



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE  
FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASADOS EN AGUA Y  
BENTONITA SÓDICA NATURAL**

**AUTOR: SÁNCHEZ ESPINOSA, CRISTIAN STALIN**

**DIRECTOR: ING. CARRIÓN MATAMOROS, LUIS MIGUEL**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2017**



## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

### **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASADOS EN AGUA Y BENTONITA SÓDICA NATURAL” realizado por el señor CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de Julio de 2017

LUIS MIGUEL CARRIÓN MATAMOROS  
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA, con cédula de identidad N° 172364847-1, declaro que este trabajo de titulación “ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASADOS EN AGUA Y BENTONITA SÓDICA NATURAL” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 31 de Julio de 2017

CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA

C.I: 172364847-1



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución, el presente trabajo de titulación “ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASADOS EN AGUA Y BENTONITA SÓDICA NATURAL” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 31 de Julio de 2017

---

CRISTIAN STALIN SÁNCHEZ ESPINOSA

C.I: 172364847-1

## DEDICATORIA

*La presente memoria va dedicada con mucho amor a mis padres Francisco Sánchez y Ana Lucía Espinosa, quienes han contribuido admirablemente en mi formación personal y profesional. Además, ustedes siempre me han motivado a seguir adelante, a pesar de los obstáculos que se han presentado durante esta inolvidable etapa universitaria. Y como siempre expresa mi padre: “Caminante no hay camino, se hace camino al andar”.*

*Sin desaprovechar esta oportunidad, quiero dedicar este trabajo, a mi compañera de vida Natalia Cerón, que ha sido mi apoyo incondicional, durante todo el desarrollo del presente proyecto. ¡Lo logramos!*

*Por último, pero no menos importante, este proyecto lo dedico también a mis hermanos Lenin y Gabriela, y a mis amistades cercanas que siempre confiaron en mí.*

*¡Los quiero!*

## **AGRADECIMIENTO**

El autor extiende un especial agradecimiento al Dr. Francisco José Rubio Hernández, quien en calidad de responsable del Grupo de Reología de la Universidad de Málaga – Escuela de Ingenierías Industriales, hizo posible el desarrollo experimental del presente trabajo.

Muchas gracias al Ing. Nicolás Páez y al Dr. Jorge Sánchez, que aportaron con valiosos conocimientos para la concepción de la presente memoria. También, se agradece al director de tesis de grado Ing. Luis Carrión y a quienes conforman el prestigioso grupo de Reología de la Universidad de Málaga, por contribuir en el delineamiento y alcance de la investigación.

Por último, pero no menos importante, agradezco al Dr. Reinaldo Delgado y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, quienes han facilitado realizar la estancia de investigación en la Universidad de Málaga-España.

Estoy muy seguro que sin el aporte de todos ustedes no hubiese sido posible realizar este proyecto.

¡Muchas gracias a todos!

## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN-----	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD-----	iii
AUTORIZACIÓN-----	iv
DEDICATORIA-----	v
AGRADECIMIENTO-----	vi
ÍNDICE DE FIGURAS-----	x
ÍNDICE DE TABLAS-----	xii
RESUMEN-----	xiii
ABSTRACT-----	xiv
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes-----	1
1.2 Justificación e importancia-----	3
1.3 Objetivos-----	4
General:-----	4
Específicos:-----	4
1.4 Alcance-----	4
1.5 Estructura del documento-----	6
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	
2.1 Introducción-----	7
2.1.1 Lodos de perforación y sus funciones-----	7
2.1.2 Formulación de lodos de perforación-----	8
2.1.3 Parámetros de control en lodos de perforación-----	11
2.1.4 Gradiente geotérmico-----	16
2.2 Generalidades-----	17
2.2.1 Concepto de fluido-----	17
2.3 Reología-----	18
2.3.1 Esfuerzo de corte “Shear stress” ( $\tau$ )-----	19
2.3.2 Velocidad de deformación “Shear rate” ( $\dot{\gamma}$ )-----	20
2.3.3 Deformación de corte “Shear strain” ( $\gamma$ )-----	20

2.3.4	Parámetros de afectación de la viscosidad-----	21
2.3.5	Fluidos Newtonianos -----	22
2.4	Fluidos no-Newtonianos -----	23
2.4.1	Viscosidad no-Newtoniana -----	23
2.5	Flujos puramente viscosos-----	25
2.5.1	Independientes del tiempo -----	25
2.5.2	Dependientes del tiempo -----	32
2.6	Flujos viscoelásticos -----	37
2.7	Reometría-----	42
2.7.1	Geometría de cilindros concéntricos-----	43
2.7.2	Geometría vane -----	44
2.7.3	Geometría de platos paralelos-----	45
2.7.4	Geometría cono y plato-----	47
2.8	Resumen -----	48

### **CAPÍTULO 3**

#### **MÉTODOS Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA**

3.1	Equipo y accesorios de medición -----	50
3.1.1	Reómetro-----	50
3.1.2	Geometría de medición-----	51
3.1.3	Solvent Trap-----	51
3.2	Medición del nivel de pH-----	52
3.3	Experimentación reológica -----	52
3.3.1	Protocolo de preparación y pre-cizalla -----	52
3.3.2	Análisis de Reversibilidad -----	54
3.3.3	Curvas de Flujo Estacionario-----	55
3.3.4	Tixotropía -----	56
3.3.5	Viscoelasticidad -----	57
3.4	Resumen -----	61

### **CAPÍTULO 4**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Materiales-----	63
4.2	Diseño de muestras -----	63
4.3	Protocolo de preparación de muestras-----	64
4.4	Protocolo pre-cizalla-----	65



4.5	Estudio Reológico-----	65
4.5.1	Análisis de reversibilidad-----	65
4.5.2	Curvas de flujo estacionario-----	66
4.5.3	Viscosidad vs. % v/v de sólidos-----	68
4.5.4	Tixotropía-----	72
4.5.5	Temperatura de perforación-----	73
4.5.5.1	Influencia del aceite mineral en la suspensión-----	73
4.5.5.2	Influencia de la temperatura en la tixotropía-----	75
4.5.6	Viscoelasticidad-----	75
4.5.6.1	Tiempo de reposo máximo-----	76
4.5.6.2	Barrido de amplitud-----	76
4.5.6.3	Barrido de frecuencias-----	77
4.5.6.4	Variación de la viscosidad (Cono de Marsh)-----	78
4.6	Delineamiento de aplicación-----	79
<b>CAPÍTULO 5</b>		
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		
5.1	Conclusiones-----	81
5.2	Recomendaciones y trabajos futuros-----	82
<b>REFERENCIAS-----</b>		<b>83</b>
<b>Anexo C-----</b>		<b>88</b>
Memoria de Cálculo-----		88
Para la muestra BTA-3:-----		88
Para la muestra BTA-10:-----		88
<b>Anexo G-----</b>		<b>89</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Limitación y alcance del presente proyecto .....	5
<b>Figura 2</b> Circulación de un lodo de perforación a través del pozo .....	8
<b>Figura 3</b> Representación esquemática de una organización multiescala de la Montmorillonita .....	9
<b>Figura 4</b> Representación de una arcilla expansora en presencia de agua.....	10
<b>Figura 5</b> Estructura tricapa de la Montmorillonita de acuerdo a Hofmann, Endell, Wilm, Marshall, Maegdefrau y Henricks.....	11
<b>Figura 6</b> Geometría estandarizada para el cono de Marsh de acuerdo a API 13B y DIN 4126.....	13
<b>Figura 7</b> Sedimentación de una suspensión de partículas de arcilla .....	14
<b>Figura 8</b> Efecto de dispersión de una suspensión de partículas de arcilla .....	15
<b>Figura 9</b> Esfuerzo cortante simple en un fluido con estado de esfuerzos anisotrópicos .....	17
<b>Figura 10</b> Geometría de platos paralelos con distribución de velocidad en el gap de corte .....	19
<b>Figura 11</b> Fluidos viscoplásticos: Curvas de flujo y de viscosidad .....	25
<b>Figura 12</b> Curvas de flujo: a) Modelo de Bingham b) Modelo de Bulkley .....	26
<b>Figura 13</b> Tipos de fluidos puramente viscosos.....	28
<b>Figura 14</b> Materiales Shear-Thinning: Curvas de flujo y de viscosidad.....	28
<b>Figura 15</b> Definición de las partes de un diagrama de curva de viscosidad .....	29
<b>Figura 16</b> Modelos matemáticos que describen distintos tramos de la curva de viscosidad.....	30
<b>Figura 17</b> Materiales Shear-Thickening: Curvas de flujo y de viscosidad .....	31
<b>Figura 18</b> Función viscosidad de fluidos dependientes del tiempo .....	32
<b>Figura 19</b> Curva de viscosidad-tiempo de corte de un material tixotrópico .....	33
<b>Figura 20</b> Comportamiento de un material tixotrópico.....	34
<b>Figura 21</b> La tixotropía como manifestación de la microestructura de suspensiones de arcillas.....	35
<b>Figura 22</b> Curva de viscosidad-tiempo de corte de un material reopéctico .....	37
<b>Figura 23</b> Historial de la velocidad de deformación.....	37

<b>Figura 24</b> Modelo mecánico de Maxwell .....	39
<b>Figura 25</b> Modelo mecánico de Kelvin-Voigt .....	40
<b>Figura 26</b> Modelo mecánico de Burgers .....	40
<b>Figura 27</b> Modelo mecánico de Jeffrey's.....	41
<b>Figura 28</b> Geometría de cilindros concéntricos .....	44
<b>Figura 29</b> Geometría vane o tipo paletas .....	45
<b>Figura 30</b> Geometría de platos paralelos.....	46
<b>Figura 31</b> Geometría de plato y cono.....	47
<b>Figura 32</b> Reómetro Gemini Advanced, laboratorio de Reología-Universidad de Málaga .....	50
<b>Figura 33</b> Sistema de la geometría vane, a) Rotor tipo paletas, b) Cilindro externo de depósito .....	51
<b>Figura 34</b> Solvent trap utilizado en la experimentación .....	51
<b>Figura 35</b> Protocolo de pre-cizalla y curvas de flujo estacionario iniciales.....	54
<b>Figura 36</b> Prueba de reversibilidad al corte .....	54
<b>Figura 37</b> Prueba saltos de escalón .....	57
<b>Figura 38</b> Saltos de escalón con diferentes tiempo de reposo.....	60
<b>Figura 39</b> Módulo elástico y viscoso como función de la frecuencia.....	61
<b>Figura 40</b> Prueba de reversibilidad .....	66
<b>Figura 41</b> Curvas de flujo estacionario, ajustadas al modelo de Bingham .....	67
<b>Figura 42</b> Curvas de viscosidad .....	69
<b>Figura 43</b> Variación de la viscosidad vs. %v/v de sólidos.....	71
<b>Figura 44</b> Comportamientos tixotrópicos de extremo (BTA-3 y BTA-10) .....	72
<b>Figura 45</b> Influencia del aceite mineral en la suspensión .....	74
<b>Figura 46</b> Influencia de la temperatura en la tixotropía (BTA-10).....	75
<b>Figura 47</b> Tiempo de reposo máximo .....	76
<b>Figura 48</b> Barrido de amplitud, régimen LVE .....	77
<b>Figura 49</b> Barrido de frecuencias .....	78
<b>Figura 50</b> Variación de la viscosidad en términos del tiempo (cono de Marsh).....	79
<b>Figura 51</b> Esquema del perfil de velocidad y esfuerzos cortantes de un material viscoplástico en régimen laminar por una tubería cilíndrica. ....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Estudios reológicos sobre bentonitas de diferentes yacimientos mineros. ....	3
<b>Tabla 2</b>	Protocolo de preparación de lodos de perforación según varios autores .....	53
<b>Tabla 3</b>	Composición química de la bentonita sódica natural, (Minpul, 2016) .....	63
<b>Tabla 4</b>	Formulaciones de lodos de perforación de acuerdo a varios autores.....	64
<b>Tabla 5</b>	Formulación del sistema: bentonita sódica y agua a temperatura ambiente	65
<b>Tabla 6</b>	Parámetros de ajuste modelo de Bingham .....	68
<b>Tabla 7</b>	Fracción volumétrica de bentonita .....	69
<b>Tabla 8</b>	Viscosidad en función de la concentración en volumen .....	70
<b>Tabla 9</b>	Cuantificación de la tixotropía, método M4 .....	73

## **RESUMEN**

Un estudio experimental de la bentonita sódica peruana en el campo de la Reología se presenta. La influencia de la temperatura en la tixotropía, ha sido analizada. Un aumento de la tixotropía se ha evidenciado en repetidas pruebas. Se ha profundizado en el estudio de la tixotropía, mediante pruebas de saltos de escalón, dejando de lado los lazos de histéresis, los cuales solo sirven para mantener un control de calidad del fluido no-Newtoniano. Se ha trabajado con varias muestras a distintas concentraciones de bentonita: 3wt%, 4wt%, 6wt%, 8wt%, 10wt%, a fin de poder observar comportamientos reológicos de extremo en las suspensiones dispersas de bentonita. El modelo de Bingham se ha ajustado a las curvas de flujo estacionario de todas las muestras, obteniendo los resultados esperados. Las curvas de viscosidad han sido útiles para obtener el comportamiento de la viscosidad en función del contenido en volumen de sólidos, y así determinar la suspensión con características promediadamente requeridas en el proceso de perforación. Finalmente, se ha estudiado la respuesta viscoelástica del fluido, en el régimen lineal.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **BENTONITA SÓDICA**
- **TEMPERATURA**
- **TIXOTROPÍA**
- **VISCOSIDAD**
- **PERFORACIÓN**
- **VISCOELASTICIDAD**

## **ABSTRACT**

An experimental study of Peruvian sodium bentonite in the field of Rheology is presented. The influence of temperature on thixotropy has been analyzed. An increase in thixotropy has been evidenced in repeated tests. The thixotropy has been studied by means of step-jumping tests, leaving out the hysteresis loop test, which is only useful to quality control of the non-Newtonian fluid. Several samples have been studied at different concentrations of bentonite: 3wt%, 4wt%, 6wt%, 8wt%, 10wt%, in order to be able to observe extreme rheological behavior in dispersed bentonite suspensions. The Bingham model has been fitted to the steady flow curves of all the samples, obtaining the expected results. Viscosity curves have been useful to obtain the viscosity behavior as a function of the volume content of solids, and thus determine the suspension with characteristics required in the drilling process. Finally, the viscoelastic response of the fluid was studied in the linear regime.

### **KEYWORDS:**

- **SODIUM BENTONITE**
- **TEMPERATURE**
- **THIXOTROPY**
- **VISCOSITY**
- **PERFORATION**
- **VISCOELASTICITY**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El primer capítulo, da a conocer la necesidad de estudiar a nivel reológico, las arcillas bentoníticas suspendidas en agua. También se realiza una breve revisión del estado del arte del material compuesto en estudio, en el campo de la perforación. Adicional a ello, se justifica el desarrollo del presente trabajo de investigación y se limita su campo de estudio a través del alcance y de los objetivos tanto generales como específicos. Algunos temas tratados aquí, son desarrollados a mayor detalle en los próximos capítulos. Por último, se presenta la estructura del documento que compone el presente trabajo.

### 1.1 Antecedentes

Con el transcurso de los años, los lodos de perforación preparados para el control de pozos petroleros, se han convertido en una profesión, ya que conlleva todo un proceso elaborarlos con los aditivos correctos para alcanzar una función específica. Los lodos de perforación, de acuerdo a la American Petroleum Institute (API), son definidos como fluidos de perforación. La sección 13B-1 de la presente norma hace referencia exclusiva a prácticas recomendadas para pruebas de campo en fluidos de perforación basados en agua. Generalmente los lodos de perforación están conformados por un fluido base, un material tixotrópico y diversos aditivos que se utilizan de acuerdo al diseño de perforación del pozo y a las condiciones naturales del terreno (Meng, Zhang, Zhou, & Chu, 2012), por ello no existe un fluido ideal para todos los procesos de perforación, pero sí un promedio de características requeridas.

Las bentonitas sódicas son ampliamente utilizadas en fluidos de perforación basados en agua, debido a que tienen excepcionales propiedades reológicas. Las principales funciones de la bentonita son otorgar viscosidad y reducir la pérdida de fluido (Kanchan et al., 2011 citado en Meng et al., 2012). Es importante destacar que el comportamiento reológico de la bentonita depende de su composición físico-química, la cual varía ampliamente dependiendo de su yacimiento de extracción.

Los lodos de perforación, se denominan fluidos complejos debido a su naturaleza y propiedades reológicas específicas (Coussot, 2004). Estos fluidos poseen propiedades tixotrópicas y son suspensiones coloidales dispersas, que pueden variar su comportamiento reológico de acuerdo a las condiciones de pH que estén sometidos y a la concentración en peso o en volumen de bentonita. A menudo, diversos aditivos como polímeros, arcillas minerales, electrolitos y tensioactivos, se agregan al sistema agua-bentonita, con el objetivo de controlar el comportamiento reológico y mantener las propiedades reológicas requeridas en el fluido (B. Abu-Jdayil & Ghannam, 2014).

Varias investigaciones sobre suspensiones de bentonitas como fluidos de perforación, se han llevado a cabo en los últimos años, sin embargo, las arcillas minerales utilizadas, han sido provenientes de yacimientos generalmente europeos, norteamericanos y asiáticos; lo que genera gran interés en caracterizar el comportamiento reológico de bentonitas de yacimientos suramericanos, facilitando determinar en estudios posteriores, los modificantes reológicos que requiere el sistema para mantener o mejorar sus propiedades reológicas, e incluso añadir nuevas propiedades al fluido mediante su funcionalización.

En varios estudios realizados, se ha contemplado el análisis de los efectos reológicos por la influencia de específicos aditivos añadidos al sistema, tales como: cenizas de carbón (Meng et al., 2012), carboximetilcelulosa sódica CMC (Dolz, Jiménez, Hernández, Delegido, & Casanovas, 2007), goma xhantan y CMC (Benchabane & Bekkour, 2006; Benyounes, Mellak, & Benchabane, 2010), cloruro de bencildimetiltetradecil amonio (Günister et al., 2006), goma de tamarindo y celulosa polianiónica (Mahto & Sharma, 2004), carbopol 980 (V. C. Kelessidis, Poulakakis, & Chatzistamou, 2011). De la misma manera, otras investigaciones se han enfocado en analizar los efectos del pH en dispersiones de bentonita sódica (Benna, Kbir-Arighuib, Magnin, & Bergaya, 1999; Vassilios C. Kelessidis, Tsamantaki, & Dalamarinis, 2007; Yildiz, Sarikaya, & Çalimli, 1999).

Como parte de la caracterización reológica, es necesario establecer el comportamiento de la viscosidad del fluido en función de la concentración volumétrica de bentonita, a fin de determinar el contenido promedio de sólidos que debe tener un fluido de perforación. El sistema agua-bentonita sódica, en base a su contenido en volumen de partículas, podrá ser una suspensión: diluida, moderadamente concentrada o altamente concentrada.



## 1.2 Justificación e importancia

Los procesos de perforación que emplean fluidos bentoníticos basados en agua, son los más concurridos porque tienen menor grado de contaminación al medio ambiente. Para mejorar el desempeño de un fluido de perforación en el proceso, las formulaciones deben ser optimizadas, por ello es necesario realizar un estudio profundizado de carácter reológico a suspensiones de bentonita de yacimientos peruanos, porque de acuerdo a su composición química y concentración en volumen, los resultados reológicos pueden variar. Varios estudios reológicos se han realizado sobre suspensiones de bentonita como fluidos de perforación, provenientes de diversos yacimientos minerales (ver tabla 1).

**Tabla 1**

Estudios reológicos sobre bentonitas de diferentes yacimientos mineros.

<b>CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE SUSPENSIONES DISPERSAS DE BENTONITA COMO FLUIDOS DE PERFORACIÓN</b>		
<b>Tipo de Bentonita</b>	<b>Origen de la Bentonita</b>	<b>Autor(es)</b>
Sódica natural	Alemania	(Paineau, Michot, Bihannic, & Baravian, 2011)
Sódica natural	Escocia	(Tehrani, 2008)
Sódica natural	Escocia	(Jachnik, 2005)
Sódica natural	Alemania	(B. Abu-Jdayil & Ghannam, 2014)
Cálcica	Francia	(Benchabane & Bekkour, 2006)
Sódica natural	Wyoming, EEUU	(Schoesser & Bochum, 2015)
Sódica natural	Texas, EEUU	(Li, Wu, Song, Qing, & Wu, 2015)
Cálcica	Korea	(Akther, Hwang, & Lee, 2008)
Sódica natural	Algeria	(Benyounes et al., 2010)
Cálcica	Kutahya, Turquía	(Yildiz et al., 1999)
Sódica natural	Colombia	(Balmaseda & Bello, 2014)
Sódica natural	España	(Dolz et al., 2007)
Sódica natural	Holanda	(V. C. Kelessidis et al., 2011)

Una vez comprendido el comportamiento del fluido estructurado, se podrá controlar su comportamiento reológico, mediante aditivos, alcanzando así propósitos específicos requeridos. Es necesario trabajar con muestras de diferente concentración, para poder evidenciar los comportamientos reológicos de extremo que se producen.

### 1.3 Objetivos

#### **General:**

- Analizar y establecer el comportamiento reológico en lodos de perforación basados en suspensiones dispersas de bentonita sódica natural, proveniente de yacimientos minerales peruanos; siendo la arcilla mineral más utilizada en aplicaciones industriales en el Ecuador.

#### **Específicos:**

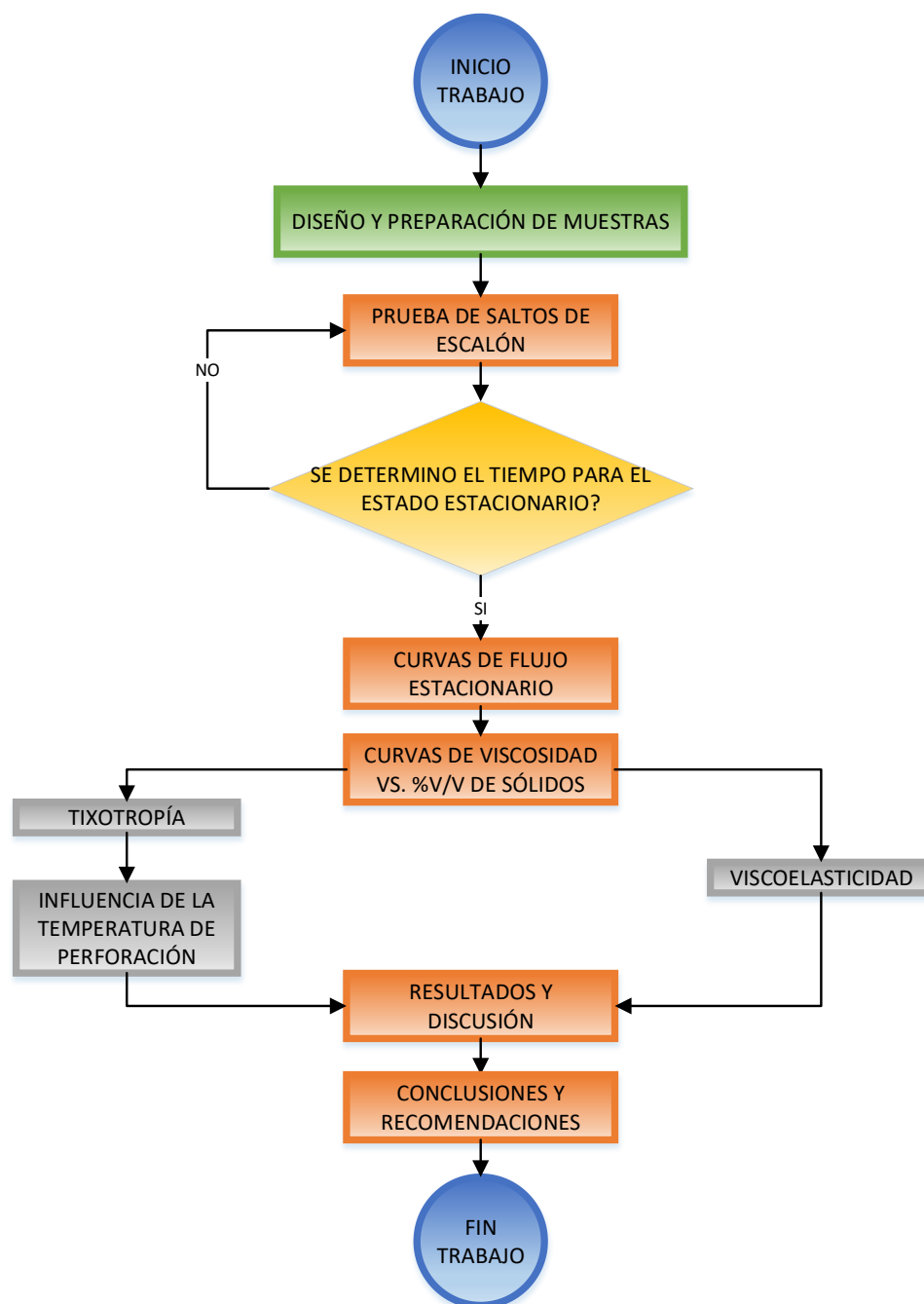
- Ajustar a un modelo matemático, el comportamiento de la viscosidad de la suspensión dispersa de bentonita sódica.
- Cuantificar la tixotropía de la suspensión, mediante saltos de escalón y sus respectivos métodos de medición.
- Determinar la influencia de la temperatura de perforación en la tixotropía de la suspensión.
- Determinar el comportamiento viscoelástico que caracteriza a la suspensión en estudio.

### 1.4 Alcance

Pese a la existencia de una variedad de estudios reológicos sobre suspensiones de bentonita, son escasos los estudios que han trabajado con bentonitas de yacimientos suramericanos, siendo necesaria la caracterización reológica de la bentonita sódica proveniente de yacimientos peruanos, la cual es la más utilizada en aplicaciones industriales en el Ecuador.

Todas las muestras de estudio, se adaptarán a protocolos tanto para la preparación como para la pre-cizalla, con el fin de obtener resultados reproducibles. El desarrollo de la etapa experimental del presente trabajo de investigación, será llevado a cabo en el laboratorio de Reología y Electrocinética de la Universidad de Málaga, gracias a un convenio de cooperación bilateral existente entre las Universidades: de las Fuerzas

Armadas ESPE (Ecuador) y de Málaga (España), facilitando así, la prestación de las instalaciones físicas y de los equipos de medición necesarios. Es fundamental limitar el alcance en la investigación, ya que el campo de caracterización reológica puede resultar muy extenso (ver figura 1).



**Figura 1** Limitación y alcance del presente proyecto

## 1.5 Estructura del documento

El documento está estructurado por cinco capítulos, detallados a continuación:

- *Primer capítulo:* Contempla los antecedentes referentes estudios reológicos suspensiones de bentonita sódica como lodos de perforación. Además, se expone la justificación de realizar el presente proyecto, en conjunto con sus respectivos objetivos y el alcance de la investigación, mediante un diagrama de procesos.
- *Segundo capítulo:* Aborda un amplio detalle sobre bentonitas, sus propiedades reológicas, composición mineralógica y características principales que la convirtieron en aditivo principal en la formulación de lodos de perforación. Además, se expone un amplio resumen sobre los tipos de fluidos no-Newtonianos, y las geometrías de medición más utilizadas en la reometría.
- *Tercer capítulo:* Detalla los protocolos establecidos para la preparación de muestras y pre-cizalla, además se explica las pruebas que son parte de la caracterización reológica a realizarse en el fluido.
- *Cuarto capítulo:* Se expone las formulaciones realizadas con sus respectivas denominaciones y se detalla los resultados obtenidos de las pruebas reológicas. Además, se muestra los parámetros de ajuste a un modelo matemático, que describe el comportamiento no-Newtoniano puramente viscoso del fluido.
- *Quinto capítulo:* Se presenta las conclusiones, recomendaciones y trabajos a futuro con la bentonita sódica en estudio y aditivos naturales agregados.

## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

El presente capítulo detalla un amplio estado del arte referente a la bentonita sódica, su formulación representativa y los parámetros de control que rigen en el proceso de perforación. Además, se presenta las generalidades sobre fluido, reología y los parámetros reológicos que lo definen, previo a la experimentación reológica del material en estudio. También se expone a detalle la clasificación de los fluidos no Newtonianos y los modelos matemáticos de ajuste más habituales. Por último, se presenta un breve resumen sobre la reometría y las geometrías de medición más utilizadas.

## **2.1 Introducción**

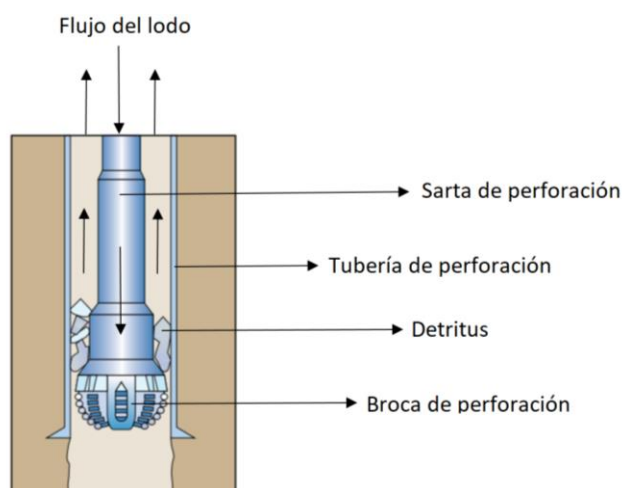
### **2.1.1 Lodos de perforación y sus funciones**

Las propiedades reológicas de los lodos de perforación tienen un rol fundamental en las operaciones de perforación. Los fluidos de perforación basados en agua están compuestos por dispersiones de bentonita, que otorgan viscosidad y reducen la pérdida del fluido. Las técnicas de perforación clásicas son de tipo rotatorias y fueron inventadas a inicios del siglo XX por Lucas, para operaciones de perforación en Texas (Coussot, 2004). Los lodos de perforación son fluidos de control que trabajan en conjunto con máquinas perforadoras de empuje, auxiliadas de una sarta de perforación que está constituida por la broca y barras de extensión.

De forma simultánea y en constante recirculación, en la etapa de perforación, los fluidos de control deben cumplir determinadas funciones (Luckham & Rossi, 1999; Mahto & Sharma, 2004), que son:

- Extraer el detritus y limpiar profundamente del pozo.
- Transportar el detritus hacia la superficie a través del espacio anular.
- Enfriar y limpiar la herramienta de perforación.
- Mantener en suspensión el detritus, cuando se detiene la circulación del fluido.

- Mantener la estabilidad del pozo y controlar posibles salidas de flujo debido a elevadas presiones de formación.



**Figura 2** Circulación de un lodo de perforación a través del pozo

Fuente: (Lan & Lee, 2013)

Los fluidos de perforación son la sangre en la industria de la perforación, debido a su gran importancia en el proceso (Meng et al., 2012). Inicialmente, el fluido es bombeado a través de la sarta de perforación hasta llegar a las boquillas de la broca (ver figura 2), desde allí transporta el detritus desde el fondo hacia la superficie, ascendiendo por el espacio anular entre la sarta de perforación y las paredes del pozo. Una vez que llega el fluido a la superficie, es separado del detritus y nuevamente recirculado (Luckham & Rossi, 1999).

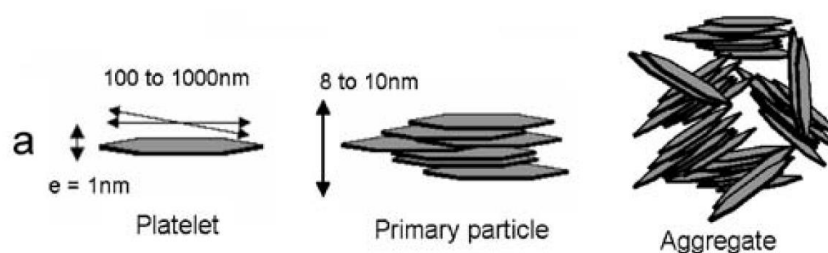
### 2.1.2 Formulación de lodos de perforación

El comportamiento reológico de lodos de perforación es comúnmente controlado por el uso de una variedad de arcillas minerales y materiales poliméricos, dependiendo del fluido base utilizado y de las demandas específicas en operaciones de perforación (Tehrani, 2008). En la formulación de lodos de perforación, se utiliza como fluidos base: agua, aceites derivados del petróleo o bases sintéticas. Generalmente los fluidos de perforación basados en aceites tienen excelentes propiedades como lubricidad y estabilidad de temperatura (Mohamed et al., 2010 citado en Meng et al., 2012), sin embargo el uso excesivo de estos fluidos produce mayores daños contaminantes al

medio ambiente, por lo tanto, es importante el desarrollo de fluidos menos contaminantes, por ello es que los fluidos basados en agua son los más aceptables, siendo además más económicos. Salvo el caso, donde el uso de fluidos basados en agua o sintéticos no sea práctico, se utiliza fluidos basados en aceites, previamente verificando su grado de toxicidad.

Las propiedades reológicas de un sistema agua y bentonita depende de varios factores, principalmente por la composición química, concentración de bentonita y los aditivos agregados. Cuando los electrolitos, polímeros o agentes tensioactivos son agregados al sistema, ellos interactúan con las partículas de bentonita y cambian las propiedades reológicas (B. Abu-Jdayil & Ghannam, 2014). Diversos modificantes reológicos son añadidos a los fluidos de perforación para reducir la filtración, evitar la sedimentación del detritus y mejorar la capacidad de arrastre hacia la superficie. Según Gunister (citado en Abu-Jdayil & Ghannam, 2014) la modificación de las superficies de las partículas de bentonita se ha hecho cada vez más importante en la optimización de las aplicaciones industriales de bentonita.

La bentonita sódica natural o “arcilla de los mil usos”, tiene propiedades que lideran un amplio campo aplicativo en distintos sectores industriales. Una de las aplicaciones más importantes a nivel industrial, se dio en 1929 en lodos de perforación, como agente de suspensión y viscosificante (Dolz et al., 2007). La alta capacidad de hinchamiento de una bentonita sódica, es la clave para la formulación de lodos de perforación (Luckham & Rossi, 1999). Cuando las bentonitas sódicas entran en contacto con agua, muestran un comportamiento coloidal, debido a que mantienen en suspensión dispersa sus partículas por un largo tiempo, evitando así el efecto de sedimentación.

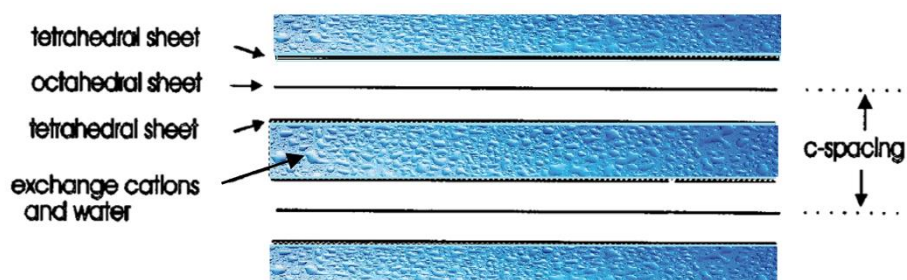


**Figura 3** Representación esquemática de una organización multiscale de la Montmorillonita

Fuente: (Benchabane & Bekkour, 2006)

Las partículas de arcilla suspendidas en agua son delgadas, en forma de discos, cargadas eléctricamente que interactúan para formar una estructura similar a un castillo de naipes, denominado en otras literaturas como **House of cards** (ver figura 3). La estructura de las bentonitas convierte al fluido de perforación en un gel fuerte en reposo y reo-fluidificante ante esfuerzos de corte aplicados (Benchabane & Bekkour, 2006).

La montmorillonita es el compuesto principal en la bentonita sódica, ya que confiere la propiedad de hinchamiento por hidratación en agua. La montmorillonita  $((Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$  es un mineral de arcilla con estructura cristalina tricapa, conformado por dos capas de sílice y una capa de alúmina (ver figura 4). “La Montmorillonita es una arcilla expansora, que tiene una gran superficie y una elevada capacidad de intercambio catiónico CEC” (Ramsey, 2016).



**Figura 4** Representación de una arcilla expansora en presencia de agua

Fuente: (Luckham & Rossi, 1999)

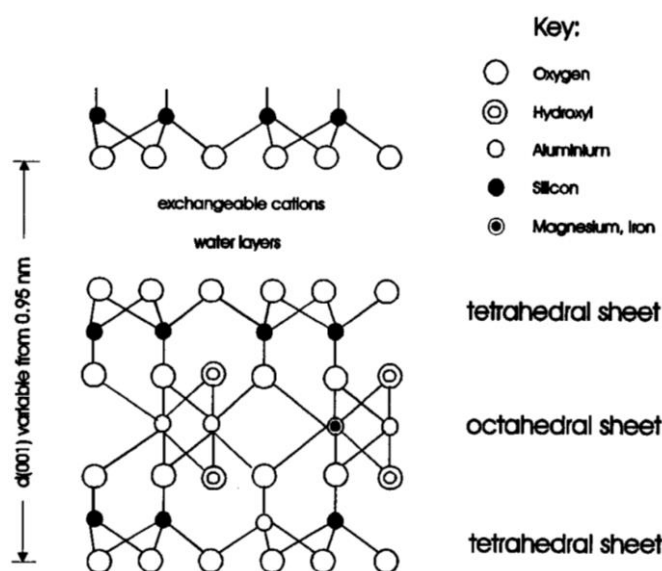
La montmorillonita se caracteriza porque en el espacio comprendido entre cada unidad estructural, se aloja la superficie interlaminar y los cationes débilmente hidratados, que son capaces de incluir cationes hidratados, agua u otros líquidos polares (Luckham & Rossi, 1999), dando así el efecto de separación de capas, conocido físicamente como la propiedad de hinchamiento.

La naturaleza química de los cationes intercambiables típicos son:  $Na^+$  o  $Ca^{+2}$ . La relación  $Na^+/Ca^{+2}$ , diferencia a las bentonitas sódicas de las cálcicas. Si la relación es mayor a 1, la bentonita es sódica, y si es menor a 1, la bentonita es cálcica (Basim Abu-Jdayil, 2011). La bentonita sódica absorbe varias veces su peso en agua y tiene la capacidad de hincharse, siendo un excelente recurso en la preparación de fluidos de perforación, mientras que la bentonita cálcica es de bajo rendimiento, ya que absorbe poca agua y no alcanza la viscosidad requerida para fluidos de perforación, aunque se



puede efectuar un proceso de activación sódica a la bentonita cálcica, pero no alcanza un rendimiento óptimo.

En el campo de la mineralogía, la montmorillonita es la variedad más en común de la esmectita. Los yacimientos de esmectita se producen por la alteración de depósitos de cenizas volcánicas. Las rocas que están conformadas en su mayor parte por montmorillonita, son llamadas bentonitas. Las esmectitas son filosilicatos representados por finas partículas ( $<2\mu\text{m}$ ) y una relación de estructura 2:1 (Luckham & Rossi, 1999). Su estructura está formada por planos de iones de oxígeno e hidroxilos intercalados entre sí. Los oxígenos forman la red de configuración tetraédrica y en su interior se posicionan cationes de  $\text{Si}^{+4}$ , mientras que los hidroxilos forman la red de configuración octaédrica, y en su interior se posicionan cationes generalmente de  $\text{Al}^{+3}$  (García-Romero, 2012). Los planos tetraédricos y octaédricos están unidos por enlaces covalentes, tienen simetría en dirección lateral, y comparten átomos en común.



**Figura 5** Estructura tricapa de la Montmorillonita de acuerdo a Hofmann, Endell, Wilm, Marshall, Maegdefrau y Henricks

Fuente: (Luckham & Rossi, 1999)

### 2.1.3 Parámetros de control en lodos de perforación

En el proceso de perforación, los sólidos se van acumulando en el fluido de control incrementando drásticamente su viscosidad, siendo necesario regularlo constantemente, agregando más agua o eliminando el detritus del fluido cuando llega

a la superficie. Las propiedades reológicas de un fluido de perforación varían continuamente conforme este viaja alrededor del pozo; los cambios se deben a variaciones de la velocidad de deformación, temperatura, presión y modificaciones químicas del fluido al entrar en contacto con formaciones en su camino a la superficie.

Cabe destacar que los esfuerzos mecánicos y térmicos, son los principales responsables del deterioro de los aditivos en un lodo de perforación, causando a su vez cambios significantes en su reología. La velocidad de deformación en un lodo de perforación puede variar desde  $10^3 \text{ s}^{-1}$  en el descenso del fluido hacia el pozo a través de las barras de extensión, hasta  $10^5 \text{ s}^{-1}$  en flujo con alta turbulencia a medida que sale de la broca de perforación, y con un rango de  $0 - 10^2 \text{ s}^{-1}$  en el espacio anular dependiendo de su excentricidad, cuando transporta el detritus a la superficie (Tehrani, 2008).

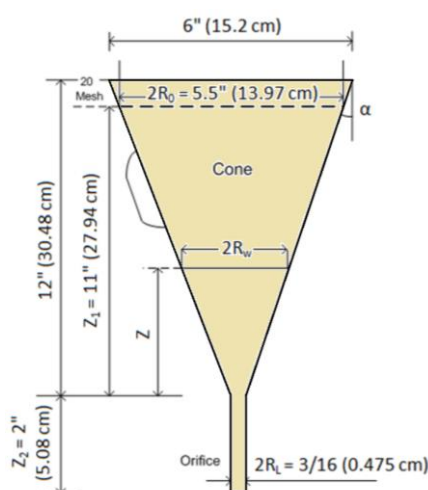
Para mantener el desempeño de un lodo de perforación y reducir el impacto de contaminación al subsuelo y mantos acuíferos, se controla determinados parámetros en base a la norma API RP 13B-1 – ISO 10414-1, referente a pruebas de campo para fluidos de perforación a base de agua. Los parámetros a controlar son:

### **2.1.3.1 Viscosidad. -**

La viscosidad se debe mantener en un nivel óptimo, ya que un exceso haría al fluido menos bombeable, ocasionando daños acelerados a la bomba y a la sarta de perforación, debido a que aumentará la capacidad de arrastre del detritus y será más complicado retirarlo del lodo en los tamices vibratorios. En cambio, si el lodo de perforación es muy diluido, disminuirá la capacidad de arrastre del detritus y provocará el atascamiento entre la broca y la tubería de perforación, a causa de la concentración del detritus en el fondo del pozo. En la actualidad, a pesar de existir una diversidad de aditivos químicos, utilizados como viscosificantes en la formulación de lodos de perforación, aún se considera a la bentonita sódica el componente más importante, por otorgar tixotropía (Bekkour, Leyama, Benchabane, & Scrivener, 2005) y la propiedad de hinchamiento por hidratación en agua al fluido, además de aumentar la capacidad de arrastre del detritus hacia la superficie, manteniéndolo en suspensión.

La medición de la viscosidad se la realiza por sondeo y un determinado número de veces según lo considere el operador, mediante la utilización del embudo o cono de

Marsh (ver figura 6), en el cual se registra el tiempo que tarda en desalojar un litro de lodo de perforación recién agitado a través del orificio del dispositivo calibrado. De acuerdo a la norma API 13B-1 (2003), para encerar el dispositivo, se toma un tiempo de referencia, necesario para desalojar un 1/4 de galón (946 ml) de agua a una determinada temperatura ambiente. Posteriormente se realiza el mismo procedimiento con una muestra de lodo de perforación de igual volumen, y si presenta una viscosidad mayor al valor referencial en 15s a 20s, se considera al fluido que tiene buenas características viscosas para el proceso (Tenso-Perforación, 2012).



**Figura 6** Geometría estandarizada para el cono de Marsh de acuerdo a API 13B y DIN 4126

Fuente: (Schoesser & Bochum, 2015)

### 2.1.3.2 Tixotropía. –

La tixotropía comprende una disminución de la viscosidad a causa de la destrucción estructural de la suspensión, por esfuerzos de corte aplicados, seguido de una construcción estructural en el tiempo, una vez retirado el esfuerzo aplicado. Para que una suspensión de arcilla muestre un comportamiento tixotrópico, debe tener un contenido de agua próximo al límite líquido, dicho de otra forma, la suspensión de arcilla debe iniciar un comportamiento plástico, aceptando deformaciones sin romperse.

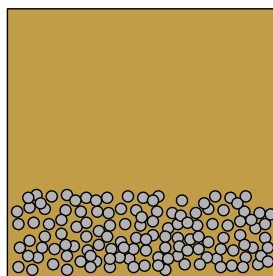
La medición de la tixotropía se lo realiza de forma indirectamente por la diferencia en peso necesario para empezar a girar las aspas de un viscosímetro rotativo o geometría vane detallado más adelante, el cual es sumergido en suspensiones recién

agitadas y en suspensiones con 10 min de reposo posterior a la agitación (Miliarium, 2004). La metodología mencionada, conlleva a formular lodos de perforación con concentración mínima del 3wt% bentonita sódica (Luckham & Rossi, 1999).

### 2.1.3.3 pH. –

La medición y control del pH en fluidos de perforación son fundamentales para un óptimo desempeño en el proceso. El equilibrio químico de un lodo de perforación, influye en la estabilidad de sus características, por tanto, una variación considerable del pH debido a la presencia de sales en pozos perforados, puede producir la sedimentación de las partículas y material perforado, lo cual es indeseable que se produzca la perforación del pozo. Para que la sedimentación se produzca en una suspensión de arcillas, básicamente depende de dos factores que son: nivel de pH y carga de los iones. La sedimentación es un caso particular de la floculación, donde se producen grandes flóculos, que descienden por gravedad al fondo de la suspensión, dándose así una separación de fases (ver figura 7).

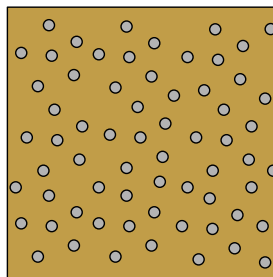
El sodio, es ion que produce dispersión de las arcillas, de esta manera se evitará que se produzca la sedimentación de la suspensión por un tiempo determinado. La floculación, adsorción y el intercambio iónico, son propiedades coloidales y se producen por la presencia de cargas eléctricas, generalmente negativas en la superficie de las arcillas (Noguera, 2009). La floculación es un proceso de formación de partículas de mayor tamaño, a través de la agregación de partículas más finas.



**Figura 7** Sedimentación de una suspensión de partículas de arcilla

En el caso de los lodos de perforación, se requiere que la suspensión mantenga el efecto de dispersión. La dispersión es un proceso de repulsión mutua entre finas partículas (ver figura 8), que evitan el efecto de sedimentación debido a la carga de los

iones y nivel de pH presente, facilitando el transporte del detritus hacia la superficie y manteniéndolo en suspensión, cuando se ha detenido el proceso de perforación.



**Figura 8** Efecto de dispersión de una suspensión de partículas de arcilla

De acuerdo al rango del pH, la naturaleza de la suspensión puede ser:

- $\text{pH} > 7 \rightarrow$  Suspensión con pH básico o alcalino
- $\text{pH} = 7 \rightarrow$  Suspensión con pH neutro
- $\text{pH} < 7 \rightarrow$  Suspensión con pH ácido

#### **2.1.3.4 Densidad. –**

La densidad permite al lodo ejercer una contrapresión en las paredes de perforación, controlando así la presión litostática e hidrostática existente en las formaciones (Miliarium, 2004). Además, influye de forma directa en la capacidad de arrastre del detritus y varía continuamente durante la perforación, debido al porcentaje de sólidos que se adhiere al lodo.

El valor de la densidad en un lodo de perforación varía desde un poco más de la unidad hasta  $1,2 \text{ gr/cm}^3$ . Si excede del 20% en sólidos, la permeabilidad de la formación geológica se verá afectada y se producirá un desgaste prematuro del equipo de perforación e inestabilidad en el proceso, además las propiedades reológicas se verían seriamente disminuidas. La densidad del fluido se puede disminuir adicionando agua o lignosulfatos como adelgazante químico, o también eliminando el exceso de arena por separación mecánica. A menudo, para aumentar la densidad se añade carbonato cálcico (BARACARB 5), con tamaño promedio de partículas ( $d_{50}$ ) de 5 micras (Halliburton, 2013).

### 2.1.3.5 Contenido de arena. –

En la formulación de lodos de perforación, el contenido de arena depende estrictamente de la calidad de los aditivos, sin embargo, el contenido de sólidos también aumenta conforme se avanza en la perforación, empeorando así sus condiciones y propiedades reológicas requeridas, además produce un desgaste acelerado de las bombas y disminuye su desempeño en el proceso.

Para reducir el contenido de arena, se utilizan mecanismos de vibración o centrífugos, como las cribas vibratorias y desarenadores centrífugos, los cuales son procedimientos eficaces y a largo plazo económicos, sin embargo, estos no eliminan en su totalidad el contenido de arena presente en el lodo, por lo tanto, es necesario medir y controlar el contenido de arena residual. Revisar la norma API RP 13B-1.

### 2.1.3.6 Capa impermeabilizante. –

En el proceso de retorno del lodo de perforación hacia la superficie, parte del lodo se va depositando en forma de partículas coloidales, formando así una capa impermeabilizante conocida como **cake**. Este acumulado de partículas, proporciona cohesión a las paredes del pozo perforado, evitando así su desmoronamiento e impermeabilizándolo. El cake debe tener una impermeabilidad óptima, ya que, si es deficiente, gran cantidad de líquidos pasarán hacia las formaciones geológicas, y si es excesiva, su espesor aumentará, reduciendo el diámetro del pozo y dificultando las operaciones de mantenimiento posterior (Benna et al., 1999). El cake también debe ser resistente para evitar su erosión, tras el roce de la sarta de perforación. Para mayor detalle sobre cómo medir la impermeabilidad y la capacidad de formación del cake, revisar API RP 13B-1.

## 2.1.4 Gradiente geotérmico

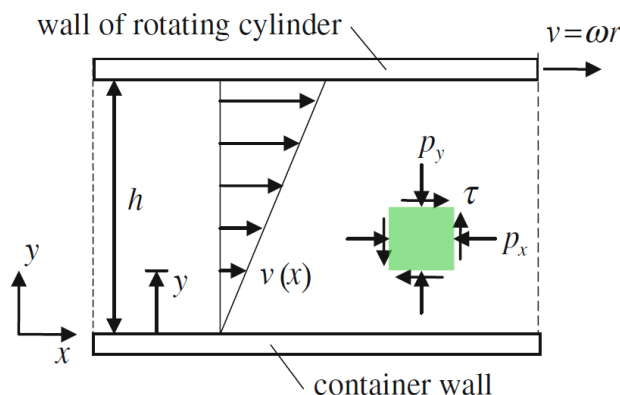
El gradiente geotérmico es una tasa de crecimiento de la temperatura por unidad de longitud de profundidad, existente en la Tierra. Aunque el gradiente geotérmico es variable, su promedio oscila entre 25 y 30°C/Km, y puede incrementar considerablemente en lugares cercanos a zonas volcánicas. Es fundamental para la ingeniería en fluidos de perforación, conocer el gradiente geotérmico del área donde

se desarrollará la perforación, para estimar la temperatura a la cual estará sometido el fluido y determinar que aditivos requiere para mantener sus propiedades reológicas. Para el cálculo de la temperatura promedio de perforación, se suma la temperatura de la superficie y el gradiente geotérmico (Ramsey, 2016).

## 2.2 Generalidades

### 2.2.1 Concepto de fluido

En el campo de la mecánica de fluidos, la materia puede presentarse en dos fases: sólida y fluida. La distinción técnica entre las dos fases radica en la reacción que presentan ante un esfuerzo tangencial aplicado, ya que un sólido es capaz de resistir el esfuerzo con una deformación estática, mientras que un fluido se deforma continuamente (Fox, 2006). Existen varios tipos de fluidos como: sustancias puras, mixtas, dispersiones y soluciones, que pueden ser categorizadas como fluidos simples o estructurados. Cuando un material fluido contiene más de una fase, como partículas sólidas dispersas en un líquido, es considerado un fluido estructurado, ya que su comportamiento reológico es generalmente dominado por las interacciones de sus constituyentes (Franck, 2004).



**Figura 9** Esfuerzo cortante simple en un fluido con estado de esfuerzos anisotrópicos

Fuente: (Irgens, 2014)

Un fluido es un modelo para un líquido o gas, aunque un material sólido podría presentar un comportamiento fluido bajo ciertas condiciones. La deformación plástica

y la fluencia, son caracterizadas por una deformación creciente a esfuerzo constante, y son un comportamiento fluido. Las dispersiones tienen una amplia variación en su desempeño, dependiendo del tamaño de su partícula, forma, concentración y atracción que mantienen con la fase líquida (Schramm, 2004).

De acuerdo a Irgens (2014) “Un fluido es un material que se deforma continuamente y está sujeto a estados de esfuerzos anisotrópicos” (ver figura 9). Cuando existe un movimiento relativo entre el fluido y la superficie que lo contiene, los puntos que conforman el fluido presentan un estado de esfuerzos anisotrópicos, produciéndose esfuerzos cortantes en la mayoría de la superficie del fluido. Cuando un fluido está en reposo solo transmite presión normal a la superficie que lo contiene, y está sujeto a un estado de esfuerzos isotrópicos, mismos que pueden ser de compresión o de tensión, mientras que los esfuerzos cortantes en las superficies son cero.

### **2.3 Reología**

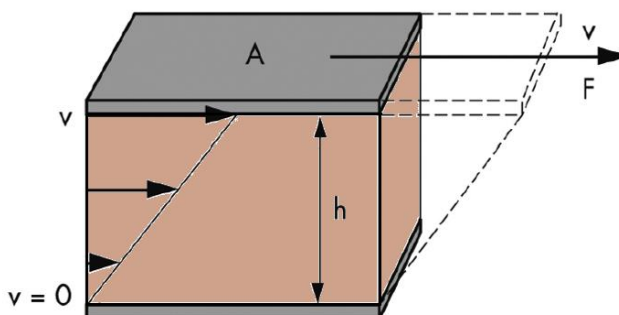
La Reología, proviene de un término griego, “Reo” que significa “flujo”, siendo así la ciencia del flujo, pero tal aseveración está sustentada por dos comportamientos de extremo, el uno en régimen líquido y el otro en régimen sólido. Por un lado, se tiene el comportamiento de flujo de líquidos idealmente viscosos bajo leyes de Newton y por otro, el comportamiento de deformación de sólidos idealmente elásticos bajo leyes de Hooke. Estos comportamientos tienen una similitud en común, y es que, a una larga deformación producida por fuerzas de corte, todo material puede fluir (Barnes, 2000). Los experimentos reológicos no solo revelan información sobre el comportamiento de flujo de líquidos, sino también el comportamiento de deformación de sólidos (Mezger, 2014). De esta manera, la reología se define, como la ciencia que se encarga del estudio del flujo y de la deformación de un material ya sea líquido, sólido o gaseoso.

En la realidad, la mayoría de materiales exhiben un comportamiento reológico con diferente grado elástico y viscoso, dando origen a la viscoelasticidad. Los sólidos ideales se deforman elásticamente, de esta manera la energía requerida para la deformación es recuperada totalmente cuando los esfuerzos son removidos, mientras que los fluidos ideales como los líquidos y gases se deforman irreversiblemente, de tal forma que la energía requerida para la deformación, es disipada en el fluido en forma de calor y no se recupera una vez retirado los esfuerzos (Schramm, 2004).



De forma generalizada, un material con tendencia a fluir tiene un grado de resistencia intrínseco que impide que se deforme y entre en movimiento. En el caso de los sólidos, estos presentan un módulo de rigidez que varía dependiendo de la naturaleza sólida del material y en el caso de los líquidos y gases, estos poseen viscosidad, propiedad que es inversamente dependiente de la temperatura.

El comportamiento reológico entre un líquido y un gas no difiere, debido a que ambos son catalogados fluidos, pero tienen diferencias técnicas concernientes a la viscosidad y efectos de las fuerzas cohesivas (Schramm, 2004). Un viscosímetro de platos paralelos (ver figura 10) ayuda a definir el esfuerzo de corte, la velocidad de deformación y la deformación de corte, detallados a continuación:



**Figura 10** Geometría de platos paralelos con distribución de velocidad en el gap de corte

Fuente: (Mezger, 2014)

### 2.3.1 Esfuerzo de corte “Shear stress” ( $\tau$ )

Cuando una fuerza ( $F$ ) se aplica tangencialmente a una zona ( $A$ ) comprendida entre la placa superior y las capas de líquido adyacente más cercanas, se produce esfuerzos cortantes en el fluido, lo que genera estados de esfuerzos anisotrópicos en cada punto que lo conforma. La velocidad de deformación que puede mantenerse para una fuerza dada, es controlada por la resistencia interna de un fluido, es decir por su viscosidad (Schramm, 2004). Matemáticamente formulado en la Ec. [1].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad [1]$$

$$\tau = \frac{\text{fuerza}}{\text{área}} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = [\text{Pa}]$$

### 2.3.2 Velocidad de deformación “Shear rate” ( $\dot{\gamma}$ )

El flujo de un material sea, líquido, gaseoso o sólido, se da como consecuencia de esfuerzos de corte aplicados, donde la velocidad máxima de flujo se da en el límite superior del fluido, mientras que la velocidad decae a cero en el límite inferior del fluido que se encuentra en contacto con la placa estacionaria. La velocidad de caída ( $V$ ) a través del espaciamiento ( $h$ ) o ( $y$ ) entre placas conocido también como el **gap**, se denomina como velocidad de deformación, a veces llamado en otras literaturas como gradiente de velocidad o tasa de deformación **strain rate** (Barnes, 2000). La velocidad de deformación comúnmente se denota por la letra “D”. Se define matemáticamente por un diferencial, ver Ec. [2].

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dy} \quad [2]$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\text{velocidad}}{\text{gap}} = \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \frac{1}{\text{s}} = [\text{s}^{-1}]$$

En la literatura científica la velocidad de deformación, se representa por ( $\dot{\gamma}$ ), ya que indica que es la derivada del tiempo de la deformación **strain**, ver Ec. [3] y es causada por los esfuerzos de corte aplicados tangencialmente al material.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\frac{dL}{dy}}{dt} = \frac{dL}{(dt)dy} = \frac{dV}{dy} \quad [3]$$

### 2.3.3 Deformación de corte “Shear strain” ( $\gamma$ )

La deformación de corte se caracteriza por el movimiento relativo de las láminas que conforman el fluido, considerando que el plato inferior del viscosímetro es estático y el plato superior se mueve, si se aplica una fuerza tangencial al plato superior. La deformación de corte es simplemente una relación de dos longitudes ( $dL$ ) y ( $dy$ ), por lo tanto, es adimensional.

$$\frac{dL}{dy} = \tan \gamma \approx \gamma \quad [4]$$

$$\gamma = \frac{\text{deformación}}{\text{gap}} = \frac{m}{m} = [\text{adimensional}]$$

### 2.3.4 Parámetros de afectación de la viscosidad

Para definir la viscosidad de un fluido en función de un parámetro, es necesario mantener los demás parámetros bien definidos y constantes durante la medición. La viscosidad, la cual es una propiedad física de un fluido puede ser influenciada por seis parámetros independientes (Schramm, 2004) presentados a continuación:

$$\eta = \eta(C, T, p, \dot{\gamma}, t, E) \quad [5]$$

#### 2.3.4.1 Concentración “C”

Denota la concentración y composición física-química del material en estudio, comprende también la micro o nanoestructura que lo caracteriza. Es uno de los principales parámetros de influencia de la viscosidad.

#### 2.3.4.2 Temperatura “T”

Relaciona la temperatura a la que se encuentra sometido el fluido. Una variedad de experimentos, han demostrado que la viscosidad es altamente influenciada por cambios de temperatura.

#### 2.3.4.3 Presión “p”

La presión comprime a un fluido lo que produce un incremento de la resistencia intermolecular. Un incremento de la presión en un fluido, tiende a incrementar su viscosidad. En el caso de los lodos de perforación un aumento de la presión a 1000 bar incrementaría su viscosidad en un 30 %.

#### **2.3.4.4 Velocidad de deformación “ $\dot{\gamma}$ ”**

Es un factor decisivo en la influencia de la viscosidad. Un incremento de la velocidad de deformación puede disminuir o aumentar la viscosidad, dependiendo de la naturaleza reológica del fluido no newtoniano.

#### **2.3.4.5 Tiempo “ $t$ ”**

El parámetro del tiempo denota el fenómeno de que la viscosidad de algunas sustancias, comúnmente dispersiones, dependan del historial de corte. El historial de corte, es el período de tiempo en que el material se sometió a corte continuo o se dejó reposar antes de ensayarse.

#### **2.3.4.6 Campo eléctrico “ $E$ ”**

El comportamiento de flujo está fuertemente influenciado por la magnitud de campos eléctricos que actúan sobre el fluido. Estas suspensiones son llamadas fluidos electro-viscosos (EVF) o fluidos electro-reológicos (ERF).

### **2.3.5 Fluidos Newtonianos**

Un fluido newtoniano puede variar su viscosidad en presencia de la variación de temperatura y presión, pero no varía con la velocidad de deformación, ni con el tiempo. Además, un fluido newtoniano no presenta propiedades elásticas ni anomalías extensionales (Schramm, 2004). Un fluido newtoniano es por supuesto una idealización, pero es una buena representación de una amplia categoría de fluidos bajo condiciones normales.

#### **2.3.5.1 Viscosidad Newtoniana**

Inicialmente la viscosidad se reconoció como una propiedad material cuantificable de un fluido, posteriormente se estableció que la viscosidad es una medida de la resistencia al flujo. Una vez definido el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, se puede proceder a la medición de la viscosidad (Barnes, 2000). Isaac

Newton fue el primer científico en expresar la ley básica de la viscometría que describe el comportamiento de flujo de un líquido ideal.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [6]$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{const.} = \frac{\text{esfuerzo de corte}}{\text{velocidad de deformación}} = \frac{\text{Pa}}{\text{s}^{-1}} = [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

De acuerdo a la Ec. [6], la viscosidad de corte de un fluido newtoniano permanece constante independientemente del esfuerzo de corte o la velocidad de deformación aplicada. La inversa al valor de la viscosidad se denomina como la fluidez del material, sin embargo, este parámetro actualmente es poco usado (Mezger, 2014).

## 2.4 Fluidos no-Newtonianos

Todos los líquidos que no exhiben un comportamiento de flujo ideal, son llamados fluidos no newtonianos. Si la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación no es lineal, el fluido exhibe una función de viscosidad no newtoniana o viscosidad aparente. En la realidad, es común que la mayoría de materiales de naturaleza viscosa tengan un comportamiento no newtoniano, lo raro es encontrar un material que tenga comportamiento newtoniano.

Las propiedades reológicas de un fluido surgen a partir de la combinación de las propiedades viscosas, elásticas y plásticas. El comportamiento reológico de un fluido no-Newtoniano, depende también de la micro o nanoestructura que posea. En el caso de las arcillas minerales como la bentonita sódica, sus partículas tienen forma de disco y forman una estructura similar a un castillo de naipes.

### 2.4.1 Viscosidad no-Newtoniana

Comúnmente la viscosidad puede variar por cambios de presión y temperatura, pero en los fluidos no-Newtonianos su variación también se atribuye a cambios en el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación.

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{o} \quad \eta = \eta(\tau) \quad [7]$$

Para fluidos no newtonianos en cortante simple, se introduce la función de viscosidad mostrada en la Ec. [7], también llamada viscosidad aparente. Generalmente, fluidos de alta viscosidad que no obedecen la ley básica de Newton corresponden a fluidos no newtonianos, aunque ciertos fluidos altamente viscosos son newtonianos. Un fluido es puramente viscoso si el esfuerzo de corte es función solo de la velocidad de deformación.

$$\tau = \tau(\dot{\gamma}) \quad [8]$$

Reescribiendo la ecuación constitutiva [8], la función de la viscosidad aparente añadida, se expresa:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad [9]$$

Un material es puramente elástico si el esfuerzo de corte es función solo de la deformación de corte ( $\gamma$ ) e independiente de la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ )

$$\tau = \tau(\gamma) \quad [10]$$

Para muchos materiales reales, tanto líquidos como sólidos, su esfuerzo de corte puede ser dependiente de la deformación de corte ( $\gamma$ ) y de la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). Estos materiales son llamados viscoelásticos, adoptando así una forma simple de la ecuación constitutiva [8] (Irgens, 2014).

$$\tau = \tau(\gamma, \dot{\gamma}) \quad [11]$$

En el estudio de los modelos de fluidos no newtonianos, generalmente se aplica relaciones funcionales más complejas, que toman en consideración el historial de deformación del material. De esta manera, los fluidos no-Newtonianos son

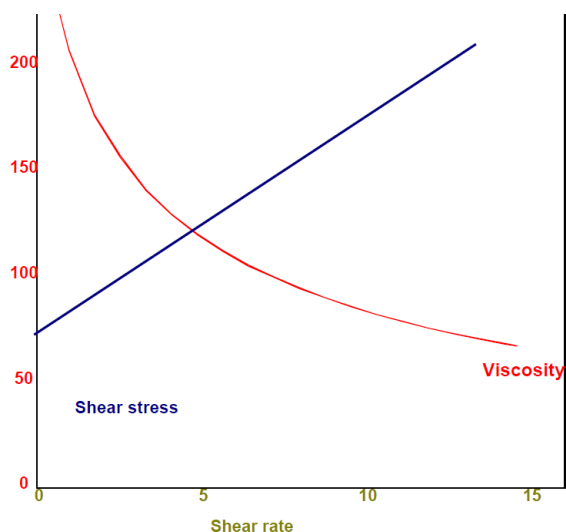
clasificados en dos principales grupos: Flujos puramente viscosos y flujos viscoelásticos.

## 2.5 Flujos puramente viscosos

### 2.5.1 Independientes del tiempo

#### 2.5.1.1 Viscoplasticos

Los modelos de flujos viscoplasticos también son llamados fluidos con esfuerzo umbral o fluidos plásticos, ya que son sólidos cuando el esfuerzo de corte es menor al esfuerzo de fluencia ( $\tau < \tau_y$ ). De esta forma, en régimen sólido su comportamiento es elástico, ya que bajo cargas aplicadas exhiben grados muy pequeños de deformación y se recuperan completamente después de remover la carga, manteniendo así su forma. Las curvas de flujo estacionario que se ajustan al modelo de Bingham son presentadas (ver figura 11).



**Figura 11** Fluidos viscoplasticos: Curvas de flujo y de viscosidad

Fuente: (Bohlin-Instruments, 1994)

Cuando el esfuerzo de corte supera al esfuerzo de fluencia ( $\tau > \tau_y$ ), la estructura del material se rompe y el material adquiere un comportamiento fluido (Irgens, 2014). En términos de la fuerza aplicada, el punto fluencia es definido de la siguiente manera:

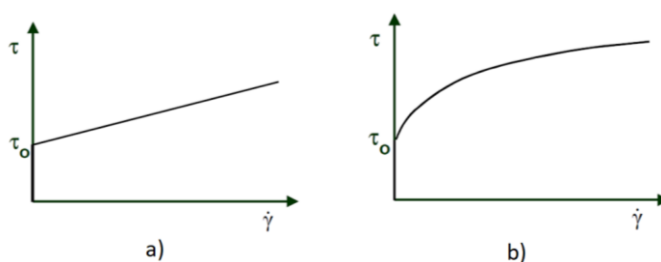
- Si  $F_{\text{externa}} < F_{\text{interna}} \rightarrow$  El material no fluye
- Si  $F_{\text{externa}} > F_{\text{interna}} \rightarrow$  El material empieza a fluir

El esfuerzo de fluencia que caracteriza a un fluido viscoplástico, aparece cuando las repulsiones de partículas son lo suficientemente fuertes para inducir macrocristalización. A medida que disminuye la fuerza iónica, la repulsión entre partículas se vuelve más alta (Larson, 1999). Comúnmente tienden a formarse coloides en estos fluidos, debido a las fuerzas repulsivas que crean estructuras tipo gel.

El modelo matemático que a menudo describe el comportamiento viscoplástico de un fluido, es el modelo de Bingham. Su nombre hace referencia al profesor Bingham quien inventó el término de la Reología. El modelo de Bingham se comporta como un fluido newtoniano cuando fluye y su ecuación constitutiva en cortante simple se expresa en la Ec. [12].

$$\tau(\dot{\gamma}) = \left[ \eta + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} \right] \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Si } \dot{\gamma} \neq 0, \quad \tau(\dot{\gamma}) \leq \tau_y \quad \text{Si } \dot{\gamma} = 0 \quad [12]$$

El valor de fluencia muestra cuan fuerte es la estructura del material. Cuando ( $\tau < \tau_y$ ), se puede considerar al material un fluido, pero asumiendo que es incompresible y si se lo considera un sólido se debe asumir que es un cuerpo rígido sin deformaciones (Irgens, 2014). La figura 12 muestra las curvas de flujo para materiales viscoplásticos. En varias literaturas científicas al esfuerzo de fluencia se lo conoce como valor de fluencia o punto de fluencia (Mezger, 2014). Cuando un material viscoplástico abandona la fluidez por retiro del esfuerzo de corte aplicado, su viscosidad aparente tiende al infinito, mostrándose, así como un sólido (Schramm, 2004).



**Figura 12** Curvas de flujo: a) Modelo de Bingham b) Modelo de Bulkley

Fuente: (RheoTec, n.d.)



Generalmente los fluidos viscoplásticos están constituidos por una variedad de elementos en suspensión en un medio acuoso, como: espumas, emulsiones altamente concentradas y suspensiones coloidales. Ejemplos de fluidos que exhiben esfuerzos de fluencia son: fluidos de perforación, arena en agua, materiales granulados, pasta de dientes, chocolate, algunas pinturas y concreto fresco (Irgens, 2014).

### 2.5.1.1.1 Modelos Viscoplásticos

Actualmente, existen varios modelos matemáticos que se ajustan al comportamiento de un fluido viscoplástico, además las constantes que constituyen a cada modelo, tienen un significado e interpretación física.

- **Modelo de Bingham:**

$$\tau = \tau_y + \eta_P \cdot \dot{\gamma} \quad [13]$$

- **Modelo de Casson:**

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_C} + \sqrt{\eta_C \cdot \dot{\gamma}} \quad [14]$$

- **Modelo de Herschel & Bulkley:**

$$\tau = \tau_H + m \cdot \dot{\gamma}^p \quad [15]$$

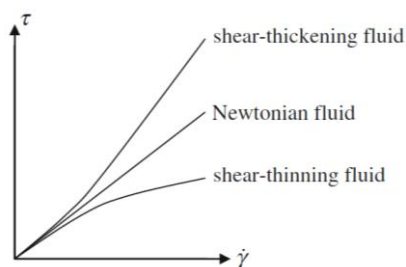
- **Modelo de Bingham modificado:**

$$\tau = \tau_y + \eta_P \cdot \dot{\gamma} + C \cdot \dot{\gamma}^2 \quad [16]$$

Donde los parámetros  $\tau_y$ ,  $\tau_C$ ,  $\tau_H$  son los valores de fluencia;  $\eta_B$ ,  $\eta_C$ ,  $m$  y  $\eta_P$  son las viscosidades plásticas respectivamente. Para el modelo del Bingham modificado,  $C$  es una constante de segundo orden que determina si el fluido es shear thinning o shear thickening, comportamientos expuestos más adelante. En cambio si  $p < 1$  el fluido es shear thinning y si,  $p > 1$  el fluido es shear thickening.

### 2.5.1.2 Shear thinning

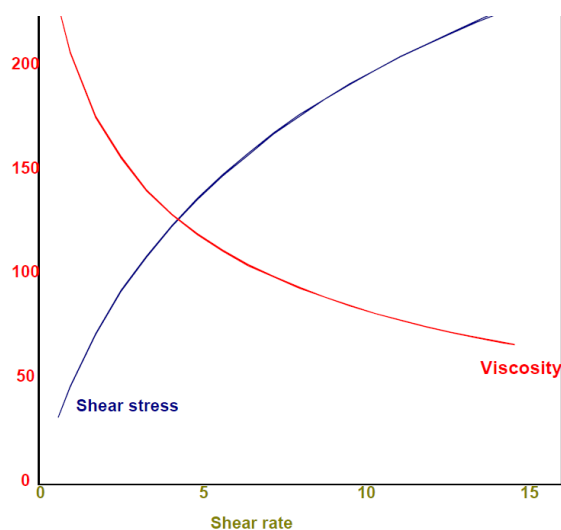
Los fluidos puramente viscosos que no tienen esfuerzo de fluencia son (ver figura 13)



**Figura 13** Tipos de fluidos puramente viscosos

Fuente: (Irgens, 2014)

Un fluido puramente viscoso es reo-fluidicante, **shear thinning** o tiene adelgazamiento por cizalla, si la viscosidad aparente expresada por la función viscosidad disminuye por incremento de la velocidad de deformación. Es necesario, saber diferenciar un fluido shear thinning de un fluido tixotrópico, ya que un fluido tixotrópico, disminuye su viscosidad con el tiempo de cizalla (Barnes, 2000) y es detallado más adelante. La mayoría de fluidos no newtonianos son shear thinning, como los fluidos biológicos, soluciones de polímeros, mayonesa y fluidos de perforación. Las curvas de flujo estacionario que caracterizan a los fluidos shear thinning son (ver figura 14).



**Figura 14** Materiales Shear-Thinning: Curvas de flujo y de viscosidad

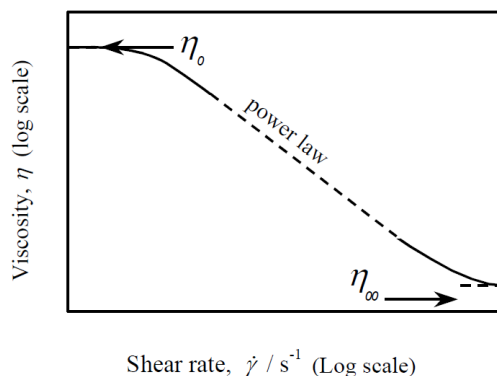
Fuente: (Bohlin-Instruments, 1994)

### 2.5.1.2.1 Modelos shear thinning

El modelo matemático, más común para el ajuste de la función de viscosidad está dado por la Ley de Potencia Ec. [17]. La ley de potencia representa a los fluidos shear thinning cuando  $n < 1$  y a los fluidos shear thickening cuando  $n > 1$ . El parámetro de consistencia ( $K_2$ ) y el índice de la ley de potencia ( $n$ ) están en función de la temperatura.

$$\eta(\dot{\gamma}) = K_2 \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad [17]$$

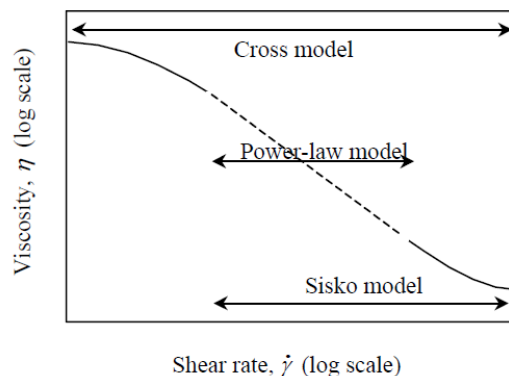
Para curvas de viscosidad de fluidos shear thinning, a velocidades de deformación o esfuerzos de corte suficientemente bajos, aparece el primer plato newtoniano ( $\eta_0$ ). Posteriormente la curva de viscosidad comienza a disminuir, entrando normalmente en línea recta en trazado logarítmico y es descrita por la Ley de potencia. Una vez finalizado el decremento lineal, empieza a aparecer el segundo plato newtoniano ( $\eta_\infty$ ) correspondiente a velocidades de deformación suficientemente altas. De esta forma, se tiene dos límites de viscosidad newtoniana ( $\eta_0$ ) y ( $\eta_\infty$ ) separadas por una Ley de potencia (ver figura 15). La existencia de los platos newtonianos depende de la naturaleza reológica del material en estudio.



**Figura 15** Definición de las partes de un diagrama de curva de viscosidad

Fuente: (Barnes, 2000)

Es importante conocer que, para intervalos de velocidades de deformación muy elevadas, no se puede apreciar el comportamiento a bajas velocidades de deformación y viceversa, incluso hay situaciones donde solo se ve la región de la ley de potencia, más no el comportamiento a velocidades de deformación elevadas e inferiores (Barnes, 1989).



**Figura 16** Modelos matemáticos que describen distintos tramos de la curva de viscosidad

Fuente: (Barnes, 2000)

- **Modelo de Cross (1965):**

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K \cdot \dot{\gamma})^m} \quad [18]$$

- **Modelo de Sisko (1958):**

$$\eta = \eta_{\infty} + K_2 \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad \eta \ll \eta_0 \quad [19]$$

- **Modelo de Carreau (1972):**

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2)^{m_1/2}} \quad K\dot{\gamma} \sim 1 \quad [20]$$

- **Modelo de Bingham:**

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0}{(K \cdot \dot{\gamma})^m} \quad \eta_0 \gg \eta_{\infty} \wedge K\dot{\gamma} \gg 1 \quad [21]$$

Los parámetros  $K, K_1, K_2, n, m$  y  $m_1$  son constantes que caracterizan a cada modelo matemático y suelen ser dependientes de la temperatura. De acuerdo a la ley de potencia y sucesivas experimentaciones con fluidos no newtonianos, se define a los platos newtonianos ( $\eta_0$ ) y ( $\eta_{\infty}$ ) de la siguiente manera:

- **Plato newtoniano a bajas tasas de corte ( $\eta_0$ )**

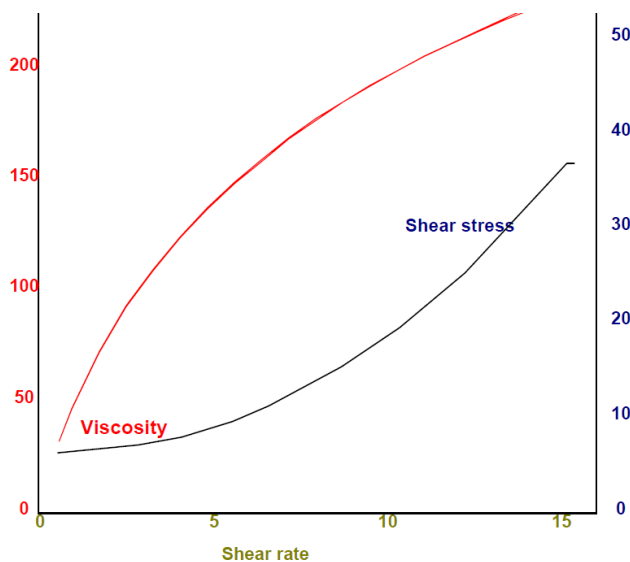
$$\eta_0 \equiv \eta(0) = \text{valor finito} > 0 \quad n < 1 \quad \vee \quad n < 1 \quad [22]$$

- **Plato newtoniano a elevadas tasas de corte ( $\eta_\infty$ )**

$$\eta_\infty \equiv \eta(\infty) = \text{valor finito} > 0 \quad n < 1 \quad \vee \quad n < 1 \quad [23]$$

### 2.5.1.3 Shear thickening

Un fluido puramente viscoso es reo-espesante, **shear thickening** o tiene espesamiento por cizalla, si la viscosidad aparente expresada por la función viscosidad incrementa por aumento de la velocidad de deformación. De forma análoga a los fluidos shear thinning, es necesario saber diferenciar un fluido shear thickening de un fluido anti-tixotrópico, ya que un fluido anti-tixotrópico, aumenta su viscosidad con el tiempo de cizalla (Irgens, 2014). En la realidad son muy escasos los fluidos shear thickening. En la figura 17 se muestra las curvas de flujo y de viscosidad que caracterizan a un fluido thickening.



**Figura 17** Materiales Shear-Thickening: Curvas de flujo y de viscosidad

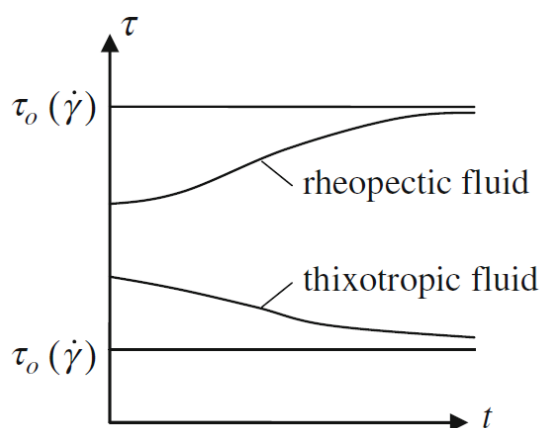
Fuente: (Bohlin-Instruments, 1994)

Por concepto, los comportamientos shear thinning y shear thickening son muy diferentes, sin embargo, un fluido puede tener los dos comportamientos conforme

aumenta la velocidad de deformación (Irgens, 2014). El efecto shear thickening puede ocurrir a elevadas velocidades de deformación, arriba del rango donde se produce el efecto shear thinning (Larson, 1999).

## 2.5.2 Dependientes del tiempo

Los fluidos dependientes del tiempo son tixotrópicos y anti-tixotrópicos (ver figura 18). Estos fluidos son complejos de modelar, ya que, en su comportamiento a velocidades de deformación y temperatura constante, el esfuerzo de corte puede incrementar o disminuir repetidamente con respecto al tiempo hacia valores asintóticos (Irgens, 2014).

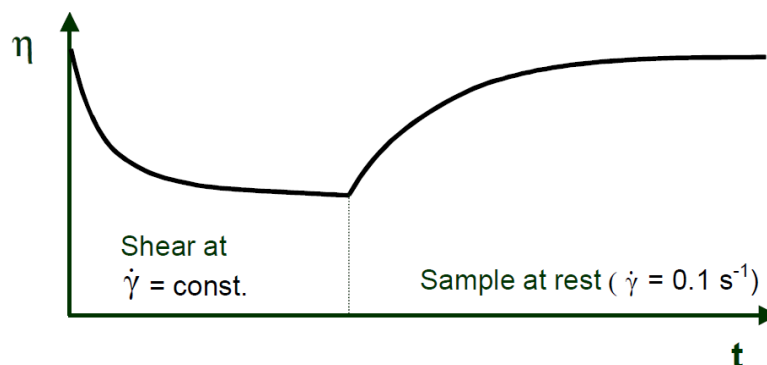


**Figura 18** Función viscosidad de fluidos dependientes del tiempo

Fuente: (Irgens, 2014)

### 2.5.2.1 Fluidos Tixotrópicos

La tixotropía es una propiedad que exhiben los fluidos no newtonianos. Los fluidos tixotrópicos disminuyen su viscosidad con el tiempo de corte a una velocidad de deformación constante. La viscosidad inicial se recupera con el reposo del fluido después de que la velocidad de deformación haya retornado a cero o al valor referencial (ver figura 19). El proceso que desarrolla un fluido tixotrópico es completamente reversible.



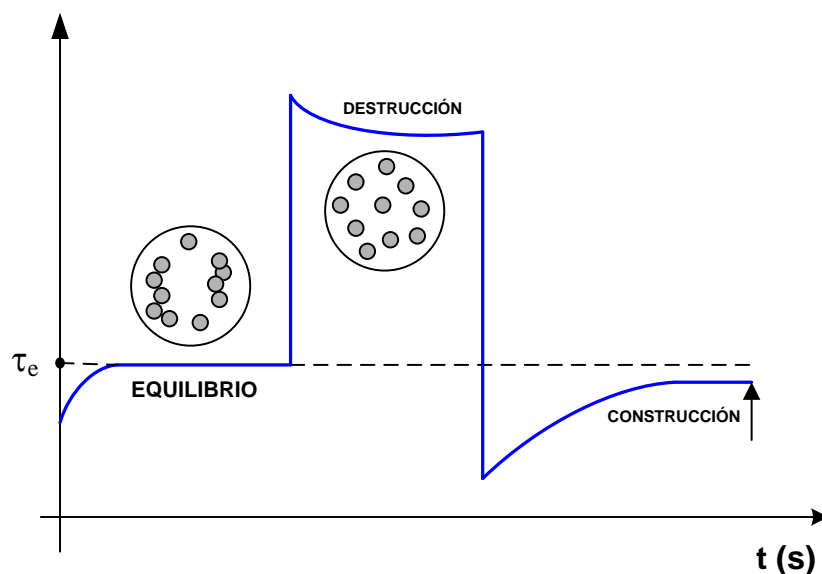
**Figura 19** Curva de viscosidad-tiempo de corte de un material tixotrópico

Fuente: (RheoTec, n.d.)

Estos materiales a menudo también tienen un punto de fluencia (Rheotec), convirtiéndose en fluidos tixotrópicos viscoplásticos. La tixotropía se da en primer lugar, debido al tiempo finito tomado para que se produzca cualquier cambio en la microestructura por corte inducido (Barnes, 2000). El término de tixotropía describe un fenómeno reológico de gran importancia industrial. En ciertas ocasiones se ve como una propiedad problemática que se puede prescindir, pero en otras, requiere ser analizada como en el caso de los fluidos perforación, ya que es de vital importancia en su desempeño.

### Equilibrio dinámico

Cuando el material tixotrópico experimenta el corte, la microestructura adquiere un equilibrio dinámico debido a la competencia simultánea entre el proceso de destrucción estructural por esfuerzos de corte inducidos y el proceso de construcción de la red estructural debido al flujo y la colisión de partículas inducidas por el movimiento Browniano, proceso que puede tardar minutos (Barnes, 2000), donde el esfuerzo de corte alcanza un valor de estado estacionario (ver figura 20), que es comparado con el esfuerzo de corte alcanzado en la construcción estructural, para la cuantificación de la tixotropía. El movimiento Browniano describe el movimiento continuo, aleatorio, incesante y en todas las direcciones de partículas muy finas que están inmersas en un fluido.



**Figura 20** Comportamiento de un material tixotrópico

### **Destrucción de la Estructura**

Cuando la estructura se destruye, la viscosidad disminuye con el tiempo de corte hasta que alcanza asintóticamente el nivel más bajo para una velocidad de deformación constante dada (Schramm, 2004). La destrucción estructural se puede dar por la colisión de las partículas y flóculos como también por la resistencia viscosa que presenta el medio líquido cuando el material es cizallado.

$$\frac{d\eta(\dot{\gamma})}{dt} \neq 0 \quad [24]$$

A pequeña escala, el movimiento Browniano de partículas primarias puede componer flóculos como también puede provocar su destrucción. Esto quiere decir que bajo ciertas condiciones el movimiento Browniano y el corte inducido pueden provocar la destrucción de la estructura (Tehrani, 2008).

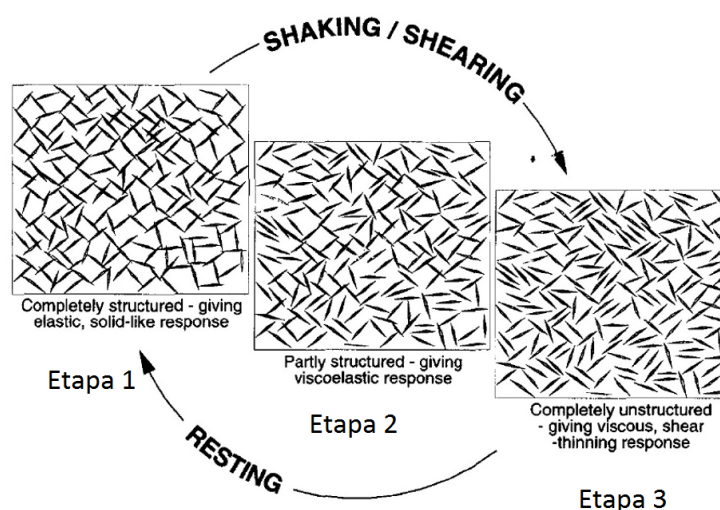
### **Construcción de la Estructura**

Cuando el flujo del material cesa, el movimiento Browniano siendo la única fuerza que reside, es capaz de mover lentamente los elementos de la microestructura hacia



posiciones más favorables y así construir la estructura. Este proceso puede tomar varias horas para completarse (Barnes, 1989). El comportamiento tixotrópico en un fluido, se da cuando los efectos de construcción debidos al movimiento Browniano dominan sobre los efectos de destrucción de la estructura (Tehrani, 2008).

Todo el proceso característico de un fluido tixotrópico es completamente reversible. Un fluido muestra mayor grado de tixotropía, a mayor tiempo de construcción de la estructura presente (fluido en reposo) (Barnes, 2000; Galindo-Rosales & Rubio-Hernández, 2006).



**Figura 21** La tixotropía como manifestación de la microestructura de suspensiones de arcillas

Fuente: (Ancey, 2005)

De acuerdo a la figura 21, un material tixotrópico a nivel de su microestructura se comporta de la siguiente manera (Ancey, 2005):

- **Etapa 1.-** En reposo responde como un material sólido, por ser completamente estructurado, de esta forma maximiza su resistencia al corte y adquiere elasticidad. Dicho de otra forma, el proceso elástico envejece con el tiempo. Pese a existir un número de contacto grande entre partículas, no hay una distribución homogénea en el espacio contenido.
- **Etapa 2.-** Conforme se aplica el corte al material, este responde como material viscoelástico. Los procesos tanto elástico como viscoso se producen de forma combinada. La estructura es parcialmente descompuesta, el número de contacto

entre partículas disminuye, ya que las partículas comienzan a alinearse en la dirección del flujo, pero siguen manteniendo asimetría en la distribución espacial.

- **Etapa 3.-** Conforme aumenta el tiempo de corte en el material, este responde como shear thinning, la estructura es completamente descompuesta, disminuyendo su viscosidad hasta valores asintóticos y, donde se alcanza el estado estacionario.

La mayoría de materiales que son shear-thinning también son tixotrópicos porque toman un tiempo finito para provocar el reordenamiento de los elementos en la microestructura que son resultado de una dilución del material por corte. Ejemplos típicos incluyen suspensiones de suelos y arcillas, cremas, lodos de perforación, pinturas, suspensiones de harina, jaleas, etc. Según Ancy (2005) existen tres características que son requisitos para observar un comportamiento tixotrópico en un material y son:

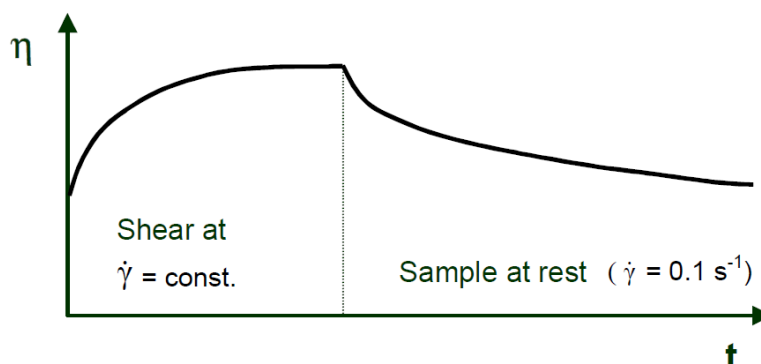
- C1.** Un material compuesto de estructuras que se rompa progresivamente al corte.
- C2.** Un proceso reversible implica que la estructuración perdida del material después del inicio del flujo se recupera cuando el material entra en reposo un tiempo suficientemente largo. De esta forma el corte inducido en el material provoca la salida del estado inicial o reposo, mientras que el reposo implica la construcción de la estructura.
- C3.** La caracterización en la escala de tiempo tanto para la fase de destrucción y para la construcción de la estructura, no son iguales. Los intervalos de tiempo característicos en la destrucción estructural van desde mili-segundos hasta minutos y en la construcción estructural van desde horas hasta varios días.

### **2.5.2.2 Fluidos Anti-Tixotrópicos (Tixotropía negativa)**

Estos fluidos son caracterizados por un aumento de la viscosidad con el tiempo de corte. Muestran un comportamiento contrario a los fluidos tixotrópicos, por tanto, son denominados anti-tixotrópicos. Cuando estos fluidos se dejan en reposo, recuperan su viscosidad inicial, es decir su viscosidad de menor valor.

El proceso de aumento y de disminución de la viscosidad es repetible y reversible. (ver figura 22). Las curvas de histéresis descritas por los fluidos anti-tixotrópicos,

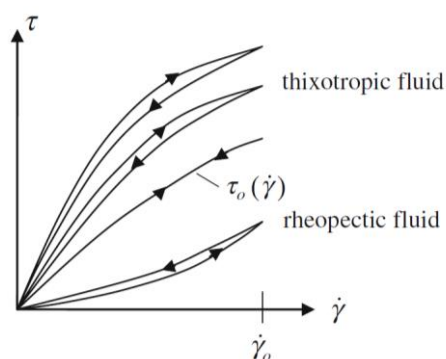
cambian de sentido horario a anti-horario, siendo totalmente lo contrario a las curvas de histéresis descritas por los fluidos tixotrópicos (Schramm, 2004).



**Figura 22** Curva de viscosidad-tiempo de corte de un material reopéctico

Fuente: (RheoTec, n.d.)

En la realidad, la anti-tixotropía es un comportamiento no muy habitual y pocos fluidos lo exhiben. De acuerdo a Schramm (2004), un fluido anti-tixotrópico puede tener las curvas de histéresis idénticas para varios ciclos, pero para un fluido tixotrópico las curvas de histéresis pueden ser distintas para cada ciclo (ver figura 23).



**Figura 23** Historial de la velocidad de deformación

Fuente: (Irgens, 2014)

## 2.6 Flujos viscoelásticos

La viscoelasticidad implica que un material bajo ciertas condiciones tiene propiedades viscosas y elásticas simultáneamente, es decir una parte del esfuerzo de corte se debe a la deformación de corte ( $\gamma$ ), y otra a la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). La porción elástica es descrita por el modelo del resorte de Hooke mientras que la

porción viscosa es descrita por el modelo de amortiguamiento de Newton. En suspensiones concentradas, la viscoelasticidad es un procedimiento alternativo para investigar la estabilidad y la sedimentación a través de mediciones viscoelásticas (Luckham & Rossi, 1999).

El fenómeno de viscoelasticidad se puede producir en líquidos y en sólidos. Los materiales viscoelásticos presentan una respuesta en retraso y dependiente del tiempo, cuando se aplica un esfuerzo o deformación o cuando se lo retira (Mezger, 2014), por esta razón, los modelos viscoelásticos tienen mayor aproximación al comportamiento real de materiales sólidos y líquidos.

La teoría de la viscoelasticidad se fundamenta en dos regiones: lineal y no lineal. La viscoelasticidad lineal significa que hay una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación del material cercana al equilibrio dinámico cuando la deformación es pequeña. En la teoría de viscoelasticidad lineal, las ecuaciones diferenciales son lineales, los coeficientes de los diferenciales de tiempo son constantes como la viscosidad y el módulo de elasticidad. No es ilógico asumir que todos los materiales son viscoelásticos, ya que su respuesta particular ante determinados experimentos depende de la escala de tiempo del experimento en relación al tiempo natural del material. Si el experimento es relativamente lento, el material aparenta ser viscoso. Si es relativamente rápido, el material aparenta ser elástico y a escalas de tiempo intermedias la respuesta viscoelástica del material es observada (Barnes, 1989).

La teoría de viscoelasticidad está formulada matemáticamente por ecuaciones diferenciales, de las cuales se desprenden varios modelos viscoelásticos presentados a continuación (donde  $n=m$  o  $n=m-1$ ). Debido a que las derivadas de tiempo son derivadas parciales, la teoría de viscoelasticidad lineal es aplicable a pequeños cambios en las variables.

$$\left(1 + A_1 \frac{\partial}{\partial t} + A_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + A_n \frac{\partial^n}{\partial t^n}\right) \sigma = \left(B_0 + B_1 \frac{\partial}{\partial t} + B_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots + B_m \frac{\partial^m}{\partial t^m}\right) \gamma \quad [25]$$

### 2.6.1.1 Modelos viscoelásticos

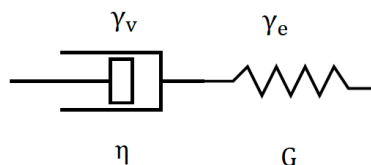
Los modelos de Maxwell y de Kelvin son modelos muy sencillos que en la mayoría de casos no describen con precisión el comportamiento real viscoelástico de sólidos o

líquidos, por tanto, para obtener mejores resultados se proponen modelos más complejos como el modelo de Burgers y el modelo de Jeffrey. Si en caso se requiere mejorar aún más la calidad del ajuste de los datos experimentales, se utilizan modelos generalizados que cuentan obviamente con mayor número de parámetros y tiempos de relajación diferentes para cada elemento (Barnes, 1989). En base a la Ec. [25], se desprenden varios modelos viscoelásticos para líquidos y sólidos.

### 2.6.1.1.1 Modelo de Maxwell

Cuando  $A_1 = \lambda_M$  y  $B_1 = \eta$  (los demás parámetros son cero, ver Ec. [25]).

$$\sigma + \lambda_M \cdot \dot{\sigma} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [26]$$



**Figura 24** Modelo mecánico de Maxwell

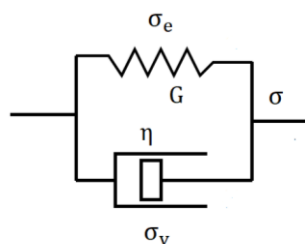
#### Características del Modelo:

- Sistema en serie: Amortiguador y Resorte
- Suma de deformaciones:  $\gamma = \gamma_v + \gamma_e$
- Suma de tasas de corte:  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_v + \dot{\gamma}_e$
- Igualdad de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_v = \sigma_e$
- Modelo de Maxwell:  $\sigma + \lambda_M \cdot \dot{\sigma} = \eta \cdot \dot{\gamma}$
- Evolución de la deformación:  $\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma} \left( 1 - e^{\left( \frac{-t}{\lambda_M} \right)} \right)$
- Donde ( $\lambda_M = \eta / G$ ): Tiempo de relajación de Maxwell ( $\lambda$ : tiempo característico para que fluya un material),  $\eta$ : Viscosidad aparente y  $G$ : Módulo de elasticidad
- El modelo representa el comportamiento viscoelástico de fluidos no newtonianos.

### 2.6.1.1.2 Modelo de Kelvin-Voigt

Cuando  $B_0 = G$  y  $B_1 = \eta$  (los demás parámetros son cero, ver Ec. [25]).

$$\sigma = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [27]$$



**Figura 25** Modelo mecánico de Kelvin-Voigt

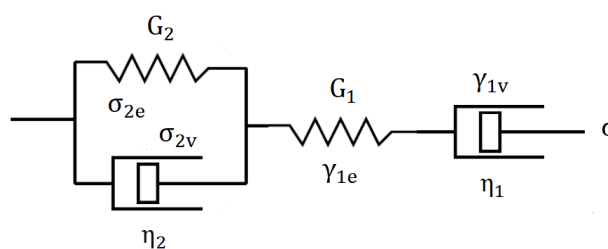
#### Características del Modelo:

- Sistema en paralelo: Amortiguador y Resorte
- Suma de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_v + \sigma_e$
- Igualdad de deformaciones:  $\gamma = \gamma_v = \gamma_e$
- Modelo de Kelvin-Voigt:  $\tau = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma}$
- Deformación:  $\gamma = (\sigma/G) \left( 1 - e^{\left(-\frac{t}{\lambda_K}\right)} \right)$
- Donde ( $\lambda_K = \eta / G$ ): Tiempo de relajación de Kelvin
- El modelo representa el comportamiento de sólidos viscoelásticos.

### 2.6.1.1.3 Modelo de Burgers

Cuando  $A_1, A_2, B_1, B_2 \neq 0$  (los demás parámetros son cero, ver Ec. [25]).

$$\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} = B_1 \dot{\gamma} + B_2 \ddot{\gamma} \quad [28]$$



**Figura 26** Modelo mecánico de Burgers

### Características del Modelo:

- Sistema mixto (serie y paralelo): Amortiguador y Resorte
- Deformación total:  $\gamma = \gamma_M + \gamma_K$

#### Modelo de Maxwell

- Igualdad de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_{1e} = \sigma_{1v}$
- Suma de deformaciones:  $\gamma_M = \gamma_{1e} + \gamma_{1v}$
- Deformación de Maxwell:  $\gamma_M = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{\eta_1 \frac{\partial}{\partial t}}$

#### Modelo de Kelvin

- Igualdad de deformaciones:  $\gamma_K = \gamma_{2e} = \gamma_{2v}$
- Suma de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_{2e} + \sigma_{2v}$
- Reemplazo de componentes:  $\sigma = G_2 \cdot \gamma_K + \eta_2 \cdot \frac{\partial \gamma_K}{\partial t}$
- Deformación de Kelvin:  $\gamma_K = \frac{\sigma}{G_2 + \eta_2 \frac{\partial}{\partial t}}$
- Deformación total:  $\gamma = \frac{\sigma}{G_1} + \frac{\sigma}{\eta_1 \frac{\partial}{\partial t}} + \frac{\sigma}{G_2 + \eta_2 \frac{\partial}{\partial t}}$
- Modelo de Burgers:  $\sigma + \left( \lambda_2 + \lambda_1 + \frac{\eta_1}{G_2} \right) \dot{\sigma} + \lambda_1 \lambda_2 \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\gamma} + \eta_1 \lambda_2 \ddot{\gamma}$
- Deformación:  $\gamma = \sigma \left( \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left( 1 - e^{\left( -\frac{t}{\lambda_B} \right)} + \frac{t}{\eta_2} \right) \right)$
- Donde (  $\lambda_B = \eta / G$ ): Tiempo de relajación de Burgers

#### 2.6.1.1.4 Modelo de Jeffrey's o viscoso de tres elementos

Cuando  $A_1 = \lambda_M$ ,  $B_1 = \eta_2$  y  $B_2 = \eta_2 \lambda_J$  (demás parámetros son cero, ver Ec. [25]).

$$\sigma + \lambda_M \dot{\sigma} = \eta_2 (\dot{\gamma} + \lambda_J \ddot{\gamma}) \quad [29]$$

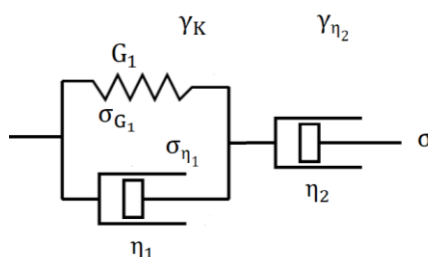


Figura 27 Modelo mecánico de Jeffrey's

### Características del Modelo:

- Sistema en serie: Kelvin y un amortiguador
- Suma de deformaciones:  $\gamma = \gamma_K + \gamma_{\eta_2}$
- Igualdad de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_K = \sigma_{\eta_2}$
- Deformación del amortiguador:  $\gamma_{\eta_2} = \frac{\sigma}{\eta_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t}}$

### Modelo de Kelvin

- Suma de esfuerzos:  $\sigma = \sigma_{G_1} + \sigma_{\eta_1}$
- Reemplazo de componentes:  $\sigma = G_1 \cdot \gamma_K + \eta_1 \cdot \frac{\partial \gamma_K}{\partial t}$
- Deformación de Kelvin:  $\gamma_K = \frac{\sigma}{G_1 + \eta_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t}}$
- Deformación total:  $\gamma = \frac{\sigma}{G_1 + \eta_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t}} + \frac{\sigma}{\eta_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t}}$
- Modelo de Jeffrey's:  $\sigma + \lambda_M \dot{\sigma} = \eta_2 (\dot{\gamma} + \lambda_J \ddot{\gamma})$
- $\lambda_J$  Es el tiempo de relajación de Jeffrey's
- El modelo representa el comportamiento de fluidos viscosos no lineales.

## 2.7 Reometría

La reometría es fundamental para determinar el comportamiento reológico de un material, pero el propósito final de ello, es determinar la ecuación constitutiva que lo caracteriza. Los sistemas de medición reométricos, están conformados por una parte rotacional y otra parte fija. El movimiento de una de las partes del sistema produce gradientes de velocidad en el fluido. La parte rotacional gira a una velocidad angular o a un torque predeterminado. De acuerdo a Barnes (1989), se desprenden dos modos de prueba: 1) **CSR** Control de la velocidad de deformación (se aplica una velocidad angular y se mide el torque) 2) **CSS** Control del esfuerzo de corte (se aplica un torque y se mide la velocidad angular).

Ambos métodos fueron establecidos por Couette en 1888 y Searle en 1912 respectivamente, antes de la primera guerra mundial. Dependiendo de las características del reómetro, este puede integrar uno o los dos modos de prueba. En la realidad son escasos los reómetros que controlan la velocidad de deformación, ya que



alcanzar una velocidad de deformación de forma inmediata, resulta complicado realizarlo. Mientras que un viscosímetro mide la viscosidad a un limitado rango de velocidad de deformación, un reómetro puede medir la viscoelasticidad y viscosidad en un amplio rango de velocidad de deformación. Las geometrías de medición son:

### **2.7.1 Geometría de cilindros concéntricos**

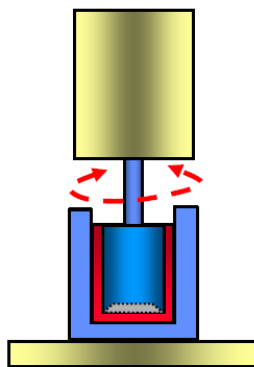
La geometría de cilindros concéntricos, consta de un cilindro externo y un cilindro interno, llamados en otras literaturas **cup** y **bob**. La muestra del material se deposita en el cilindro exterior o contenedor y uno de los cilindros gira (ver figura 28). Dos principios de medición se establecen en los sistemas de medición coaxial: 1) Principio de Searle (cilindro externo estático y cilindro interno móvil) 2) Principio de Couette (cilindro externo móvil y cilindro interno estático).

#### **2.7.1.1 Ventajas**

- La geometría de cilindros concéntricos tiene buena sensibilidad para fluidos de baja viscosidad (Vader & Wyss, n.d.).
- Contiene al fluido, evitando que se derrame por su baja tensión superficial.

#### **2.7.1.2 Desventajas**

- Los sistemas de medición que emplean el principio de Couette tienen inconvenientes cuando tratan de controlar la temperatura, ya que técnicamente es más difícil sellar un cilindro rotatorio que un fijo, por tanto, los sistemas Couette están restringidos para bajas velocidades (Barnes, 1989).
- Requiere de mayor cantidad de material.



**Figura 28** Geometría de cilindros concéntricos

Fuente: (Somwangthanaroj, 2010)

Para la obtención del esfuerzo de corte, velocidad de deformación y viscosidad, el reómetro calcula iterativamente cada parámetro, dependiendo de la geometría de medición configurada.

**Velocidad de deformación:**  $\dot{\gamma} = \frac{r_o \Omega_I}{r_o - r_I}$

**Esfuerzo de corte:**  $\sigma = \frac{M}{2\pi r_o^2 L}$

**Viscosidad:**  $\eta = \frac{M(r_o - r_I)}{2\pi r_o^3 \Omega_I L}$

Donde  $r_o$  (radio-cilindro exterior),  $r_I$  (radio-cilindro interior),  $\Omega_I$  (velocidad angular-cilindro interior),  $M$  (torque),  $L$  (longitud efectiva inmersa en el fluido).

## 2.7.2 Geometría vane

La geometría vane o tipo paletas es una leve modificación de la geometría de cilindros concéntricos, donde el cilindro interno es reemplazado por un rotor tipo paletas (ver figura 29), que va sumergido en el fluido, hasta que el borde superior de las aspadas sea cubierto.

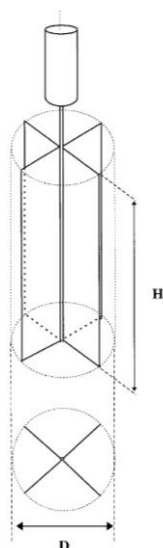
### 2.7.2.1 Ventajas

- Las aspadas homogenizan el material, evitando la sedimentación.
- Evitan el efecto de deslizamiento.

- Es adecuado utilizarlo cuando la tensión superficial del fluido es muy baja, o son suspensiones muy diluidas.
- Se utiliza cuando el material contiene partículas grandes.

### 2.7.2.2 Desventajas

- Requiere de mayor cantidad de material.
- Tienen mayor dificultad de limpieza.



**Figura 29** Geometría vane o tipo paletas

Fuente: (Benna et al., 1999)

### 2.7.3 Geometría de platos paralelos

En la geometría de platos paralelos, el material es colocado encima del plato inferior; posteriormente el plato superior desciende hasta una mínima altura, denominada gap y gira cizallando al material (ver figura 30). Se recomienda que el tamaño del gap no sea menor a 0,3 mm pero no mayor a 3 mm y que además sea al menos tres veces mayor que el tamaño de la partícula más grande (Schramm, 2004).

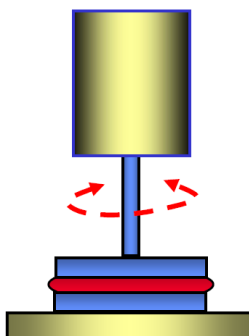
#### 2.7.3.1 Ventajas

- Se utiliza cuando el material contiene partículas grandes.

- La altura del gap es ajustable.
- Facilidad de limpieza.
- Requiere de poca cantidad de material.

### 2.7.3.2 Desventajas

- La velocidad de deformación no es uniforme en toda la muestra, varía radialmente, por tanto, las mediciones obtenidas son realizadas en el borde del plato (radio máximo).
- No es recomendable para muestras de baja viscosidad.



**Figura 30** Geometría de platos paralelos

Fuente: (Somwangthanaroj, 2010)

Los parámetros reológicos característicos de esta geometría son:

**Velocidad de deformación:**  $\dot{\gamma} = \frac{\Omega R}{h}$

**Esfuerzo de corte:**  $\sigma = \frac{3M}{2\pi R^3}$

**Viscosidad:**  $\eta = \frac{3Mh}{2\pi R^4 \Omega \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\partial \ln M}{\partial \ln \Omega}\right)}$

Donde R (radio-borde del plato), h (distancia entre placas o gap) y  $\Omega$  (velocidad angular-plato superior).

## 2.7.4 Geometría cono y plato

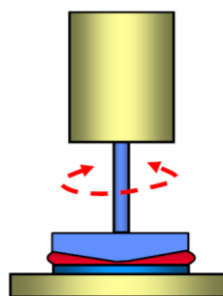
En la geometría cono y plato, se coloca el material encima del plato base, posteriormente el cono baja hasta que la punta virtual es ajustada. El cono empieza a girar, cizallando el material (ver figura 31). El gap en esta geometría es muy pequeño, en el orden de las micras, siendo difícil apreciarlo visualmente. El ángulo del cono ( $\theta_0 \leq 4^\circ$ ) debe ser pequeño para permitir la simplificación ( $\tan \theta_0 = \theta_0$ ).

### 2.7.4.1 Ventajas

- La velocidad de deformación aplicada, es uniforme desde la punta virtual del cono hasta su radio externo.
- Facilidad de limpieza.
- Requiere de poca cantidad de material.
- Se recomienda optar por esta geometría como primera opción para la reometría, por las ventajas mencionadas.

### 2.7.4.2 Desventajas

- No es adecuado, si el material es muy diluido.
- No es adecuado para fluidos que contengan tamaños de partículas grandes.
- El ajuste entre la punta del cono y el plato es muy crítico para ángulos de cono muy pequeños, ya que aumentan el error en la medición de la viscosidad, por lo que se recomienda utilizar ángulos de cono más generosos pero no mayores a  $4^\circ$  (Schramm, 2004).



**Figura 31** Geometría de plato y cono

Fuente: (Somwangthanaroj, 2010)

Los parámetros reológicos que caracterizan a esta geometría son:

**Velocidad de deformación:**  $\dot{\gamma} = \frac{\Omega_1}{\theta_0}$

**Esfuerzo de corte:**  $\sigma = \frac{3M}{2\pi R^3}$

**Viscosidad:**  $\eta = \frac{3M\theta_0}{2\pi R^3 \Omega_1}$

Donde  $\Omega_1$  (velocidad angular-plato),  $\theta_0$  (ángulo-cono) y R (radio externo-cono)

## 2.8 Resumen

- Las suspensiones dispersas de bentonita sódica, son fluidos estructurados utilizados como lodos de perforación en la industria petrolera, para la extracción del material perforado (detritus), mismos que cumplen determinadas funciones en el proceso, como enfriamiento de la herramienta de perforación, arrastre del detritus hacia la superficie, suspender del detritus cuando se detiene la operación, limpiar profundamente el pozo, estabilizar las paredes del pozo e impedir la filtración del agua hacia formaciones geológicas.
- Los fluidos desde el punto de vista de variación de su viscosidad ante determinados parámetros de afectación, se clasifican en: Newtonianos y no-Newtonianos.
- Los fluidos no-Newtonianos se dividen en dos grandes categorías: 1) Flujos Puramente viscosos, 2) Flujos Viscoelásticos.
- Generalmente el estudio de los fluidos puramente viscosos independientes del tiempo es mucho más sencillo que el estudio de los fluidos dependientes del tiempo y viscoelásticos.
- La reometría es una herramienta fundamental para determinar el comportamiento reológico del material. Todo el análisis realizado conlleva a establecer posteriormente la ecuación constitutiva del material en estudio.

- En la realidad todos los materiales exhiben un determinado grado elástico y viscoso, Su fenómeno viscoelástico puede ser estudiado con las herramientas y experimentos adecuados.
- Los fluidos de perforación comúnmente están constituidos por un fluido base, y específicos aditivos, que modifican o mantienen las propiedades reológicas de acuerdo a las condiciones que presenta el terreno de perforación.
- Debido a que el presente trabajo tiene un enfoque netamente reológico, se trabajará con la viscosidad del fluido en todas las experimentaciones y se medirá su nivel de pH previamente, validando efectivamente que las suspensiones en estudio caracterizan a un lodo de perforación.

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS Y CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

En este capítulo se presentan los equipos de medición y accesorios adicionales, necesarios para la experimentación. También se expone a detalle el protocolo precizalla y las pruebas reológicas con sus respectivos procedimientos, que forman parte de la caracterización reológica a las suspensiones de bentonita sódica.

#### 3.1 Equipo y accesorios de medición

##### 3.1.1 Reómetro

El laboratorio de Reología y Electrocinética de la Universidad de Málaga, dispone de un reómetro Bohlin Instruments Gemini<sup>TM</sup> Advanced (ver figura 32), con control del esfuerzo de corte CSS, y sistema peltier para el control de la temperatura. Cada prueba fue realizada sobre una muestra fresca a una temperatura ambiente de  $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$

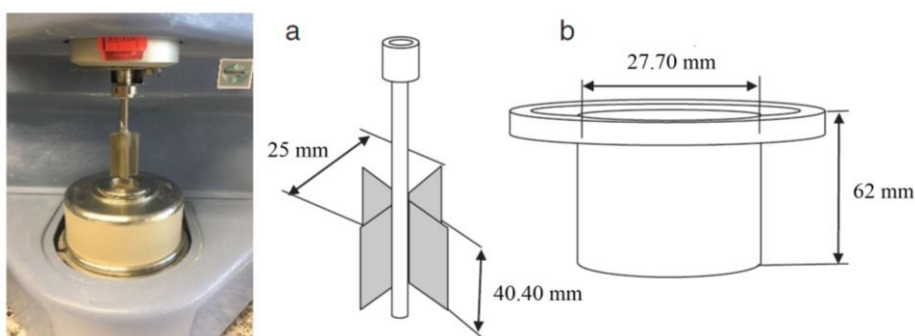


**Figura 32** Reómetro Gemini Advanced, laboratorio de Reología-Universidad de Málaga



### 3.1.2 Geometría de medición

La mayoría de las suspensiones de bentonita sódica formuladas en este estudio, son de baja viscosidad, por tanto, se ha decidido utilizar la geometría vane (ver figura 33), ya que además tal geometría evita la posibilidad de sedimentación de las muestras. Además, el tamaño del gap es autoajustado por el reómetro. El tamaño del gap para todas las pruebas es de (2mm). Es importante tener precaución con el reómetro, ya que primero se debe retirar la pestaña de bloqueo de la geometría, antes de iniciar el protocolo pre-cizalla y pruebas reológicas consecuentes.



**Figura 33** Sistema de la geometría vane, a) Rotor tipo paletas, b) Cilindro externo de depósito

### 3.1.3 Solvent Trap

Es un accesorio adicional utilizado cuando se trabaja con sistemas peltier (ver figura 34), diseñado para evitar la evaporación del solvente, cuando se desempeñan las pruebas reológicas. En referencia a la figura 32, el accesorio, va posicionado encima del cilindro de depósito, cubriendo a la muestra del material y la geometría vane sumergida.



**Figura 34** Solvent trap utilizado en la experimentación

## **3.2 Medición del nivel de pH**

De acuerdo a Benna (2000), el pH, como el contenido de arcilla, son los principales parámetros para determinar la idoneidad de la arcilla y usarla en lodos de perforación. En varios estudios, se sustenta que el pH de una suspensión de arcilla, es un parámetro determinante de la condición estructural del fluido (Luckham & Rossi, 1999).

Un cambio del pH modificaría la estructura y el comportamiento reológico de la suspensión. El aumento del pH en dispersiones de bentonita ( $\text{pH} \geq 9$ ), conduce a la formación de una estructura tridimensional abierta, que es capaz de atrapar más agua en los espacios interlaminares y donde predomina la asociación F-F (cara a cara) de las partículas de bentonita, ya que tanto los bordes como las caras de las partículas están cargadas negativamente. La energía de cohesión entre partículas disminuye, con el aumento del pH (Benyounes et al., 2010).

La disminución del pH, aumenta la posibilidad de floculación por el aumento de atracción entre partículas, debido a que disminuye el número de cargas negativas en los bordes de las partículas de bentonita, e incrementa el número de asociaciones E-E (borde a borde) y E-F (borde a cara) entre partículas (Luckham & Rossi, 1999). De esta manera, los fluidos de perforación, se desempeñan a pH básico, manteniendo en suspensión dispersa las partículas de bentonita y evitando su floculación.

## **3.3 Experimentación reológica**

### **3.3.1 Protocolo de preparación y pre-cizalla**

Dado que la forma de preparación y el tamaño de partícula del material, tienen gran influencia en el estado final de las muestras y por ende en su comportamiento reológico, todas las pruebas son realizadas bajo las mismas condiciones (Benchabane & Bekkour, 2006; Benna, Ariguib, Clinard, & Bergaya, 2000), para una comparativa válida de resultados. Siendo necesario, seguir un protocolo pre-cizalla previo a la experimentación, con el fin de partir desde un nivel referencial desestructurado del material, eliminar los efectos de memoria adquiridos en la preparación y obtener reproducibilidad y repetibilidad en los resultados. Según Benchabane y Bekkour

(2006), para asegurar una completa reproducibilidad, las mediciones son realizadas una vez que se ha alcanzado un estado de equilibrio.

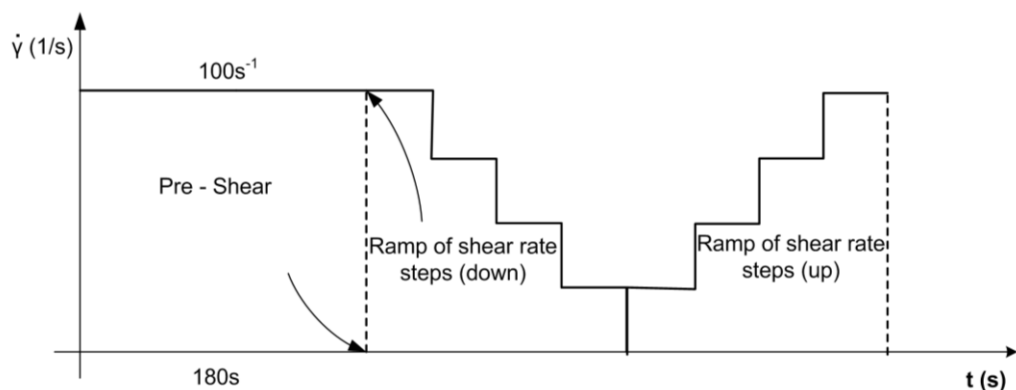
En varios estudios sobre dispersiones de bentonita como fluidos de perforación, se han formulado muestras con similares concentraciones (ver tabla 2). En base a un criterio propio y referencias tomadas, se ha elaborado protocolos para la preparación de las muestras y para la pre-cizalla previa. En el protocolo de preparación se ha incluido el tiempo de hidratación de las partículas de arcilla, para que haya homogeneidad en las suspensiones y evitar el efecto de sedimentación (Dolz et al., 2007). Una vez finalizado el protocolo de preparación de las muestras, se ha procedido de inmediato a aplicar el protocolo pre-cizalla previo a la experimentación.

**Tabla 2**

Protocolo de preparación de lodos de perforación según varios autores

Protocolo experimental para la preparación de lodos de perforación a base de agua propuesto por varios autores						
Autores	T <sub>AMBIENTE</sub> [°C]	t <sub>AGITACIÓN</sub> [h]	t <sub>TREPOSO</sub> [h]	ȳ <sub>PRECIZALLA</sub> [s <sup>-1</sup> ]	t <sub>PRECIZALLA</sub> [min]	t <sub>TREPOSO POSTERIOR</sub> [min]
(Meng et al., 2012)	25 ± 0.1	----	24	----	----	----
(Jdayil & Ghannam, 2014)	25 ± 0.1	24	24	5	1	2
(Benchabane & Bekkour, 2006)	20 ± 0.1	24	24	1	60	10
(Dolz et al., 2006)	24 ± 0.1	24	2	1-100 → 10 s → 100-1	----	10
(Basim & Jdayil, 2011)	25 ± 0.1	----	24	5	1	2
(Benna et al., 2000)	25 ± 0.1	24	24	----	----	----
(Mahto & Sharma, 2004)	----	----	----	----	----	----
(Benyounes et al., 2010)	20 ± 0.1	24	----	1	60	60
(Yildiz et al., 1999)	25 ± 0.1	----	----	----	----	10080 (1 semana)
(Permien & Lagaly, 1995)	20 ± 0.1	24	24	----	----	----
(Bekkour et al., 2005)	20 ± 0.1	24	24	30 Pa	10	60
(Kelessidis et al., 2011)	23 ± 0.1	24	16	----	5	----

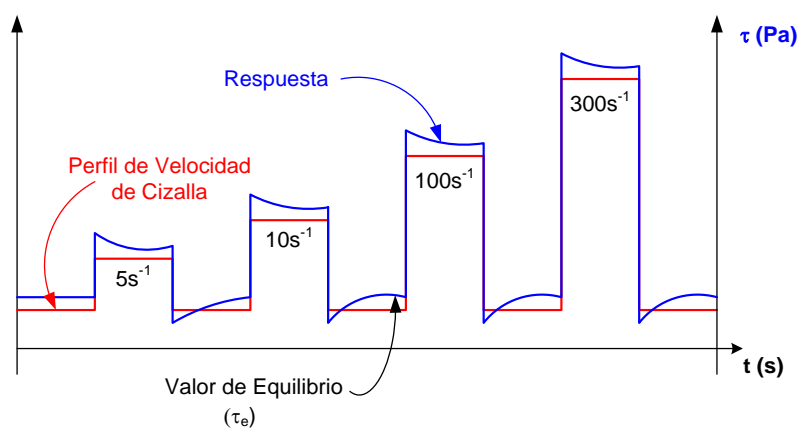
En el presente trabajo se ha considerado a la velocidad de deformación de 100 1/s, para el protocolo pre-cizalla y para todas las pruebas reológicas. La velocidad de deformación mencionada, es la más habitual en el proceso de perforación (Tehrani, 2008), cuando asciende el fluido por el espacio anular. El protocolo de pre-cizalla está conformado por un salto de escalón de 100 s<sup>-1</sup> durante 180 s, sin tiempo de reposo posterior (ver figura 35).



**Figura 35** Protocolo de pre-cizalla y curvas de flujo estacionario iniciales

### 3.3.2 Análisis de Reversibilidad

En la caracterización reológica de un material, es necesario primero realizar un análisis de reversibilidad (ver figura 36), con el fin de determinar el rango de velocidades de deformación adecuado, para que exista reversibilidad en las propiedades de la suspensión, garantizando así, resultados reproducibles y precisos. (Benchabane & Bekkour, 2006; Benna et al., 2000).



**Figura 36** Prueba de reversibilidad al corte

#### 3.3.2.1 Descripción de la prueba

El análisis de reversibilidad consiste en aplicar saltos de escalón con aumento progresivo de la velocidad de deformación. Cada vez que inicia la mínima velocidad de deformación referencial, el esfuerzo alcanzará un valor estacionario. El valor

obtenido es comparado con el anterior y si es menor al 10%, existe reversibilidad en las propiedades (Rubio-Hernández & Velázquez-Navarro, 2007).

### 3.3.3 Curvas de Flujo Estacionario

La correlación entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), define el comportamiento de flujo de un fluido, con la velocidad de deformación en el eje de la abscisa y el esfuerzo de corte en el eje de la ordenada. Este diagrama es llamado “Curvas de flujo estacionario”. En la práctica, es habitual usar el eje de la abscisa para una variable libre y el de la ordenada para los resultados (Schramm, 2004).

Para el desarrollo de una caracterización reológica, es fundamental primero obtener las curvas de flujo estacionario y viscosidad características, para conocer el tipo de comportamiento no-Newtoniano puramente viscoso que posee el fluido (ver figura 13). Mediante las curvas de flujo estacionario, un fluido puede ser shear thinning y viscoplástico a la vez, o también shear thickening y viscoplástico (ver figura 12). En la realidad, es común que muchos fluidos tengan comportamientos de flujo no-Newtonianos combinados.

#### 3.3.3.1 Descripción de la prueba

Antes de realizar las curvas de flujo estacionario, es necesario primero familiarizarse con el material. Para ello se recurre a saltos de escalón, con el fin de estimar el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario, tomando en referencia la etapa de construcción estructural. Sabiendo que las curvas de flujo estacionario, están conformadas por saltos de escalón progresivos en aumento o decremento, el tiempo estacionario obtenido es aproximadamente dividido para el número de mediciones o **samples**.

Las curvas de flujo estacionario, son realizadas con una velocidad de deformación mínima de 0.5 1/s y máxima de 100 1/s, con 20 puntos de medición, 3s para el tiempo de integración y un tiempo estimado de 30s para que las mediciones se realicen en el estado estacionario. El tiempo para alcanzar el estado estacionario, va en aumento hasta 65s, conforme incrementa la concentración de sólidos en las muestras.

Con el objetivo de verificar la repetibilidad en las mediciones, se ha realizado tres curvas de bajada con protocolo pre-cizalla cada una, aprovechando el estado

desestructurado en el fluido, ocasionado por la pre-cizalla, y 1 curva de subida sin protocolo pre-cizalla, aprovechando la construcción estructural efectuada.

### **3.3.4 Tixotropía**

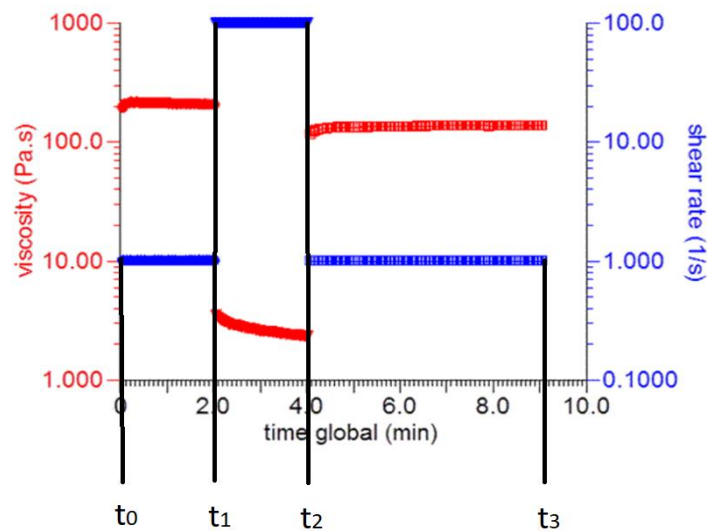
La tixotropía, la cual es un decremento de la viscosidad aparente con el tiempo, bajo una cizalla constante, tiene una recuperación gradual cuando la cizalla es removida. Los efectos tixotrópicos son dependientes del tiempo, por lo tanto, si la viscosidad es reducida e inmediatamente es recuperada después del corte, el material no es tixotrópico, pero si Reo-fluidificante (Abu-Jdayil, 2011). De acuerdo a (Rubio-Hernandez, Velazquez-Navarro, & Galindo Rosales, 2007) un fluido es más tixotrópico mientras más lenta sea su construcción estructural.

#### **3.3.4.1 Prueba de saltos de escalón**

Para un estudio serio de la tixotropía, las pruebas de lazos de histéresis no son recomendables, ya que el área generada es imposible de relacionar con la tixotropía en términos cuantitativos. Por ello, se recurre a aplicar saltos de escalón al fluido, para cuantificar la tixotropía. Los mejores experimentos para medir la tixotropía son aquellos donde la muestra a ensayar es cizallada a una velocidad de deformación constante hasta obtener el equilibrio, inmediatamente después la velocidad de deformación es cambiada a otro valor (Barnes, 2000).

#### **3.3.4.2 Descripción de la prueba**

La prueba saltos de escalón consta de tres etapas. Se aplica una velocidad de deformación como sollicitación y se obtiene el esfuerzo de corte o la viscosidad aparente como respuesta. A menudo se controla la velocidad de deformación a valores de (1 1/s, 100 1/s, 1 1/s) para cojinetes de bolas y de (0.1 1/s, 100 1/s, 0.1 1/s) para cojinetes de aire (Mezger, 2014).



**Figura 37** Prueba saltos de escalón

Fuente: (Rheology-School, 2013)

Para el presente estudio, se trabajará con velocidades de deformación de (0.5 1/s, 100 1/s, 0.5 1/s). Las tres etapas que conforma la prueba son: referencial, de destrucción y de construcción (ver figura 37). De acuerdo a Mezger (2014), se establece cuatro métodos para cuantificar la tixotropía:

- **M1)** Valor de tixotropía como cambio de la viscosidad
- **M2)** Tiempo total de tixotropía
- **M3)** Tiempo relativo de tixotropía
- **M4)** Porcentaje de construcción dentro de un tiempo definido previamente.

### 3.3.5 Viscoelasticidad

La prueba más habitual para determinar la viscoelasticidad de un material, es la prueba oscilatoria, realizada en el régimen lineal viscoelástico.

#### 3.3.5.1 Prueba oscilatoria

Si bien es cierto, los modelos viscoelásticos se derivan a partir de una relación conocida entre el esfuerzo y la deformación, tal relación se determina a partir de mediciones oscilatorias, donde se impone una deformación oscilatoria sinusoidal a la muestra y se registra el esfuerzo en función del tiempo. Cuando la deformación es

pequeña, la respuesta del esfuerzo puede tener un comportamiento oscilatorio con la misma frecuencia ( $\omega$ ), lo que significa que se está trabajando el régimen viscoelástico lineal (Ancy, 2005). Las pruebas oscilatorias son utilizadas para analizar los tipos de materiales viscoelásticos, desde líquidos de baja viscosidad hasta soluciones de polímeros y dispersiones como suspensiones, emulsiones y espumas, e incluso sólidos rígidos (Mezger, 2014).

Los parámetros de los modelos viscoelásticos pueden ser determinados por las magnitudes de respuesta del esfuerzo y la deformación, y por el desfase entre los mismos. Dada una deformación expresada en forma compleja:

$$\begin{aligned}\gamma(t) &= \gamma_0 \Re(e^{i\omega t}) \\ \gamma(t) &= \gamma_0 \cos \omega t\end{aligned}\quad [30]$$

Donde  $\gamma_0$  es la amplitud de deformación y  $\omega$  la frecuencia. Derivando la última ecuación, su velocidad de deformación se expresa.

$$\dot{\gamma}(t) = -\gamma_0 \omega \sin \omega t \quad [31]$$

Para comprender de mejor forma la relación entre el módulo complejo y los parámetros del material en los modelos viscoelásticos, se reemplaza la velocidad de deformación en el modelo simple de Maxwell (ver Ec. [25]), obteniéndose así una ecuación diferencial de primer orden y el esfuerzo registrado tiene la siguiente solución.

$$\sigma = \frac{\eta\omega\gamma_0}{1 + \omega^2\lambda_m^2} (\omega\lambda_m \cos \omega t - \sin \omega t) \quad [32]$$

De acuerdo a Barnes (1989), para obtener  $G'$  primero se considera que  $(\sigma = G'\gamma)$  y la parte del esfuerzo que está en desfase con la deformación aplicada se iguala a cero ( $\sin \omega t = 0$ ), mientras que para obtener  $G''$ , se considera que  $(\sigma = \frac{G''}{\omega}\dot{\gamma})$  y la parte del esfuerzo que está en fase con la deformación aplicada se iguala a cero ( $\cos \omega t = 0$ ), dicho de otra manera, el módulo de elasticidad está en fase con la deformación oscilatoria impuesta, en cambio el módulo viscoso está en desfase con la misma (Kumaran, 2010), siendo expresados de la siguiente forma:



$$G' = \frac{\eta \lambda_m \omega^2}{1 + \omega^2 \lambda_m^2} \quad \wedge \quad G'' = \frac{\eta \omega}{1 + \omega^2 \lambda_m^2} \quad [33]$$

Generalmente la relación esfuerzo- deformación es representada por el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) que está en función de la frecuencia. Los módulos  $G'$  y  $G''$  son la parte real e imaginaria del módulo complejo  $G^*$ , expresado así.

$$G^* = G' + iG'' \quad [34]$$

El módulo elástico  $G'$  o de almacenamiento, da su respuesta de esfuerzo en fase con la deformación aplicada y hace referencia a la energía almacenada necesaria para recuperar la forma del material una vez que cesa la deformación.  $G''$  es el módulo viscoso o de pérdida, y su respuesta de esfuerzo está en desfase ( $\pi/2$ ) con la deformación aplicada, este módulo hace referencia a la energía disipada cuando se deforma el material (Kumaran, 2010). De forma generalizada el módulo de elástico y el módulo viscoso se expresan:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \wedge \quad G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad [35]$$

Donde ( $\delta$ ) es el desfase entre el esfuerzo y la deformación. El cociente entre el módulo viscoso y el módulo elástico, representa el ángulo de desfase y es una medida de amortiguamiento del material, expresado así.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad [36]$$

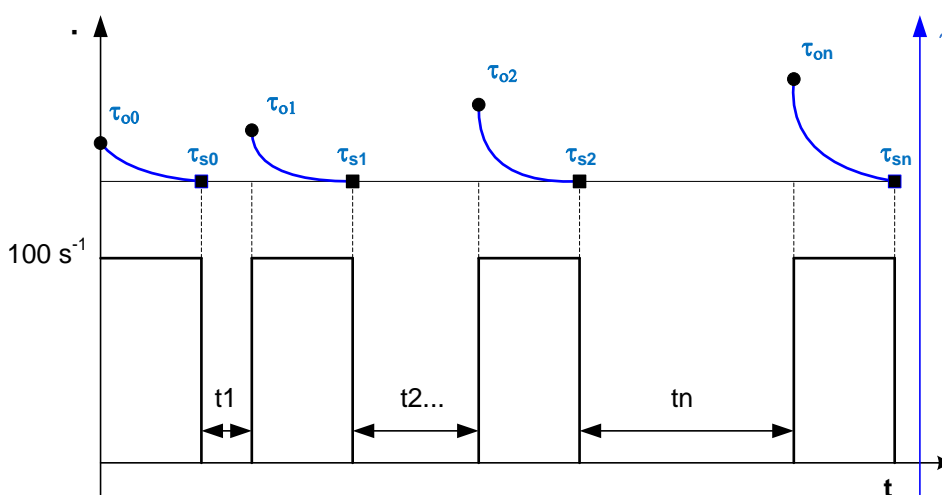
- Si  $\delta \approx 0^\circ \rightarrow$  El material es elástico.
- Si  $\delta \approx 90^\circ \rightarrow$  El material es viscoso.
- Si  $0^\circ < \delta < 90^\circ \rightarrow$  El material es viscoelástico.

Para cuantificar el módulo elástico y el módulo viscoso, es necesario seguir un determinado protocolo, recurriendo a tres pruebas en particular, que son:

1. Saltos de escalón para estimar el tiempo de reposo máximo.
2. Barridos de amplitud **strain sweep** (frecuencia constante).
3. Barridos de frecuencia (amplitud constante).

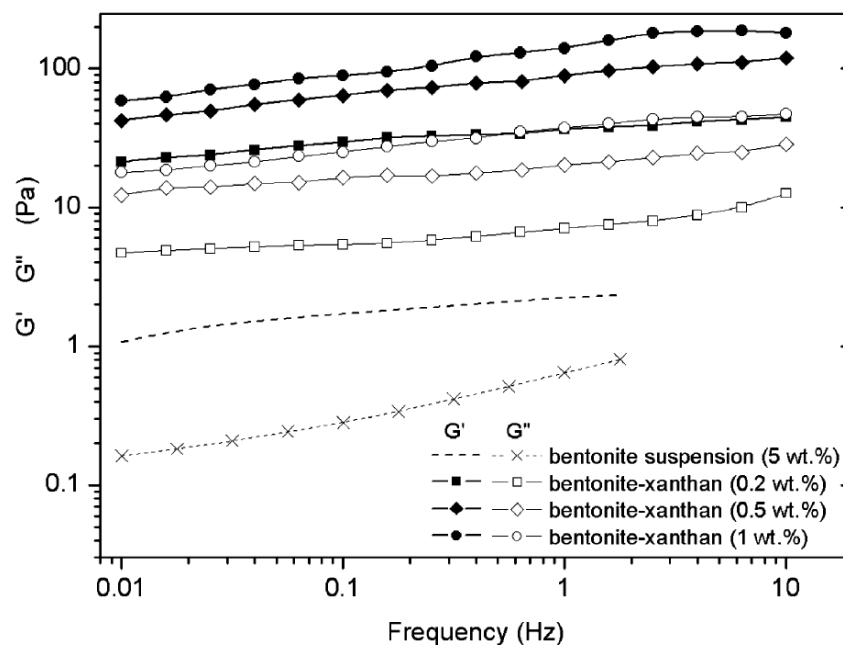
### 3.3.5.2 Descripción de la prueba

Antes de realizar pruebas oscilatorias a un material, es necesario conocer primero su tiempo de reconstrucción estructural máxima. Esto se lleva a cabo, mediante saltos de escalón con tiempo de reposo en aumento (ver figura 38). Donde se registre el máximo esfuerzo efectuado, se toma el tiempo de reposo correspondiente. El tiempo de reposo obtenido, se lo registra en los parámetros iniciales del barrido de amplitud realizado posteriormente.



**Figura 38** Saltos de escalón con diferentes tiempo de reposo

Una vez realizada la prueba para determinar el tiempo de reposo máximo, se procede a ejecutar barridos de amplitud. Cada barrido de amplitud es realizado a frecuencias de 0.1 Hz, 1 Hz y 10 Hz, respectivamente. De esta forma se seleccionará un adecuado régimen lineal viscoelástico. Como parámetros de configuración inicial se tiene un tiempo de reposo de 100s, una deformación mínima de 0.01 y máxima de 1 en trazado logarítmico, 20 puntos de medición y en subida (Up) para aprovechar el estado de construcción estructural máxima. Posteriormente, en contraste con los resultados obtenidos para cada frecuencia, se determinan los límites del régimen lineal viscoelástico LVE.



**Figura 39** Módulo elástico y viscoso como función de la frecuencia

Fuente: (Benchabane & Bekkour, 2006)

Conocido el régimen lineal, se toma el límite superior y se calcula el 80% de su valor. Este valor corresponde a una deformación dentro del régimen lineal viscoelástico, parámetro de configuración inicial, que es necesario para ejecutar barridos de frecuencias posteriormente. Establecido el régimen LVE, se realiza barridos de frecuencias desde 0.1 Hz hasta 10 Hz en trazado logarítmico, con 20 puntos de medición en subida, un tiempo de reposo de 100s y una deformación de 0.0165, obtenida al 80% del límite superior. Siguiendo este protocolo, se obtiene el comportamiento viscoelástico del fluido, en términos del módulo elástico, módulo viscoso (ver figura 39) y ángulo de desfase.

### 3.4 Resumen

- Dada la importancia que tiene la preparación de las muestras en el estado final de las mismas y de su comportamiento reológico, se ha establecido un protocolo para la preparación y otro para la pre-cizalla.

- En un estudio reológico, es fundamentalmente necesario realizar las curvas de flujo estacionario, para determinar el comportamiento no-Newtoniano puramente viscoso que caracteriza al fluido.
- Una de las formas para verificar la repetibilidad en las mediciones, es realizar tres curvas de flujo en bajada con pre-cizalla cada una, seguido de una curva de flujo en subida sin pre-cizalla, aprovechando el estado de construcción estructural.
- Se recomienda para un estudio serio y cuantificable de la tixotropía, recurrir a saltos de escalón a determinadas velocidades de deformación.
- Para caracterizar un material en el campo viscoelástico, es necesario primero conocer el tiempo de reposo máximo, seguido de barridos de amplitud a distintas frecuencias para determinar el régimen lineal viscoelástico LVE. Finalmente mediante barridos de frecuencias, se cuantifica el módulo elástico  $G'$  y el módulo viscoso  $G''$  característicos del material e independientes de la deformación.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen: la composición química de la bentonita sódica en estudio, el protocolo de preparación de las muestras y el protocolo pre-cizalla. Además, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas reológicas, realizadas a suspensiones de bentonita sódica de variada concentración, desde el 3wt% hasta el 10wt%, con sus respectivos análisis.

### 4.1 Materiales

La bentonita sódica fue suministrada por Minpul S.A (Ambato Ecuador), sin embargo, su materia prima proviene de yacimientos minerales peruanos. La composición química de la bentonita sódica se presenta (ver tabla 3).

**Tabla 3**

Composición química de la bentonita sódica natural, (Minpul, 2016)

Composición química (w/w%) de la muestra de bentonita sódica										
Proveedor: Minpul S.A.										
Elementos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	MnO	Pérdida por calcinación	Otros
%	62,86	14,23	3,53	2,80	1,61	1,47	0,33	0,02	4,40	8,75

### 4.2 Diseño de muestras

La concentración de bentonita en el fluido de perforación, es un factor importante que afecta al tiempo necesario para que el material alcance su regeneración estructural o resistencia máxima (Abu-Jdayil, 2011). Las dispersiones de arcilla con concentración mínima de 3 wt%, son a menudo usadas en lodos de perforación (Benna, Kbir-Arighuib, Magnin, & Bergaya, 1999; Luckham & Rossi, 1999). Fluidos altamente concentrados pueden causar efectos negativos al proceso, como una excesiva fricción e incremento de torque (Dolz et al., 2007), sin embargo, se formularán suspensiones

altamente concentradas del 10wt%, con la finalidad de observar cambios más apreciables en las propiedades reológicas del sistema. De acuerdo a varios estudios referentes, se ha realizado una compilación de formulaciones (ver tabla 4).

**Tabla 4**

Formulaciones de lodos de perforación de acuerdo a varios autores

Formulaciones de lodos de perforación a base de agua propuestas por varios autores					
Autores	wt <sub>BENTONITA SÓDICA</sub> [%]				
(Meng et al., 2012)	3	4	5	--	--
(Jdayil & Ghannam, 2014)	4	8	--	--	--
(Benchabane & Bekkour, 2006)	5	--	--	--	--
(Dolz et al., 2006)	6	8	10	11	12
(Basim & Jdayil, 2011)	0.5	4	5	6	10
(Benna et al., 2000)	1	3	5.5	7	--
(Mahto & Sharma, 2004)	1	2	3	4	5
(Benyounes et al., 2010)	2	3	4	6	8
(Yildiz et al., 1999)	2	4	6	--	--
(Permien & Lagaly, 1995)	1	2	4	--	--
(Bekkour et al., 2005)	6	8	10	--	--
(Kelessidis et al., 2011)	3	4	--	--	--

Cuando los fluidos de perforación están suficientemente concentrados, son descritos como fluidos shear thinning-tixotrópicos con un punto de fluencia, producto de las interacciones coloidales entre las partículas (Coussot et al., 2004).

### 4.3 Protocolo de preparación de muestras

Diferentes muestras de dispersión de bentonita fueron preparadas. La bentonita sódica fue añadida al agua destilada, en concentraciones de 3wt%, 4wt%, 6wt%, 8wt% y 10wt%. Para asegurar la homogeneización de las muestras y evitar la formación de agregados se utiliza un agitador magnético por un periodo continuo de 24h. La bentonita se va añadiendo lentamente al agua destilada bajo agitación constante. El tiempo de hidratación de las partículas está incluido dentro del periodo de agitación. Las muestras están contenidas en vasos de precipitación sellados, para evitar la evaporación del agua. Se validó efectivamente que el comportamiento reológico de las

dispersiones de bentonita se desarrolla durante las primeras 24h posterior a la preparación (Abu-Jdayil, 2011). Por ello, en la experimentación se trabajó con muestras realizadas como máximo un día antes. Las muestras han sido formuladas y tienen una denominación específica (ver tabla 5).

**Tabla 5**

Formulación del sistema: bentonita sódica y agua a temperatura ambiente

Muestra	Concentración de bentonita	Fluido base (agua)	pH Básico	A temperatura ambiente
Denominación	[wt%]	[ml]	---	°C
BTA-3	3	100	8±0.5	25±0.1
BTA-4	4	100	8±0.5	25±0.1
BTA-6	6	100	8±0.5	25±0.1
BTA-8	8	100	8±0.5	25±0.1
BTA-10	10	100	8±0.5	25±0.1

#### 4.4 Protocolo pre-cizalla

Una vez preparadas las muestras, se depositan 25g en el cilindro estator. Se posiciona el accesorio solvent trap y se retira la pestaña de seguridad antes de iniciar el protocolo pre-cizalla. El protocolo de pre-cizalla está conformado por un salto de escalón para una velocidad de deformación de 100 1/s, por un tiempo de 180s, a fin de partir desde un nivel referencial desestructurado en el material y eliminar sus efectos de memoria.

#### 4.5 Estudio Reológico

##### 4.5.1 Análisis de reversibilidad

Con el propósito de determinar la reversibilidad en las mediciones a la velocidad de deformación aplicada, se ha realizado curvas de flujo de bajada (down) hasta 0.5 1/s tres veces seguidas, cada bajada con su respectiva pre-cizalla, y seguido de una curva de flujo de subida (up) sin pre-cizalla, para aprovechar el estado de construcción estructural. Los resultados muestran que la suspensión, tiene reversibilidad en sus

mediciones a la velocidad de deformación aplicada (ver figura 42). La dispersión mostrada en este experimento es inferior al 5%. Las cotas de error no son apreciables, por ello no se muestran.

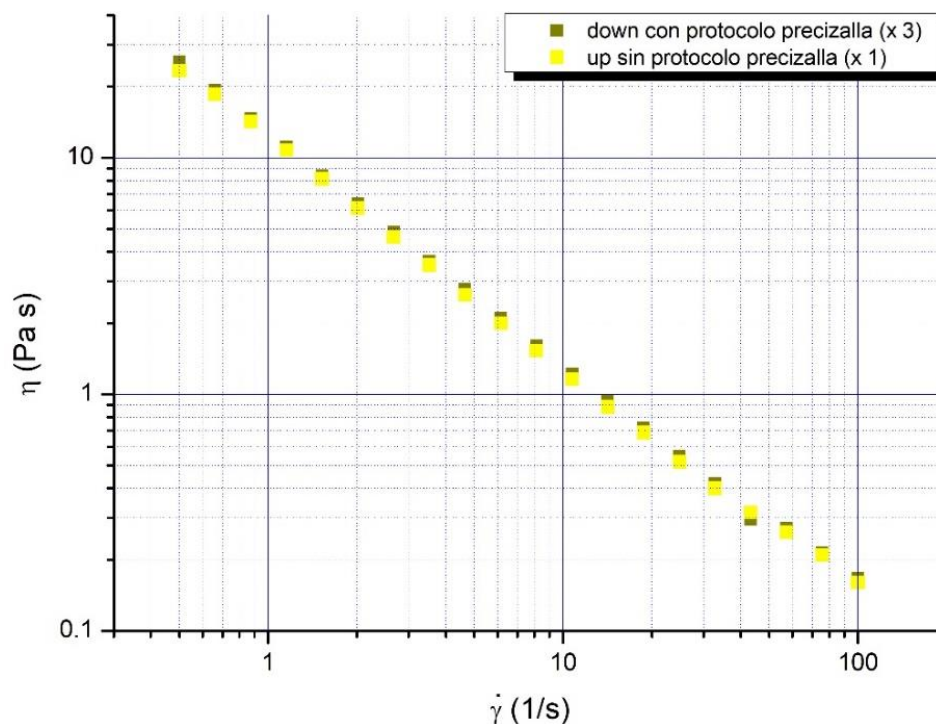
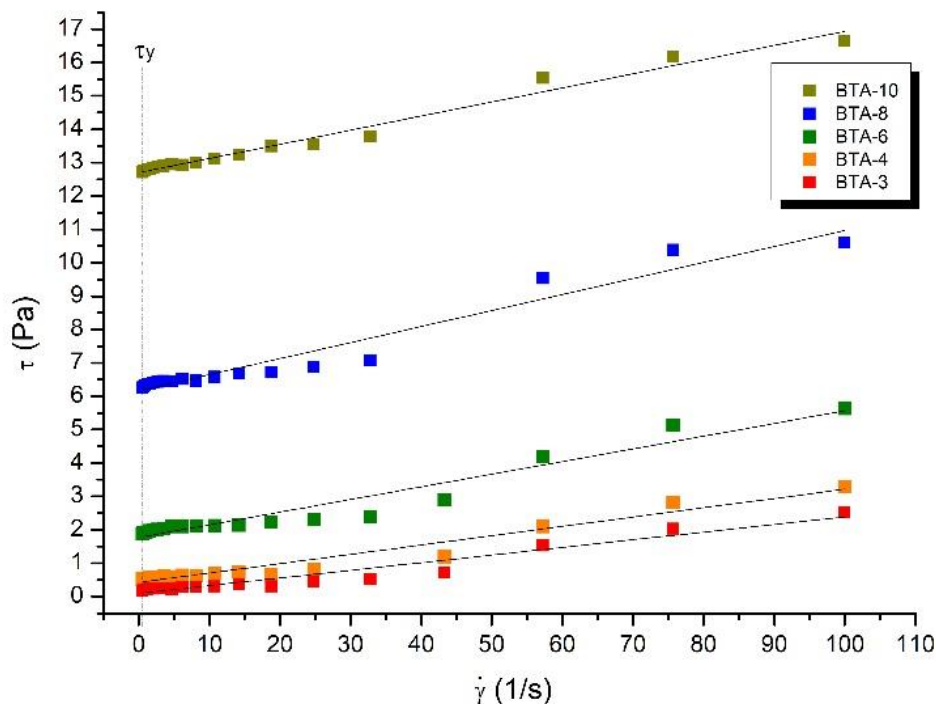


Figura 40 Prueba de reversibilidad

#### 4.5.2 Curvas de flujo estacionario

Se han realizado curvas de flujo estacionario a cada concentración, a fin de establecer el tipo de comportamiento puramente viscoso que caracteriza al sistema (ver figura 43). Las curvas de flujo estacionario se iniciaron desde una velocidad de deformación de 0.5 1/s a 100 1/s, con 20 puntos de medición, un tiempo de reposo de 30s para que cada medición se realice en el estado estacionario y un tiempo de integración de 3s.





**Figura 41** Curvas de flujo estacionario, ajustadas al modelo de Bingham

El tiempo para alcanzar el estado estacionario, se aumentó progresivamente hasta 65s para concentraciones máximas del 10wt%. Mediante el modelo matemático de Bingham (ver Ec. 13), las curvas de flujo han sido ajustadas (Meng et al., 2012). Los parámetros que definen al modelo de Bingham, demuestran que las suspensiones de bentonita, poseen esfuerzos de fluencia y viscosidades plásticas.

De acuerdo a la tabla 6, se observa que el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica aumentan de forma proporcional al contenido de sólidos. Por tanto, las suspensiones pueden ser catalogadas como fluidos viscoplásticos. Comportándose como sólidos cuando no se excede su esfuerzo de fluencia y como fluidos cuando se lo ha excedido. En contraste con lo que establece Larson (1999), sobre la aparición del esfuerzo de fluencia debido a repulsiones entre partículas suficientemente fuertes, que crean una macrocristalización, resulta evidente que el esfuerzo de fluencia crece drásticamente en las suspensiones de bentonita, conforme aumenta el contenido de partículas en el sistema, siempre y cuando el nivel de pH sea básico, ya que a niveles de pH ácidos se produce la polarización de cargas, positivas en los bordes y negativas en las caras (Benyounes et al., 2010), disminuyendo la repulsión. Siendo así, el pH un factor determinante de la condición estructural del fluido (Luckham & Rossi, 1999). Para el proceso de perforación, el esfuerzo de fluencia del fluido es muy importante,

ya que un exceso podría incurrir en utilizar bombas de mayor potencia, para vencer el esfuerzo de fluencia inicial, siendo perjudicial para el proceso y no rentable. Es por ello, que en la ingeniería de lodos de perforación se trabaja con dispersiones de bentonita con concentración mínima del 3wt% (Benna et al., 1999) y alrededor del 4wt% (Abu-Jdayil, 2011).

**Tabla 6**

Parámetros de ajuste modelo de Bingham

MODELO DE BINGHAM			
Muestra	Esfuerzo de Fluencia ( $\tau_y$ )	Viscosidad Plástica ( $\eta_P$ )	Ajuste $R^2$
Denominación	Pa	Pa s	---
BTA-3	0,099	0,023	0,940
BTA-4	0,426	0,028	0,953
BTA-6	1,770	0,038	0,937
BTA-8	6,170	0,048	0,944
BTA-10	12,702	0,042	0,980
		PROM.	0,951

### 4.5.3 Viscosidad vs. % v/v de sólidos

A pesar de existir estimaciones empíricas de la concentración de bentonita para la formulación de lodos de perforación, es primordial conocer el rango máximo de concentración de la bentonita en estudio, que debería tener el fluido para un óptimo desempeño en el proceso. Por ello es necesario, determinar la variación de la viscosidad en función de la concentración en volumen de sólidos, mediante las curvas de viscosidad características de cada concentración. Las curvas de viscosidad fueron obtenidas de las curvas de flujo estacionario ya realizadas en el apartado anterior. Considerando que, en la formulación de las muestras se ha trabajado con concentraciones en peso, es necesario transformarlas a concentraciones volumétricas, usando la densidad del agua y de la bentonita respectivamente, mediante la siguiente ecuación.

$$\% \frac{v}{v} = \frac{m_{\text{Bentonita}}/\rho_{\text{Bentonita}}}{m_{\text{Bentonita}}/\rho_{\text{Bentonita}} + m_{\text{agua}}/\rho_{\text{agua}}} \quad [37]$$

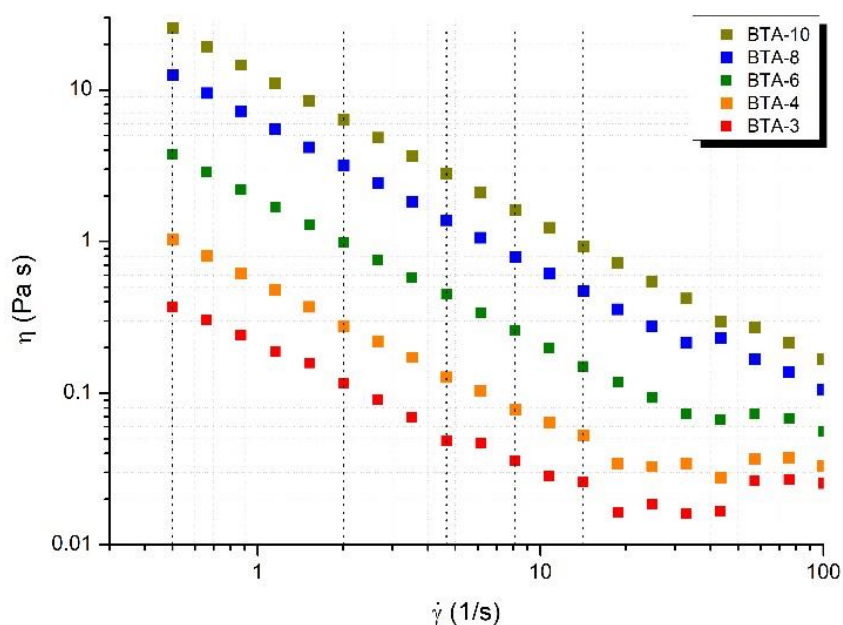
De acuerdo a la tabla 7, se muestran las respectivas transformaciones de concentración en peso a concentración volumétrica (Ver Anexo C) para todas las muestras formuladas (BTA-3 a BTA-10).

**Tabla 7**

Fracción volumétrica de bentonita

Muestra	Porcentaje en peso	Porcentaje en volumen
Denominación	% w/w	% v/v
BTA-3	3	3.81
BTA-4	4	5.07
BTA-6	6	7.56
BTA-8	8	10.03
BTA-10	10	12.47

Mediante 5 rectas de corte, trazadas en las curvas de viscosidad, se ha obtenido el valor correspondiente de viscosidad para cada concentración, por cada recta de corte. Para el trazo de las rectas, se ha considerado la región donde existe un decremento constante de cada curva de viscosidad (ver figura 42). Las curvas de viscosidad presentan un decremento lineal hasta determinado punto, lo que podrían ajustarse al modelo de la Ley de Potencia, sin embargo, este modelo no muestra el valor de fluencia respectivo de cada suspensión. Las curvas de viscosidad describen al fluido como shear thinning. De tal manera, se establece que las suspensiones de bentonita sódica son shear thinning con esfuerzos de fluencia, respectivos.



**Figura 42** Curvas de viscosidad

Adicional a ello, es evidente la formación del plato newtoniano a elevadas velocidades de deformación. A los 20 1/s de velocidad de deformación, el plato newtoniano es más pronunciado para las muestras BTA-3 y BTA-4, y menos pronunciado para la muestra BTA-10 a los 40 1/s. Lo que conlleva establecer que, suspensiones de baja concentración sometidas a elevadas velocidades de deformación tienden a comportarse como un fluido newtoniano, en el cual un incremento de la velocidad de deformación, ya no varía la viscosidad de la suspensión, alcanzando un valor asintótico. Lo que resulta muy útil que las suspensiones tengan baja concentración, ya que mantendrían la fluidez sin necesidad de aumentar la velocidad de deformación o su equivalente esfuerzo de corte, traducido a términos ingenieriles, se evitaría el uso de bombas de mayor potencia para bombear el fluido hacia el pozo de perforación. Por el contrario, las suspensiones con alta concentración de bentonita, disminuyen su tendencia a comportarse como fluidos newtonianos, exigiendo mayor esfuerzo o velocidad de deformación para reducir su viscosidad aparente. Los fluidos de perforación con alta concentración de bentonita, pueden tener efectos negativos en el proceso, como una excesiva fricción e incremento de torque (Dolz et al., 2007), además de una considerable reducción en la tasa de penetración (Mahto & Sharma, 2004) y pérdida de control de flujo (Meng et al., 2012).

De acuerdo a la tabla 8, los valores de la viscosidad para cada concentración y recta de corte se presentan. Una vez tabulados los valores de viscosidad que caracterizan a cada concentración, se ha trazado el diagrama de viscosidad vs. concentración en volumen de sólidos (ver figura 43).

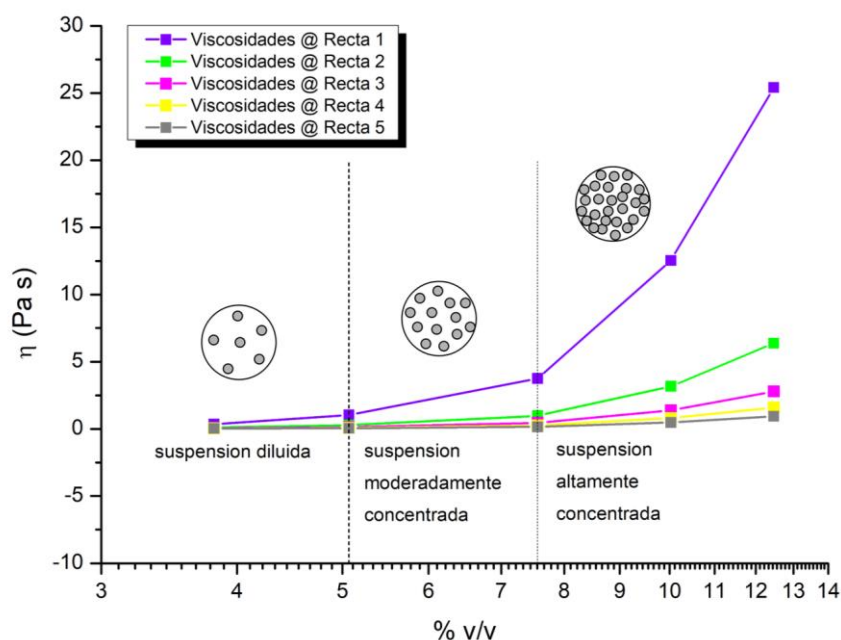
**Tabla 8**

Viscosidad en función de la concentración en volumen

v/v	Valor de Viscosidades (Pa s)				
	@ 0,499 1/s	@ 2,015 1/s	@ 4,652 1/s	@ 8,126 1/s	@ 14,190 1/s
3.81	0,369	0,117	0,048	0,036	0,026
5.07	1,038	0,278	0,128	0,077	0,053
7.56	3,753	0,985	0,449	0,259	0,150
10.03	12,540	3,180	1,385	0,796	0,470
12.47	25,413	6,370	2,784	1,600	0,932

Considerando el tramo donde las curvas de viscosidad correspondientes a cada recta de corte, se mantienen constantes, se ha trazado una recta vertical aproximadamente a los 5.07 %v/v. Por otro lado, en el tramo donde se registra un

cambio abrupto de la viscosidad conforme incrementa el contenido de sólidos, se ha trazado una segunda recta vertical a los 7.56 % v/v. En base a este criterio, se ha catalogado a las suspensiones en: diluidas, moderadamente concentradas y altamente concentradas. Tomando en cuenta todos los requerimientos que debe cumplir el fluido de perforación, se estima que la formulación adecuada oscila entre el 5.07 % v/v y el 7.56% v/v de sólidos.

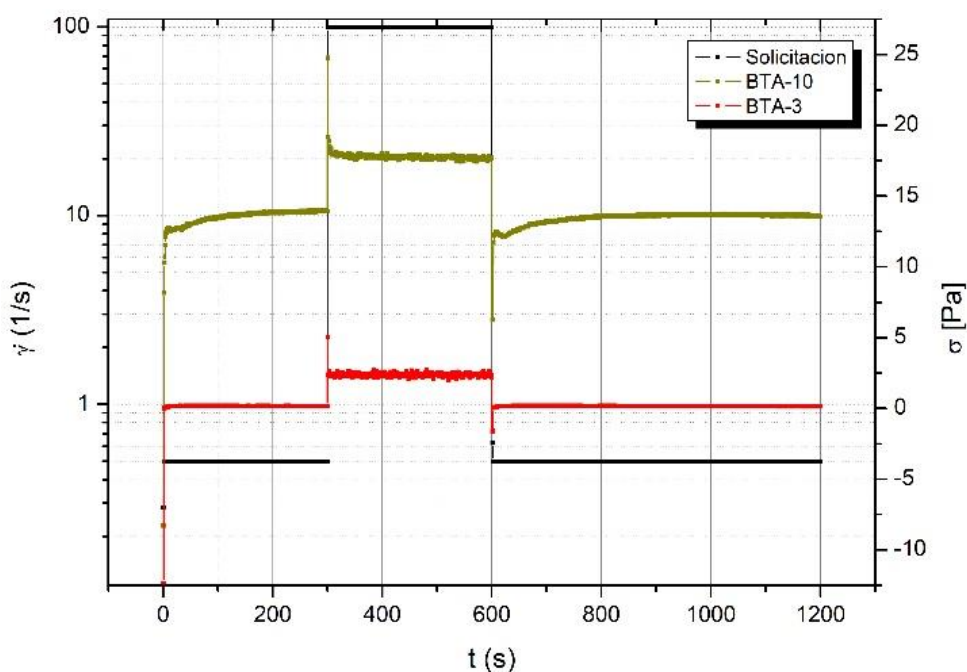


**Figura 43** Variación de la viscosidad vs. % v/v de sólidos

El poder espesante de un material, depende de la forma de su partícula. Las bentonitas tienen sus partículas en forma de plaquetas o discos. El poder espesante sigue un orden descendente: fibras, discos, cubos, esferas, cuando se agregan a una fase continua (Barnes, 2000). De esta manera no resulta adecuado ajustar las curvas de viscosidad obtenidas, al modelo de Krieger Dougherty, el cual contempla que las partículas son esféricas. Por lo tanto, en el campo de los fluidos de perforación, las bentonitas sódicas al tener un alto poder espesante, conviene que sean formuladas a bajas concentraciones. Para suspensiones de bentonita, la viscosidad mantiene un crecimiento exponencial conforme incrementa la concentración de sólidos.

#### 4.5.4 Tixotropía

La tixotropía es un comportamiento no-Newtoniano, dependiente del tiempo, en el cual la viscosidad aparente disminuye con el tiempo bajo una cizalla constante y tiene una recuperación gradual cuando la cizalla es removida. El proceso es completamente reversible. Un material que toma mayor tiempo en la construcción de su estructura es más tixotrópico (Galindo-Rosales & Rubio-Hernández, 2006).



**Figura 44** Comportamientos tixotrópicos de extremo (BTA-3 y BTA-10)

Para un estudio cuantitativo de la tixotropía, se ha recurrido a pruebas de saltos de escalón a una velocidad de deformación constante de 0.5 1/s para la etapa de equilibrio, 100 1/s para la etapa de destrucción estructural, ambas etapas con un tiempo de 300s cada una y 0.5 1/s para la etapa de construcción estructural, por un tiempo de 600s. Con el objetivo de obtener cambios de mayor orden de magnitud, la prueba se ha llevado a cabo solo a la muestra BTA-3 y BTA-10 (ver figura 44).

En el capítulo 4, se expuso los métodos para cuantificar la tixotropía. A menudo el método M4 es el más utilizado por los investigadores. Para el método M4, se trabaja en la etapa de construcción, se define un tiempo previamente, y se calcula el porcentaje de construcción estructural en referencia al valor de viscosidad inicial. De acuerdo a

la tabla 9, se ha calculado el porcentaje de construcción estructural a distintos tiempos, para la muestra BTA-3 y la BAT-10 (Ver Anexo C).

**Tabla 9**

Cuantificación de la tixotropía, método M4

Porcentaje de Construcción Estructural				
Valor de viscosidad	BTA-10		BTA-3	
	$\eta$ (Pa s)	%	$\eta$ (Pa s)	%
Inicial	27,897	100,000	0,341	100,000
Despues de t=100s	26,376	94,548	0,336	98,618
Despues de t=200s	27,156	97,346	0,340	99,863
Despues de t=300s	27,451	98,402	0,341	100,000

De lo cual se observa que, para la muestra BTA-3, los porcentajes de construcción son más rápidos, e incluso llega al 100% de su viscosidad inicial. Siendo así la suspensión menos tixotrópica, ya que el tiempo de construcción estructural es más rápido. Para la muestra BTA-10, se observa que los porcentajes de construcción estructural son inferiores en comparación con la BTA-10, e incluso ninguno alcanza el 100% de su viscosidad inicial. Siendo así, la suspensión más tixotrópica, ya que su tiempo de construcción es más lento.

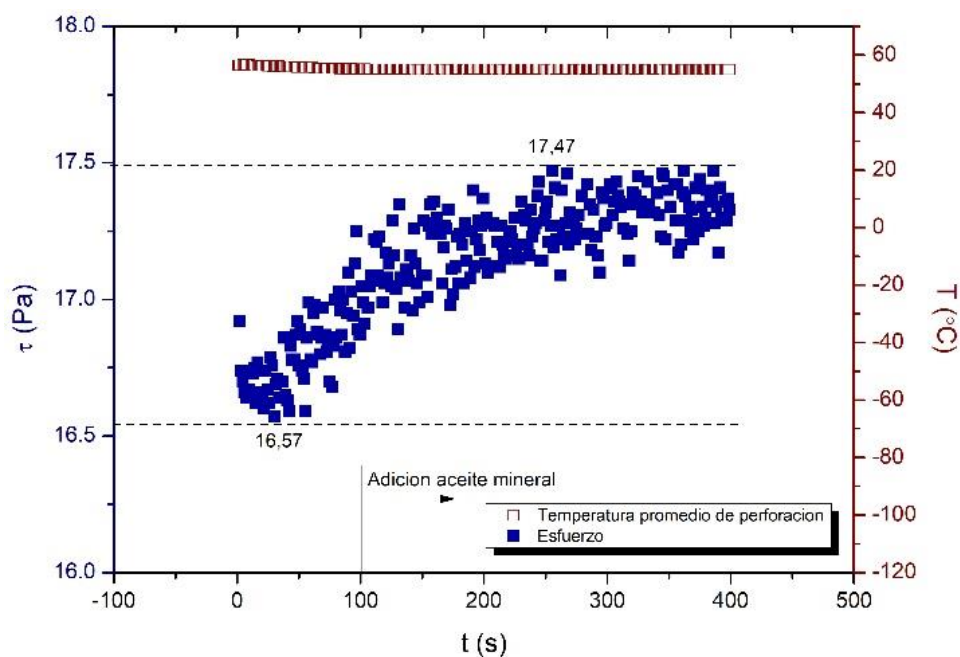
## 4.5.5 Temperatura de perforación

### 4.5.5.1 Influencia del aceite mineral en la suspensión

Para el estudio de la tixotropía bajo la influencia de la temperatura de perforación, se ha tomado solo la muestra BTA-10, ya que presenta cambios de mayor orden de magnitud de su viscosidad. La temperatura de perforación ha sido estimada considerando el gradiente geotérmico de 30°C/km, para una longitud de profundidad de 1Km y una temperatura de superficie de 25°C, siendo así una temperatura de perforación de 55°C.

Debido a que la muestra BTA-10, estará sometida a la temperatura de perforación de 55°C, es necesario evitar la evaporación del agua, como medio continuo de la suspensión. Para ello, se decidió aplicar una fina capa de aceite mineral sobre la suspensión, una vez depositado los 25g de la muestra en el cilindro estator.

Previamente se ha verificado que el aceite mineral no influya en la viscosidad de la suspensión, ni se mezcle, producto de la rotación de la geometría de medición. El procedimiento de verificación consistió en aplicar una velocidad de deformación de 100 1/s por un tiempo de 400s, y a una temperatura constante de 55°C. A los 100s se añadió con una pipeta el aceite mineral sobre la suspensión, procurando distribuir de forma homogénea el aceite, para la formación de la capa protectora. Los resultados demuestran que existe un mínimo incremento del 2.76% en la viscosidad de la suspensión (ver figura 45). Lo cual se podría considerar despreciable en el proceso de medición.



**Figura 45** Influencia del aceite mineral en la suspensión

Es importante recordar, que, si no se añade la capa de aceite mineral, se producirá una rápida evaporación del agua, lo cual no es deseable en la experimentación, ya que no se observará el verdadero comportamiento tixotrópico de la suspensión y además se producirá una separación de fases. En la realidad, los fluidos de perforación, requieren aditivos como la ceniza de carbón, el cual es un excelente estabilizante en la mejora de las propiedades reológicas, incluyendo la resistencia a la temperatura (Meng et al., 2012).



#### 4.5.5.2 Influencia de la temperatura en la tixotropía

De acuerdo a la figura 46, la cual muestra el comportamiento tixotrópico en la etapa de construcción estructural para la muestra BTA-10, sometida a temperatura ambiente y a temperatura de perforación, respectivamente. Los resultados demuestran que un fluido de perforación basado exclusivamente en agua y bentonita sódica, sometido a temperaturas de perforación, aumenta de forma considerable su tixotropía siendo perjudicial para el proceso ya que no desempeñaría ciertas funciones requeridas, como la formación instantánea del cake en las paredes del pozo. Como se observa en la figura 8, se alcanza momentáneamente el valor del esfuerzo estacionario de 18.10 Pa, no obstante, la suspensión sufre un decremento abrupto y posterior tiende a recuperarse, para lo cual no se asegura que alcance el valor de esfuerzo estacionario, después de un largo tiempo transcurrido. Este comportamiento se podría atribuir a que el material sufre un deterioro por el calor recibido, perdiendo así sus propiedades reológicas que lo caracterizan como fluido de perforación.

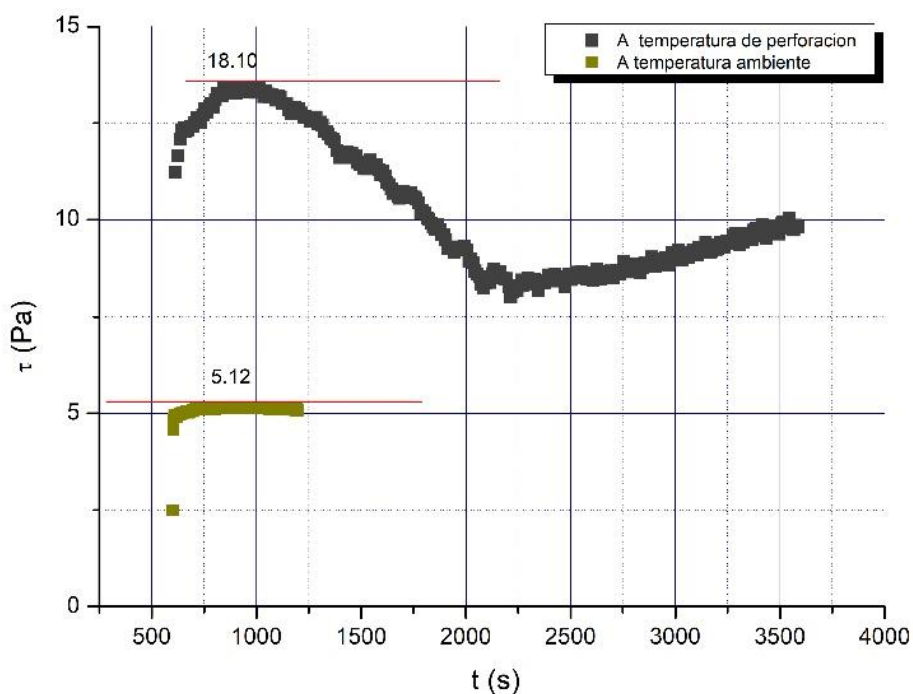


Figura 46 Influencia de la temperatura en la tixotropía (BTA-10)

#### 4.5.6 Viscoelasticidad

Para el análisis de la viscoelasticidad, se ha recurrido a pruebas oscilatorias, ya que tiene como ventaja cuantificar el módulo elástico, módulo viscoso y ángulo de fase que caracterizan a un material. El modo de prueba oscilatorio también se lo conoce como análisis mecánico dinámico DMA (Mezger, 2014).

#### 4.5.6.1 Tiempo de reposo máximo

Antes de iniciar con el barrido de amplitud, es necesario primero estimar el tiempo de reposo para que se produzca la construcción estructural máxima. Para ello, se recurre a saltos de escalón a una velocidad de deformación de 100 1/s con tiempo de reposo en aumento progresivo de 30s, 60s, y 100s. Donde se registre el esfuerzo máximo, se toma el tiempo de reposo previo. Para este caso, el esfuerzo máximo, se registra a los 100s de tiempo de reposo (ver figura 47).

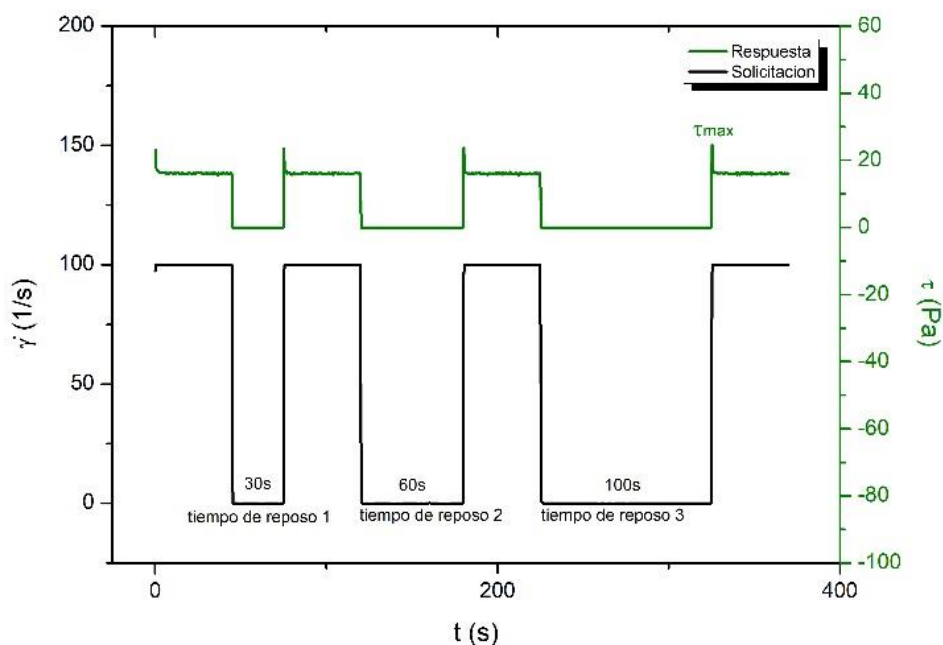
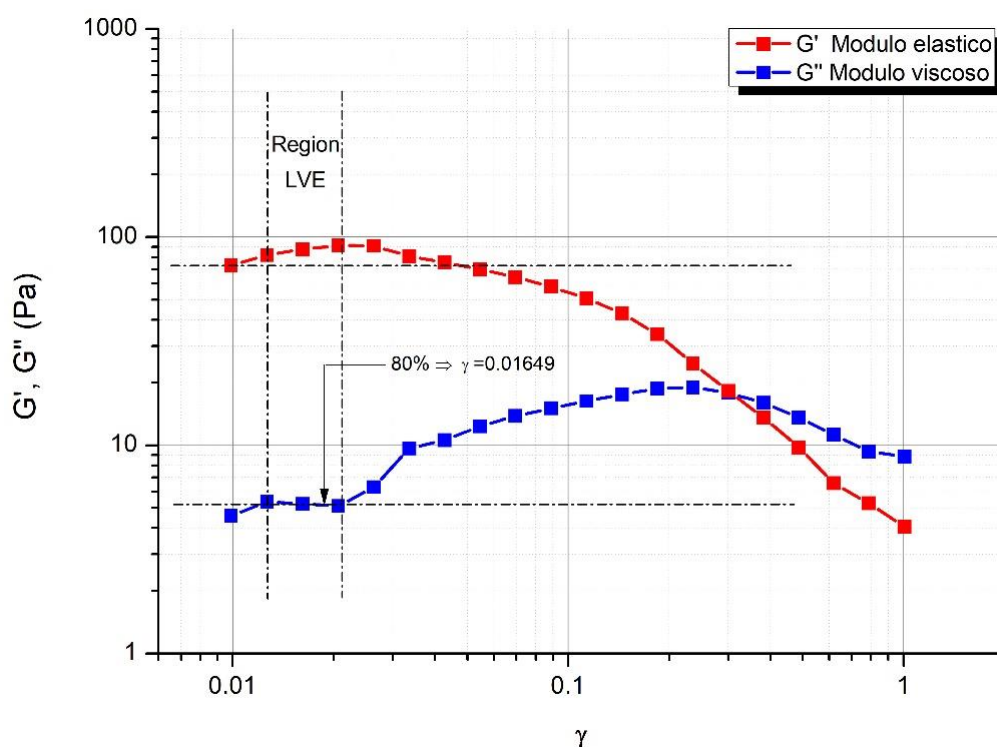


Figura 47 Tiempo de reposo máximo

#### 4.5.6.2 Barrido de amplitud

Una vez obtenido el tiempo de reposo para alcanzar la máxima estructuración, se procede a ejecutar barridos de amplitud para frecuencias de 0.1 Hz, 1 Hz y 10 Hz, respectivamente, con el objetivo de determinar el régimen lineal viscoelástico en

común para las 3 frecuencias. El barrido de amplitud para cada frecuencia, se realizó con una deformación mínima de 0.01 y máxima de 1, en escala logarítmica, con 20 puntos de medición de subida y con un tiempo reposo estimado de 100s. De acuerdo a la figura 48, se ha limitado el régimen lineal viscoelástico, tanto para el módulo elástico, como para el módulo viscoso. De esta manera el comportamiento viscoelástico no dependerá de la deformación, sino simplemente del material. Es importante, destacar que en las mediciones oscilatorias para analizar la viscoelasticidad, se procura no romper la estructura del material. Para estimar la deformación dentro del régimen viscoelástico lineal, se ha considerado el 80% del valor de deformación de 0.02062, que es el límite de la región lineal.



**Figura 48** Barrido de amplitud, régimen LVE

### 4.5.6.3 Barrido de frecuencias

Cuando ya se ha estimado la deformación dentro del régimen lineal, se procede a ejecutar barridos de frecuencias, desde 0.1 Hz hasta 10 Hz, con 20 puntos de medición de subida, una deformación de 0.01649, escala logarítmica, y un tiempo de reposo de 100s. De acuerdo a la figura 49, se evidencia que la suspensión de bentonita es un gel

fuerte, capaz de mantener en suspensión las partículas, debido a que el  $G'$  es mucho mayor en orden de magnitud que el  $G''$  en todo el rango de frecuencias.

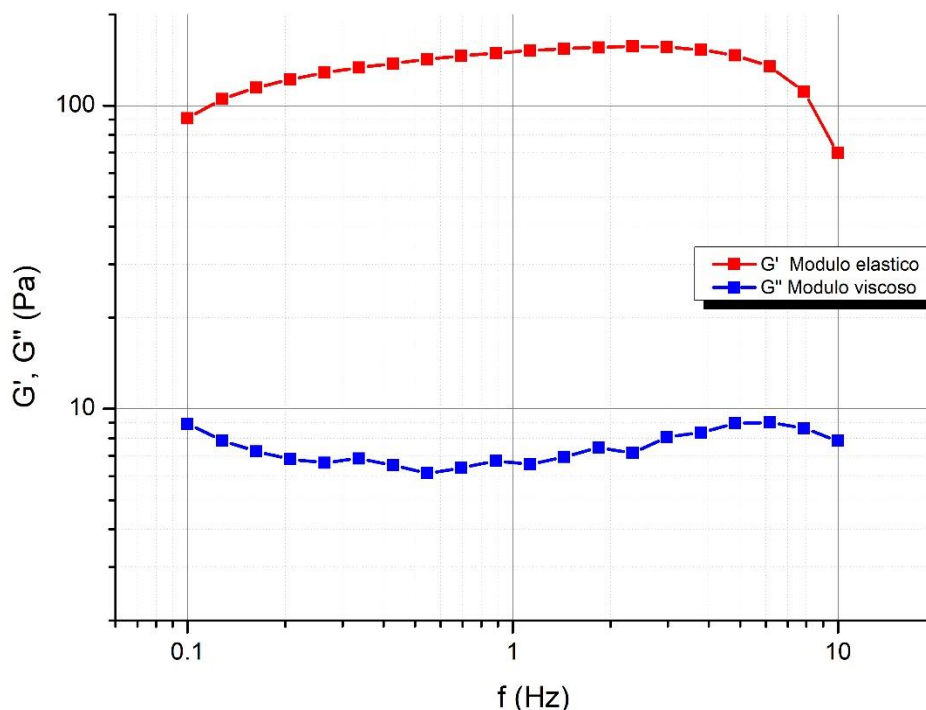


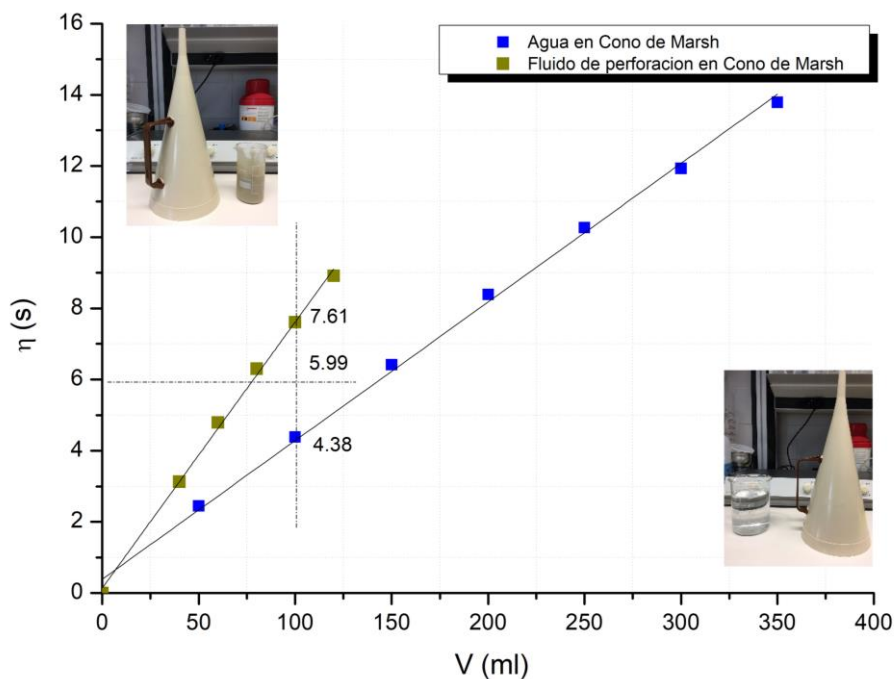
Figura 49 Barrido de frecuencias

#### 4.5.6.4 Variación de la viscosidad (Cono de Marsh)

Mediante el uso del cono de Marsh (ver Anexo G), se ha determinado la variación de la viscosidad en términos del tiempo, tanto para el agua como para la muestra BTA-10. De acuerdo a la figura 50, se evidencia que conforme incrementa el contenido de sólidos en el agua, la variación de la viscosidad aumenta a mayor pendiente. Tomando como referencia los comportamientos de extremo de viscosidad registrados, es posible formular una ecuación que inicie desde el origen (0; 0) hasta la coordenada (100; 5.99). La ecuación característica es  $\eta = 0.059 \cdot V$  y relaciona la viscosidad con el volumen del fluido.

La ecuación mencionada, describirá el crecimiento de la viscosidad en términos del tiempo, para suspensiones moderadamente concentradas. La ventaja de haber implantado esta metodología, es que se puede trabajar en el proceso, con menores volúmenes de fluido, en menores tiempos para llevar a cabo el control de calidad. Cabe destacar que el cono utilizado en este trabajo es el dispositivo estandarizado por la

norma API 13B-1, no obstante, es posible trabajar con dispositivos no estandarizados, estableciendo nuevos tiempos de referencia.



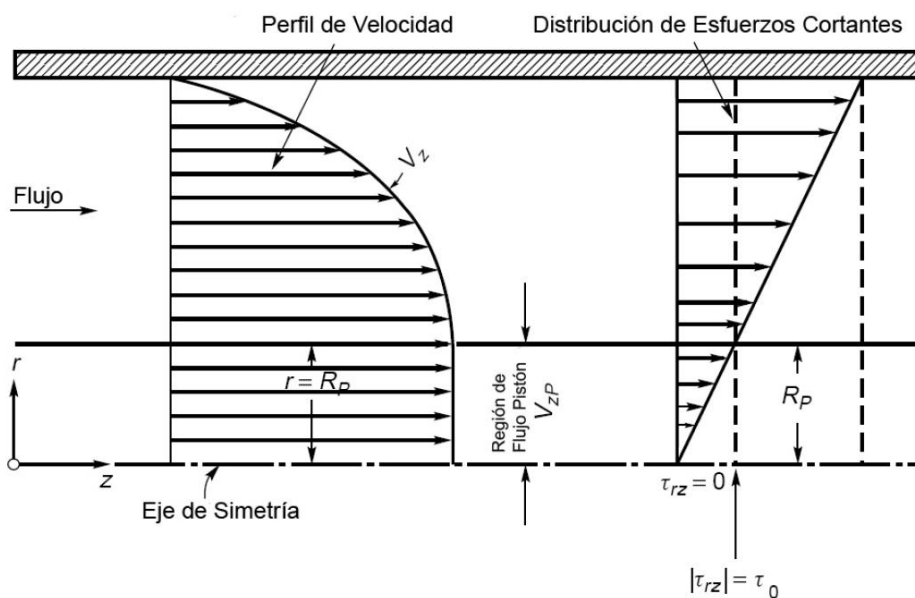
**Figura 50** Variación de la viscosidad en términos del tiempo (cono de Marsh)

#### 4.6 Delineamiento de aplicación

Con la premisa de que el fluido en estudio, es viscoplástico y shear thinning a la vez, se tendrá en cuenta que su comportamiento será parcialmente como un sólido en el eje central y fluido en las cercanías a las paredes de la tubería de perforación, cuando es bombeado. De acuerdo a la figura 51, se observa el respectivo perfil de velocidad formado por el fluido shear thinning con esfuerzo de fluencia.

Para el cálculo de una bomba se trabaja con el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica, parámetros reológicos que fueron obtenidos del ajuste al modelo de Bingham. El radio  $R_p$  hace referencia al comportamiento sólido del fluido. Por lo tanto, es evidente que el  $R_p$  debe ser lo menor posible, para que todo el lodo de perforación bombeado adquiera un comportamiento fluido. Esto es beneficioso para el proceso de bombeo, ya que caso contrario se requiere una bomba de elevada potencia, para vencer

en su totalidad el esfuerzo de fluencia presente y mantener de forma constante el comportamiento fluido.



**Figura 51** Esquema del perfil de velocidad y esfuerzos cortantes de un material viscoplastico en régimen laminar por una tubería cilíndrica.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas y recomendaciones que se han establecido a partir del trabajo realizado. Finalmente, se abordan futuras líneas de investigación a realizar con el material en estudio.

#### **5.1 Conclusiones**

- Mediante el ajuste al modelo de Bingham, se establece que el esfuerzo de fluencia incrementa con el aumento de la concentración de bentonita en la suspensión, lo cual no es favorable en el proceso de perforación, ya que se necesitaría utilizar bombas de mayor potencia, para vencer el esfuerzo de fluencia inicial presente en el fluido.
- La variación de la tixotropía se cuantificó mediante saltos de escalón, estableciendo así, que conforme incrementa el contenido de sólidos en la suspensión, su tixotropía aumenta. En el caso de los fluidos de perforación, se requiere que el fluido sea lo menos tixotrópico posible.
- Cuando la muestra BTA-10 fue sometida a una temperatura de perforación de 55°C, se evidenció que la tixotropía en términos del tiempo de construcción estructural tuvo un incremento pronunciado, alcanzando momentáneamente el valor de esfuerzo estacionario, seguido de un decrecimiento prolongado del esfuerzo de corte, para finalmente tener un leve incremento, sin embargo, no se garantiza que después de un largo periodo de tiempo, el fluido alcance el estado estacionario. De esta forma se presume, que el fluido sufre un desgaste por el exceso de calor recibido, quedando obsoleto a nivel funcional.
- Una vez cuantificado el módulo elástico y el módulo viscoso en el régimen lineal, se evidencia que el módulo elástico es mayor en orden de magnitud al módulo viscoso, por tanto, en el campo de la viscoelasticidad, se establece que las suspensiones de bentonita se muestran como un gel fuerte, que permiten la suspensión de sólidos, siendo muy beneficioso para el proceso de perforación, ya

que cumple uno de los requisitos más fundamentales, que es mantener en suspensión el detritus.

- Debido a que la bentonita sódica en estudio, muestra un alto poder espesante, es necesario formular lodos perforación, con baja concentración de sólidos. Cabe destacar que conforme incrementa la concentración de bentonita, el nivel del pH tiende a disminuir hacia niveles ácidos, siendo un motivo adicional para no formular suspensiones con alta concentración de bentonita sódica. Los fluidos de perforación mantienen su desempeño a pH básico.
- Como se ha evidenciado en varias pruebas de saltos de escalón, la tixotropía aumenta conforme incrementa la concentración de sólidos, no obstante, esta propiedad alcanzará a un valor máximo, donde ya no incrementará, por más contenido de sólidos que se adicione. Derivando una posible investigación a futuro, para validar el efecto supuesto.

## **5.2 Recomendaciones y trabajos futuros**

- Para determinar la viscoelasticidad de un material, se recomienda trabajar en el régimen lineal, ya que, dentro de este intervalo, el módulo elástico y el módulo viscoso son características propias del material y también independientes de la deformación aplicada.
- Para la experimentación reológica con suspensiones de bentonita, se recomienda preparar las muestras como máximo un día antes, para tener una comparativa válida de resultados.
- Cuando se trabaje con suspensiones de bentonita a elevadas temperaturas, es necesario cambiar las muestras en cada repetición experimental, ya que se deterioran irreversiblemente por el calor recibido. Además, es necesario recurrir a un mecanismo que evite la evaporación del agua, como una fina capa de aceite mineral sobre la suspensión, procurando que no se mezclen.
- A futuro se recomienda realizar estudios reológicos a la bentonita sódica peruana en combinación con aditivos naturales que mantengan estables las propiedades reológicas y resistencia a la temperatura.



## REFERENCIAS

- Abu-Jdayil, B. (2011). Rheology of sodium and calcium bentonite-water dispersions: Effect of electrolytes and aging time. *International Journal of Mineral Processing*, 98(3–4), 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.01.001>
- Abu-Jdayil, B., & Ghannam, M. (2014). The Modification of Rheological Properties of Sodium Bentonite-water Dispersions with Low Viscosity CMC Polymer Effect. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(10), 1037–1048. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.551260>
- Akther, S., Hwang, J., & Lee, H. (2008). Sedimentation characteristics of two commercial bentonites in aqueous suspensions. *Clay Minerals*, 43, 449–457. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.3.09>
- Ancey, C. (2005). *Introduction to Fluid Rheology* (4ta ed.). CH-1015 Lausanne.
- Balmaseda, J. R., & Bello, J. A. P. (2014). Caraterización y estudio reológico de una bentonita colombiana. *Boletín de La Sociedad Espanola de Ceramica Y Vidrio*, 53(2), 337–344. <https://doi.org/10.3989/cyv.42014>
- Barnes, H. A. (1989). *An introduction to Rheology*. Elsevier.
- Barnes, H. A. (2000). *A Handbook of Elementary Rheology*. University of Wales.
- Bekkour, K., Leyama, M., Benchabane, A., & Scrivener, O. (2005). Time-dependent rheological behavior of bentonite suspensions: An experimental study. *Journal of Rheology*, 49(6), 1329. <https://doi.org/10.1122/1.2079267>
- Benchabane, A., & Bekkour, K. (2006). Effects of anionic additives on the rheological behavior of aqueous calcium montmorillonite suspensions. *Rheologica Acta*, 45(4), 425–434. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0063-1>
- Benna, M., Kbir-Arighuib, N., Magnin, A., & Bergaya, F. (1999). Effect of pH on Rheological Properties of Purified Sodium Bentonite Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 218(2), 442–455. <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6420>
- Benyounes, K., Mellak, A., & Benchabane, A. (2010). The Effect of

Carboxymethylcellulose and Xanthan on the Rheology of Bentonite Suspensions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(17), 1634–1643. <https://doi.org/10.1080/15567030902842244>

Bohlin-Instruments. (1994). *A Basic Introduction to Rheology*.

Coussot, P. (2004). Rheological behavior of drilling muds, characterization using MRI visualization : Solid/liquid dispersions in drilling and production = Rheological behavior of drilling muds, characterization using MRI visualization. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(1), 23–29. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004003>

Dolz, M., Jiménez, J., Hernández, M. J., Delegido, J., & Casanovas, A. (2007). Flow and thixotropy of non-contaminating oil drilling fluids formulated with bentonite and sodium carboxymethyl cellulose. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 57(3–4), 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.10.008>

Fox, R. W. (2006). *Introducción a la mecánica de fluidos* (6ta ed.). McGraw-hill.

Franck, A. (2004). Understanding rheology of structured fluids. *Book of TA Instruments*, 1–11. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Understanding+Rheology+of+Structured+Fluids#2%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Understanding+rheology+of+structured+fluids#2>

Galindo-Rosales, F. J., & Rubio-Hernández, F. J. (2006). Structural breakdown and build-up in bentonite dispersions. *Applied Clay Science*, 33(2), 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.03.011>

García-Romero, E. (2012). *Bentonitas del Sureste de la Península Ibérica*.

Günister, E., Işçi, S., Öztekin, N., Erim, F. B., Ece, Ö. I., & Güngör, N. (2006). Effect of cationic surfactant adsorption on the rheological and surface properties of bentonite dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 303(1), 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.07.021>

Halliburton. (2013). Halliburton Baroid. Retrieved from [www.halliburton.com/baroid](http://www.halliburton.com/baroid)

Irgens, F. (2014). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Norway: Springer.

Jachnik, R. (2005). Drilling Fluid Thixotropy & Relevance, 13, 121–126.

- Kelessidis, V. C., Poulakakis, E., & Chatzistamou, V. (2011). Use of Carbopol 980 and carboxymethyl cellulose polymers as rheology modifiers of sodium-bentonite water dispersions. *Applied Clay Science*, 54(1), 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.013>
- Kelessidis, V. C., Tsamantaki, C., & Dalamarinis, P. (2007). Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions. *Applied Clay Science*, 38(1–2), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.01.011>
- Kumaran, V. (2010). Fundamentals of Rheology. In *Fundamentals of Rheology* (p. 32). Springer.
- Lan & Lee. (2013). Cómo Optimizar el Arte de la Pesca. *Oilfield Review Schlumberger*, 12.
- Larson, R. G. (1999). *The Structure and Rheology of Complex Fluids*. Oxford University Press.
- Li, M. C., Wu, Q., Song, K., Qing, Y., & Wu, Y. (2015). Cellulose nanoparticles as modifiers for rheology and fluid loss in bentonite water-based fluids. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(8), 5009–5016. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b00498>
- Luckham, P. F., & Rossi, S. (1999). Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82(1), 43–92. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(99\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(99)00005-6)
- Mahto, V., & Sharma, V. P. (2004). Rheological study of a water based oil well drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 45(1–2), 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2004.03.008>
- Meng, X., Zhang, Y., Zhou, F., & Chu, P. K. (2012). Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 100, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.11.011>
- Mezger, T. G. (2014). *The Rheology Handbook* (4ta ed.). Vincentz Network.
- Miliarium. (2004). Lodos de Perforación. Retrieved from <http://www.miliarium.com/proyectos/estudioshidrogeologicos/anejos/metodosp>

erforacion/lodos\_perforacion.asp

- Minpul. (2016). *Ficha Técnica - Bentonita Sódica*.
- Noguera. (2009). Floculación y Dispersión de las Arcillas. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/5712>
- Paineau, E., Michot, L. J., Bihannic, I., & Baravian, C. (2011). Aqueous suspensions of natural swelling clay minerals. 2. Rheological characterization. *Langmuir*, 27(12), 7806–7819. <https://doi.org/10.1021/la2001267>
- Ramsey, M. (2016). Schlumberger Oilfield Glossary. Retrieved from <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/montmorillonite.aspx>
- Rheology-School. (2013). Examples of Rheology Testing Techniques. Retrieved from <http://www.rheologyschool.com/testing/testing-examples>
- RheoTec, M. (n.d.). *Introduction to Rheology*. Ottendorf-Okrilla.
- Rubio-Hernández, F. J., & Velázquez-Navarro, J. F. (2007). Thixotropic Characterization of Fresh Cement Pastes. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 15.
- Schoesser, A. B., & Bochum, R. (2015). Marsh Funnel testing for rheology analysis of bentonite slurries for Slurry Shields. *ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly*, (July).
- Schramm, G. (2004). *A Practical Approach to Rheology and Reometry* (2nd ed.). Thermo Electron.
- Somwangthanaroj, A. (2010). *Rheology and Polymer Characterization*. Retrieved from <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~sanongn1/course.html>
- Tehrani, A. (2008). Thixotropy in Water-Based Drilling Fluids, 16.
- Tenso-Perforación. (2012). *Viscosidad de un Lodo de Bentonita*. Retrieved from [http://www.tensoquimicos.com.mx/TensoPerforacion/pdf\\_boletines/Viscosidad\\_Lodo\\_Bentonita.pdf](http://www.tensoquimicos.com.mx/TensoPerforacion/pdf_boletines/Viscosidad_Lodo_Bentonita.pdf)
- Vader & Wyss. (n.d.). *Introduction to Rheology*.

Yildiz, N., Sarikaya, Y., & Çalimli, A. (1999). The effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-activated Kutahya bentonite. *Applied Clay Science*, 14(5–6), 319–327. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(99\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(99)00006-X)

## Anexo C

### Memoria de Cálculo

#### Para la muestra BTA-3:

$$\%v/v = \frac{v_{Be}}{v_{Be} + v_{agua}} = \frac{[3.0927/0.78]ml}{[(3.0927/0.78) + (100/1)]ml} \times 100\% = 3.81\%$$

#### Para la muestra BTA-10:

- Después de t=100s

$$\%CE = \frac{26.376}{100} * 27.897 = 94.548\%$$

- Después de t=100s

$$\%CE = \frac{27.156}{100} * 27.897 = 97.346\%$$

- Después de t=100s

$$\%CE = \frac{27.451}{100} * 27.897 = 98.402\%$$


## Anexo G



Cono de Marsh – API 13B-1 (Vistas frontal, superior en inferior)



Muestra de bentonita sódica

FICHA TÉCNICA - BENTONITA 

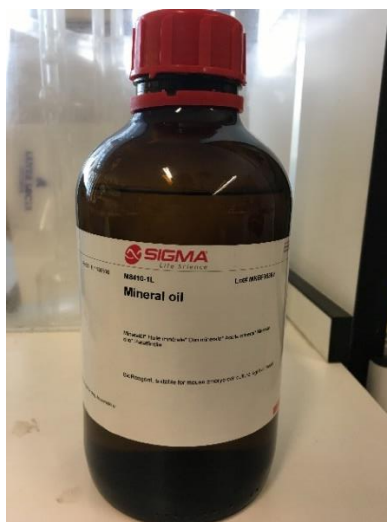
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA ESPE  
Estudio y Caracterización Reológica de Fluidos de Perforación  
basados en agua, bentonita sódica y arcilla natural  
CONT. NETO: 1 LB (0.45 kg)

**minpul**  
**Bentonita Sódica**  
PARA APLICACIONES INDUSTRIALES  
100% NATURAL  
ECOLÓGICO - NO PERECIBLE

PROPIEDADES QUÍMICAS TÍPICAS:	
Silice	62.86%
Alúmina	14.23%
Oxido Ferrico	3.53%
Oxido Sodio	2.80%
Oxido Magnesio	1.61%
Oxido calcio	1.47%
Oxido Potasio	0.33%
Oxido Manganeso	0.02%
Pérdida por calcinación	4.4 0%
Otros	8.79%
PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS:	
Humedad	100% máximo
Peso Específico	2.2 gr / cm <sup>3</sup>
PI	8
Hinchamiento 100ml/2gr	21 ml Mínimo
Contenido Máximo de arena	70% Máximo
Granulometría (malla)	2000 98%
Viscosidad Lectura @600 1/g.m	13
Viscosidad Lectura @ 200 1/g.m	8
Viscosidad Plástica	7 Cp
Resistencia	600 100: 1% mínimo
Filtrado (a 30 minutos)	18 cc

minpul  
C/ta. Alameda Partners 12, 42 | Genalvilla  
Tel: 001 2 422 627 | Fax: 001 2 422 788 | www.minpul.com.ec

Composición química de la bentonita sódica



Aceite mineral SIGMA, M8410-1L



Capa de aceite mineral, encima de la suspensión a temperatura de perforación



Formación de un gel fuerte, después de un tiempo de reposo





Balanza digital



Medidor digital de pH



Agitador magnético