de esfuerzos de geles para lodos con sábila.

Figura 5.5. Lodo convencional A, 50°C, Línea 1

Figura 5.6. Lodo convencional A, 50°C, Línea 2

Figura 5.7. Lodo convencional A, 50°C, Línea 3

Figura 5.8. Lodo convencional A, 65°C, Línea 1

Figura 5.9. Lodo convencional A, 65°C, Línea 2

Figura 5.10. Lodo convencional A, 65°C, Línea 3

Figura 5.11. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 1

Figura 5.12. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 2

Figura 5.13. Lodo convencional A, Temperatura ambiente, Línea 3

Figura 5.14. Lodo convencional B, 50°C, Línea 1

Figura 5.15. Lodo convencional B, 50°C, Línea 2

Figura 5.16. Lodo convencional B, 50°C, Línea 3

Figura 5.17. Lodo convencional B, 65°C, Línea 1
Figura 5.18. Lodo convencional B, 65°C, Línea 2
Figura 5.19. Lodo convencional B, 65°C, Línea 3
Figura 5.20. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 1
Figura 5.21. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 2
Figura 5.22. Lodo convencional B, Temperatura ambiente, Línea 3
Figura 5.23. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 1
Figura 5.24. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 2
Figura 5.25. Lodo con sábila A, 50°C, Línea 3
Figura 5.26. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 1
Figura 5.27. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 2
Figura 5.28. Lodo con sábila A, 65°C, Línea 3
Figura 5.29. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 1
Figura 5.30. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 2
Figura 5.31. Lodo con sábila A, Temperatura ambiente, Línea 3
Figura 5.32. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 1
Figura 5.33. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 2
Figura 5.34. Lodo con sábila B, 50°C, Línea 3
Figura 5.35. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 1
Figura 5.36. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 2
Figura 5.37. Lodo con sábila B, 65°C, Línea 3
Figura 5.38. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 1
Figura 5.39. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 2
Figura 5.40. Lodo con sábila B, Temperatura ambiente, Línea 3
Figura 6.1. Comparación de resultados para el lodo convencional A.
Figura 6.2. Comparación de resultados para el lodo convencional B.
Figura 6.1. Comparación de resultados para el lodo con sábila A.
Figura 6.1. Comparación de resultados para el lodo con sábila B.

10.3. LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Ecuación para el modelo plástico de Bingham.

Ecuación 3.2. Ecuación para el modelo de la Ley de Potencia.

Ecuación 3.3. Ecuación de la viscosidad aparente en el modelo de Ley de Potencia.

Ecuación 3.4. Ecuación para el modelo de Herschel - Bulkley.

Ecuación 10.1. Ecuación para el cálculo del Índice de Capacidad de Acarreo.

Ecuación 10.2. Ecuación para el cálculo de la constante de Ley de la Potencia.

Ecuación 10.2. Ecuación para el cálculo del Índice de Comportamiento de Flujo.