



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Condiciones para la elaboración de salmueras de  
densidad variable, temperatura y presión para la  
terminación de pozos petroleros**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Carlos Alberto Cancino Lagunas

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Marcos Ávalos García



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026**



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CONDICIONES PARA LA ELABORACION DE SALMUERAS DE DENSIDAD VARIABLE, TEMPERATURA Y PRESION PARA LA TERMINACION DE POZOS PETROLEROS, que presenté para obtener el título de INGENIERO PETROLERO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

CARLOS ALBERTO CANCINO LAGUNAS

Número de cuenta: 314027027

## **Agradecimiento especial**

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) de la UNAM, por su financiamiento en el proyecto con clave PE108424, titulado, *“DISEÑO Y MANUFACTURA DE MATERIAL DIDACTICO DE LABORATORIO PARA LA IMPARTICIÓN DE LA CÁTEDRA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN (1439), MEDIANTE MODELOS A ESCALA INSTRUMENTADOS DE POZOS QUE SIMULEN FLUJO E INFLUJO DE FLUIDOS DE CONTROL BASE AGUA, OLEOSA Y NEUMÁTICO”*, a cargo del M.I. Israel Castro Herrera.

## **Agradecimientos**

A toda mi familia, mis padres Alberto y Dominga, a mi Papá santos y mi Mamá Irma, a mis hermanos, Miguel, Daniel e Isabel. A todos ustedes, Gracias por apoyarme durante todo este camino. Sin todos ustedes no habría llegado hasta aquí.

A mis amigos, Jair, Brandon, Toño, el Juan, Hugo, Fernanda, Yolotzin, Leo, Luis, Laura y Javier. A todos, gracias por estar presentes y apoyarme.

Como agradecimiento especial he de mencionar a la Química Rosa de Jesús Álvarez Hernández, que ha sido una gran guía y ejemplo a seguir. Sin su conocimiento y experiencia no habría logrado esta meta.

**A todos los mencionados, ¡Gracias!**

## Tabla de contenido

Objetivo.....	3
Resumen.....	5
1 Antecedentes de los fluidos de terminación.....	6
1.1 Definición de un fluido de terminación. ....	8
1.2 Funciones y propiedades.....	8
1.3 Conceptos petrofísicos que determinan las propiedades que deben cumplir los fluidos de terminación.....	10
1.4 Tipos de fluidos de terminación (salmueras). ....	12
2 Requisitos volumétricos de los fluidos de terminación. ....	20
3 Equipo y metodología.....	23
3.1 Pruebas de laboratorio requeridas para el fluido de terminación. ....	23
3.1.1 Obtención de la densidad mediante el uso de la balanza hidrostática.....	23
3.1.2 Caracterización reológica tixotrópica a través del viscosímetro rotacional. ....	25
3.1.3 Filtro prensa de baja presión.....	28
3.1.4 Filtro prensa de alta presión y temperatura. ....	29
3.1.5 Horno de rolado.....	30
3.1.6 Tiempo de escurrimiento Marsh.....	31
4 Desarrollo experimental del fluido de terminación.....	32
4.1 Materiales empleados.....	32
4.1.1 Agua de mar.....	32
4.1.1.1 Evaluación de la salinidad por el método argentométrico.....	33
4.1.1.2 Obtención de la densidad mediante el empleo de la balanza hidrostática. ....	35
4.1.2 Sal empleada en la elaboración del fluido de terminación.....	35
4.1.2.1 Adición de cloruro de sodio utilizado como densificante... ..	36
4.1.3 Polímero empleado en la elaboración del fluido de terminación.....	38

4.1.4	Aditivos.....	38
4.2	Elaboración del fluido de terminación.....	39
4.3	Resultados y discusión.....	42
4.3.1	Control de las propiedades reológicas tixotrópicas.....	42
4.3.2	Prueba de filtrado a baja presión.....	55
4.3.3	Filtro prensa de alta presión y temperatura.....	59
4.3.4	Horno de rolado.....	60
4.3.5	Tiempo Marsh.....	63
4.3.6	Observaciones.....	63
5	Comparativa reológica.....	64
6	Cálculos previos a la aplicación en simulador instrumentado a escala laboratorio.....	66
6.1	Prototipo de laboratorio.....	67
6.2	Cálculos de volumen de fluido.....	69
7	Aplicación en simulador instrumentado a escala laboratorio.....	70
8	Conclusiones y recomendaciones.....	74
9	Bibliografía.....	77

## **Objetivo**

El presente trabajo es de carácter teórico experimental en el cual se plantea el desarrollo de una salmuera densificada con materiales solubles, sales monovalentes, a emplearse en la terminación de pozos petroleros en intervalos productores y su aplicación en un simulador instrumentado a escala laboratorio.

## **Resumen**

Este trabajo representa una investigación teórico-experimental del desarrollo de un fluido de control polimérico de naturaleza salina.

En este se abarca desde los antecedentes de los fluidos de terminación, hasta la elaboración del fluido de control experimental propuesto. Así mismo se abordan las consideraciones de selección de las salmueras como fluidos de terminación.

En este trabajo desarrolló un fluido de control experimental y su caracterización física y reológica. Además, este trabajo está directamente ligado al proyecto PAPIME PE108424, en el que se un simulador instrumentado de flujo e influjos a escala laboratorio. En dicho simulador se realizaron pruebas de flujo y de interacción entre el fluido de control propuesto y fluidos de trabajo.

## **1 Antecedentes de los fluidos de terminación.**

Los fluidos de terminación son aquellos que se colocan en el pozo para facilitar los procesos previos a la producción, estos fluidos deben ser diseñados para no causar daños a la formación productora y preservar lo más posible sus características petrofísicas.

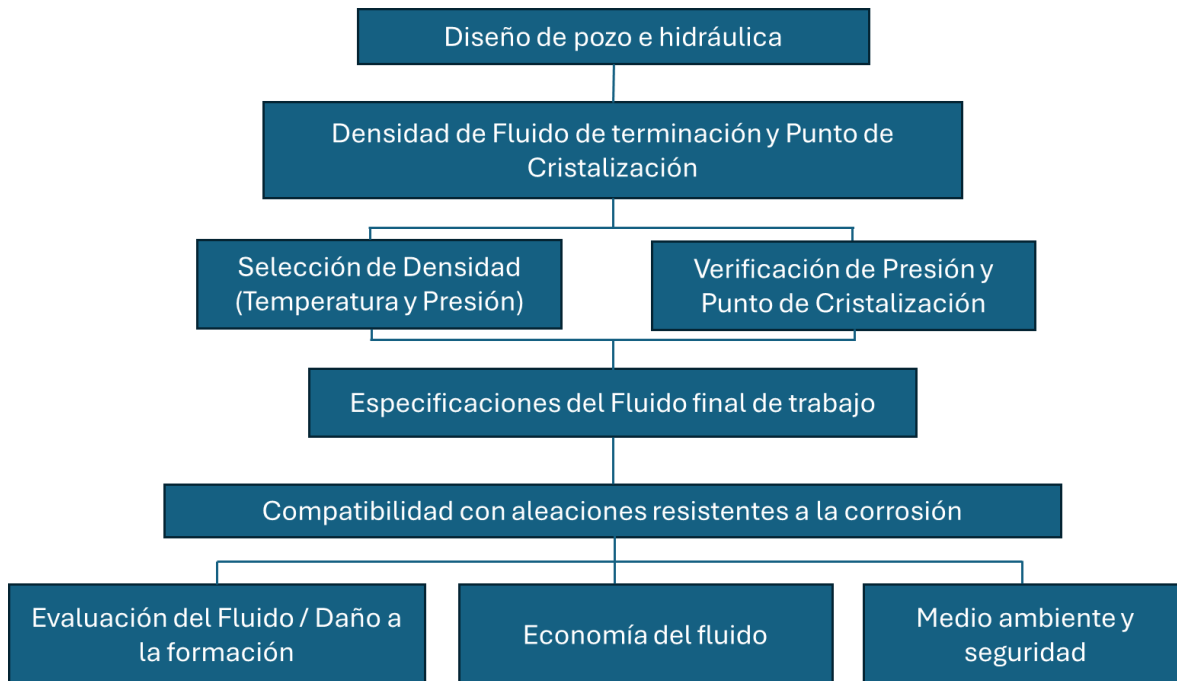
Existen diferentes tipos de operaciones de terminación como lo son la instalación de tuberías de producción, limpieza de la tubería de revestimiento, perforación en el estrato productor, terminaciones de pozo abierto, etc. Una de las principales funciones del fluido de terminación es el control de geopresiones a través de la presión hidrostática ejercida por la columna del fluido sobre el estrato productor.

Los fluidos de terminación más comunes son las salmueras debido a la baja presencia de partículas sólidas, lo que evita obstrucción de poros y fracturas presentes en el estrato productor, preservando las propiedades petrofísicas como la permeabilidad y la porosidad.

El proceso de planificación del diseño de pozo se puede organizar de tal manera que nos ayude a utilizar piezas básicas de información en el desarrollo de un plan de proyecto coherente, abarcando todos los aspectos de la selección del fluido de salmuera, los aditivos y el equipo asociado. Habrá circunstancias que no sean convencionales o rutinarias. Estos se pueden ver de manera condensada en la ilustración 1.



Ilustración 1 Proceso de selección de un fluido de terminación.



Los pasos del proceso de planificación nos permiten una organización de trabajo como la siguiente:

- I. Determinar la densidad de fluido adecuada utilizando la profundidad vertical real (TVD, *True Vertical Deep*), la presión de fondo de pozo (BHP, *Bottom Hole Pressure*) y la temperatura de fondo de pozo (BHT, *Bottom Hole Pressure*).
- II. Seleccionar la temperatura de cristalización de la salmuera.
- III. Estimar el volumen de fluido de salmuera requerido.
- IV. Seleccionar la familia de fluidos de salmuera adecuado en función de los requerimientos de la formación.
- V. Cuando existan problemas de compatibilidad, corrosión o formaciones sensibles, se debe seleccionar un sistema de fluidos compatibles con la misma o un fluido con aditivos que protejan a la formación. (Tetra technologies inc, 2007)

## **1.1 Definición de un fluido de terminación.**

Un fluido de terminación de pozos petroleros es un fluido especializado, libre de sólidos que se utiliza en las etapas finales de la preparación de un pozo para la producción de hidrocarburos. Su función principal es facilitar las operaciones finales como la colocación de empacadores y válvulas de fondo de pozo, sin dañar la formación productora.

Estos fluidos están diseñados para controlar el pozo en caso de fallos en el equipo de fondo. Son químicamente compatibles con la formación y los fluidos presentes en ella. Generalmente, se utilizan salmueras (cloruros, bromuros y formiatos) debido a sus características adecuadas de densidad y compatibilidad. (IADC, 2019)

## **1.2 Funciones y propiedades**

De manera general, las funciones y propiedades que deben cumplir los fluidos de terminación son el evitar el daño a la formación de interés, no deben dañar el equipo utilizado, no deben ser dañinos para el personal y el medio ambiente entre otras. De manera particular los fluidos de terminación deben ser las siguientes características:

- **Transporte de materiales sólidos**

Durante el proceso de ciertas operaciones, como la limpieza de pozo, es necesario que ciertos materiales o impurezas circulen en el pozo, para que esto suceda el fluido debe garantizar un correcto acarreo de estos sólidos.

- **Suspensión de partículas**

Esta propiedad es representada por la fuerza gel generada por el fluido, si esta fuerza es alta significa que tiene una buena capacidad de suspensión al detener la circulación del fluido en el pozo. Es debido a la tixotropía que evita la precipitación de materiales sólidos hacia el fondo del pozo.

- **Control de geopresiones**

Una de las funciones principales del fluido de terminación es el de controlar la presión interna que genera el estrato de interés, mediante la presión hidrostática provocada por la columna del fluido sobre el estrato, evitando problemas como influjos de líquidos o gases hacia superficie.
- **Evitar daños a los intervalos de interés**

Los fluidos de terminación deben ser diseñados para evitar daños a la formación como la depositación de partículas o sedimentos. En general, el fluido debe ser compatible con el sistema roca fluidos, esto permite una mejor producción durante la vida útil del pozo.
- **Evitar daños al equipo**

Los fluidos de terminación deben ser diseñados para evitar la corrosión en los equipos mediante el uso de aditivos anticorrosivos, procurando la vida útil de las herramientas presentes dentro del pozo.
- **Inhibición bacterial**

A pesar de la salinidad y las altas temperaturas que se encuentran en el subsuelo, se ha descubierto que existen bacterias resistentes a entornos extremos. Las bacterias del hierro, bacterias reductoras de azufre y reductoras de sulfato pueden adaptarse a estos ambientes. La presencia de estos microorganismos puede aumentar dramáticamente la corrosión del medio, ya que las bacterias pueden generar  $H_2S$ , tal es el caso de las bacterias sulfato reductoras. La adición de biocidas a los fluidos de control contribuye al manejo de estos problemas bacterianos
- **Cristalización**

Altas concentraciones de diversas sales presentes en el fluido pueden promover la precipitación o cristalización no deseada de sólidos debido a un cambio drástico en la temperatura. La verdadera temperatura de cristalización o TCT por sus siglas en inglés (*True Crystallization Temperature*) es el término utilizado

para identificar el punto de cristalización de sales en un fluido de terminación.

La formación de sólidos aumentará el trabajo requerido por los equipos de bombeo debido a una mayor resistencia al flujo. Además, la formación de sólidos puede provocar atascos en las tuberías. (Tetra technologies inc, 2007)

### **1.3 Conceptos petrofísicos que determinan las propiedades que deben cumplir los fluidos de terminación.**

La petrofísica es una rama de la ingeniería que combina principios de geología, física, matemáticas y ciencias de la tierra para estudiar y analizar las propiedades físicas de los yacimientos. Su objetivo es evaluar la calidad y la cantidad de los recursos.

La caracterización petrofísica se enfoca en entender las propiedades físicas de las rocas y fluidos involucrados en los yacimientos, como la permeabilidad, la porosidad, la densidad o la viscosidad. Esto, en conjunto con diversas propiedades de los fluidos presentes en el yacimiento nos permiten predecir el comportamiento de los fluidos, lo que es fundamental para la exploración, la producción y la optimización de la extracción de recursos en el subsuelo.

- **Porosidad**

Es el espacio que se genera entre los granos presentes en la roca y se encuentra ocupado por algún fluido, es decir, esta propiedad define la capacidad de almacenamiento de un yacimiento.

- **Saturación**

Se le denomina saturación a la fracción de volumen poroso ocupado por cada uno de los fluidos presentes (agua, gas o aceite) en la roca.

- **Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad que tiene la roca para permitir el flujo de fluidos a través de ella por medio de los poros que se encuentran interconectados.

- **Mojabilidad**

Se refiere a la tendencia de adhesión de un fluido sobre una superficie sólida en presencia de otro fluido inmisible, tratando de ocupar el mayor área posible.

- **Presión capilar**

Es la diferencia de presión a través de la interfaz que separa dos fluidos inmiscibles (como aceite y agua) dentro de los poros de la roca

- **Compresibilidad**

Se le conoce como el cambio de volumen que se genera en la roca debido a la presión ejercida por los estratos superiores. Esta tiene un comportamiento que es influenciado por la profundidad de los estratos, la naturaleza de la estructura interna o la consolidación de la roca.

- **Mineralogía**

La mineralogía del yacimiento, especialmente el porcentaje y el tipo de arcillas que conforman la roca, influye en la decisión sobre el tipo y naturaleza de fluido para una formación en particular. Las pruebas de compatibilidad de muestras de núcleos del yacimiento son el medio más confiable para evaluar la respuesta de los minerales arcillosos a una salmuera. También se debe considerar la experiencia en pozos análogos en la selección de la salmuera.

Los fluidos de formación se encuentran en un estado de equilibrio termodinámico con los minerales del yacimiento. Este equilibrio se verá alterado una vez que se comiencen las operaciones requeridas en la formación. Antes de producir el pozo, existirá la posibilidad de que se produzcan daños en la formación como resultado de las reacciones entre los fluidos de formación y los fluidos de perforación o terminación. Se debe evaluar la composición química del agua

congénita para determinar su compatibilidad con el fluido de terminación.

#### **1.4 Tipos de fluidos de terminación (salmueras).**

En la realidad, la planificación de cualquier terminación es un proceso iterativo en función de la adquisición de más información y se afina durante la selección del fluido. Con información básica de diseño, profundidad vertical real, presión de fondo de pozo y consideraciones de temperatura de formación, puede determinarse qué fluidos de salmuera son adecuados para las condiciones de trabajo.

Los sistemas de baja densidad suelen constar de fluidos de una sola sal, cuya densidad puede variar desde ligeramente superior a la del agua, como el cloruro de potasio (KCl), hasta  $1.4 \text{ gr/cm}^3$  con el uso de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Las propiedades únicas de cada formación enfocadas a la compatibilidad de las salmueras convencionales con el agua de formación pueden sugerir el uso de bromuro de sodio (NaBr), bromuro de calcio ( $\text{CaBr}_2$ ), formiato de sodio ( $\text{NaO}_2\text{CH}$ ), formiato de potasio ( $\text{KO}_2\text{CH}$ ) o formiato de cesio ( $\text{CsO}_2\text{CH}$ ).

La tabla 1 enlista las distintas sales utilizadas para fluidos de terminación sin sólidos en suspensión. El uso principal de estas salmueras es controlar las presiones durante el proceso de terminación hasta que la tubería de producción esté en su lugar y el empacador esté colocado. La salmuera también se puede utilizar como fluido empacante en el espacio anular por encima del empacador para controlar la presión en caso de que el sello falle o se libere el empacador para realizar trabajos en el pozo.

Tabla 1 Sales monovalentes y divalentes utilizadas en fluidos de terminación.

	Tipos de sales	
	Sales inorgánicas	Sales orgánicas
Monovalentes	Cloruro de sodio, NaCl	Formiato de sodio, NaCHO <sub>2</sub>
	Bromuro de Sodio, NaBr	Formiato de potasio, KCHO <sub>2</sub>
	Cloruro de potasio, KCl	Formiato de cesio, CeCHO <sub>2</sub>
	Bromuro de potasio, KBr	Acetato de sodio, NaC <sub>2</sub> HO <sub>2</sub>
	Cloruro de amonio, NH <sub>4</sub> Cl	Acetato de potasio, KC <sub>2</sub> HO <sub>2</sub>
		Acetato de cesio, CeC <sub>2</sub> HO <sub>2</sub>
Divalente	Cloruro de calcio, CaCl <sub>2</sub>	
	Bromuro de calcio, CaBr <sub>2</sub>	
	Bromuro de zinc, ZnBr <sub>2</sub>	

Se le denomina monovalente a un compuesto iónico el cual se encuentra en disolución acuosa y presenta una disociación parcial en la que el anión tiene una carga que en valor absoluto es 1, en contraste con los compuestos divalentes cuya carga, en valor absoluto, es 2.

Las condiciones de fondo de pozo son parte del criterio básico de selección para una salmuera de terminación. La densidad requerida del fluido está determinada por la TVD (*True Vertical Deep*) y la BHP (*Bottom Hole Pressure*) estimada, estos valores son necesarios para obtener el gradiente de presión.

En la tabla 2 se puede observar los diferentes rangos de densidad con el que las salmueras pueden ser diseñadas, estos varían en función de que sales se están ocupando y sus combinaciones, una, dos o tres sales. (Tetra technologies inc, 2007)

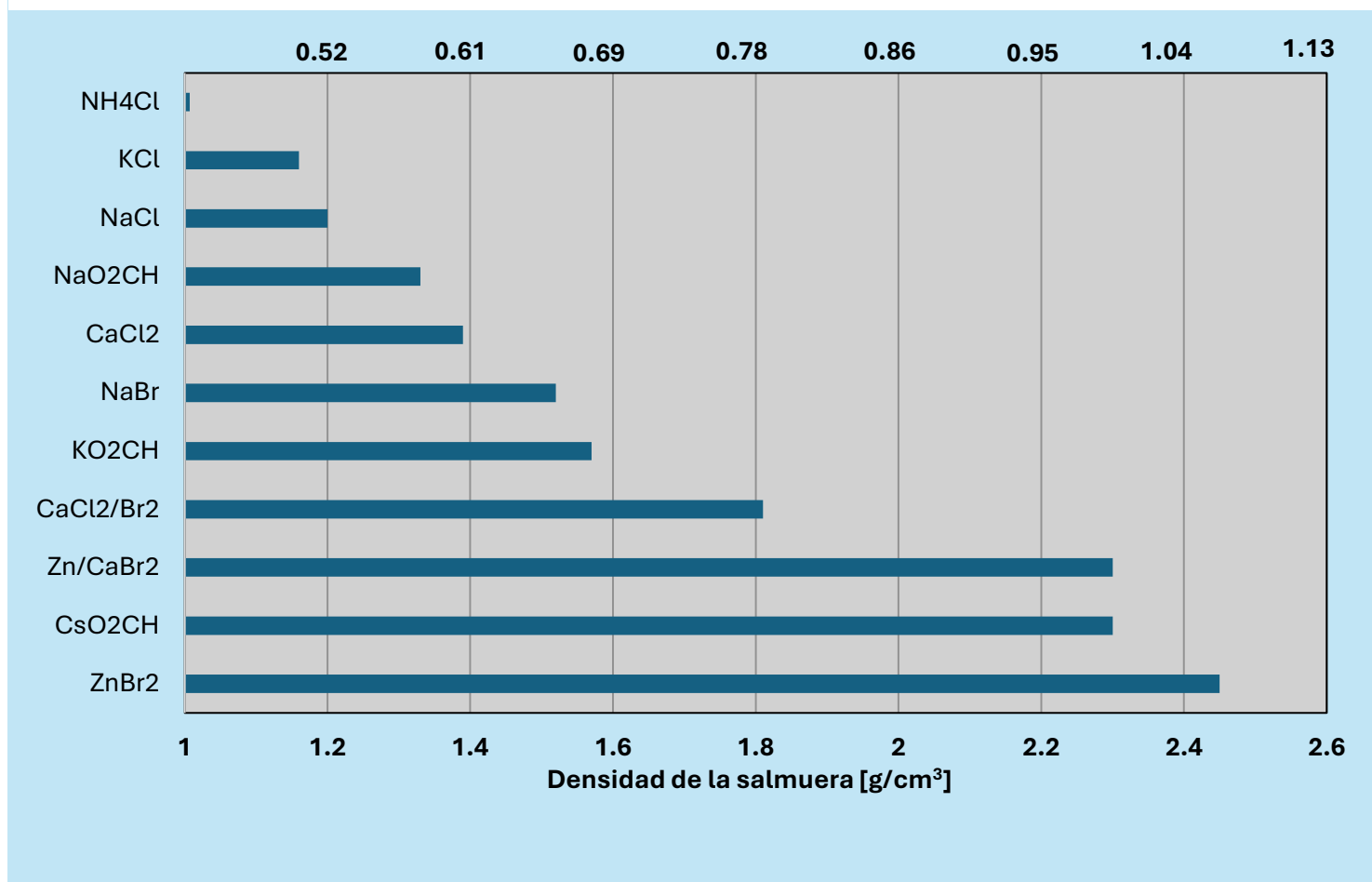
Tabla 2 Rango de densidades de diferentes tipos de salmueras

Salmueras	Rango de densidades gr/cm <sup>3</sup>
Cloruro de Amonio, NH <sub>4</sub> Cl	1.006 – 1.007
Cloruro de Potasio, KCl	1.006 – 1.16
Cloruro de Potasio-Sodio, KCl/NaCl	1.006 – 1.20
Cloruro de Sodio, NaCl	1.006 – 1.20
Formiato de Sodio, NaO <sub>2</sub> CH	1.006 – 1.33
Cloruro de Potasio-Calcio, KCl/CaCl <sub>2</sub>	1.006 – 1.39
Cloruro de Calcio, CaCl <sub>2</sub>	1.006 – 1.39
Bromuro de Sodio, NaBr	1.006 – 1.52
Bromuro-Cloruro de Sodio, NaBr/NaCl	1.006 – 1.52
Formiato de Potasio, KO <sub>2</sub> CH	1.006 – 1.57
Bromuro de Calcio, CaBr <sub>2</sub>	1.006 – 1.81
Cloruro-Bromuro de Calcio, CaCl <sub>2</sub> /CaBr <sub>2</sub>	1.39 – 1.81
Formiato de Potasio-Cesio, KO <sub>2</sub> CH/CsO <sub>2</sub> CH	1.57 – 2.30
Formiato de Cesio, CsO <sub>2</sub> CH	1.57 – 2.30
Bromuro de Zinc, ZnBr <sub>2</sub>	1.82 – 2.45
Bromuro de Zinc-Calcio, ZnBr <sub>2</sub> / CaBr <sub>2</sub>	1.80 – 2.45
Bromuro-Cloruro de Zinc-Calcio, ZnBr <sub>2</sub> / CaBr <sub>2</sub> / CaCl <sub>2</sub>	1.80 – 2.30

La selección de una salmuera sobre otra está fundamentada en las propiedades de la formación, como se puede observar en la tabla 2 y en la gráfica 1, en caso de necesitar un fluido con una densidad alta se recurre al uso de haluros de dos o tres sales como lo son el Bromuro de Zinc o los Formiatos de Cesio.



Gráfica 1 Comparativa gráfica de densidades y gradientes de presión en salmueras



La elección del tipo de salmuera a ocupar depende por completo de las condiciones de la formación, es decir, su naturaleza geológica, o bien, la presión de poro presente. La tabla 3 puede utilizarse como guía sobre los tipos de salmuera que se podrían utilizar frente a otras.

Si un fluido tiene una clara ventaja en una categoría particular sobre otros fluidos en el mismo rango de densidad, se muestra un signo más (+) en esa columna. Un signo igual (=) indica que no hay ninguna ventaja clara sobre los fluidos en el rango de densidad. Finalmente, un signo menos (-) indica que un fluido tiene una desventaja sobre otros fluidos en el rango de densidad particular. Los rangos de densidades son mostrados en la tabla 2 y se encuentran diferenciados por la intensidad del color.

Tabla 3 Comparativa de salmueras

Salmuera	Lutitas / arcillas	Ácido corrosivo	Carbonatos	Sulfatos
Cloruro de amonio (NH <sub>4</sub> Cl)	+	-	+	+
Cloruro de potasio (KCl)	+	=	+	+
Cloruro de Sodio (NaCl)	-	=	+	+
Bromuro de Sodio (NaBr)	-	=	+	+
Formiato de Sodio (NaO <sub>2</sub> CH)	=	+	+	+
Formiato de Potasio (KO <sub>2</sub> CH)	+	+	+	+
Cloruro de Calcio (CaCl <sub>2</sub> )	+	=	-	-
Bromuro de Calcio (CaBr <sub>2</sub> )	+	=	-	-
Formiato de Cesio (CeO <sub>2</sub> CH)	=	+	+	+
Bromuro de Zinc (ZnBr <sub>2</sub> )	+	-	=	+

A continuación, se presenta una breve descripción de las columnas a analizar de la tabla anterior.

- **Dispersión de arcilla y lutitas**

Muchos minerales arcillosos se hinchan y pueden dispersarse cuando se exponen al ion sodio (Na<sup>+</sup>). En general, los fluidos que contienen iones potasio (K<sup>+</sup>) y amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) tienen una tendencia a estabilizar los minerales arcillosos al adsorberse en la estructura de la arcilla. Los iones divalentes, como el calcio (Ca<sup>2+</sup>) y el zinc (Zn<sup>2+</sup>), también se absorben fuertemente en muchos minerales arcillosos y crean un entorno no dañino en las proximidades del pozo.

- **Corrosión**

La corrosión de las superficies metálicas que permanecen en contacto con salmueras se acelera considerablemente por la

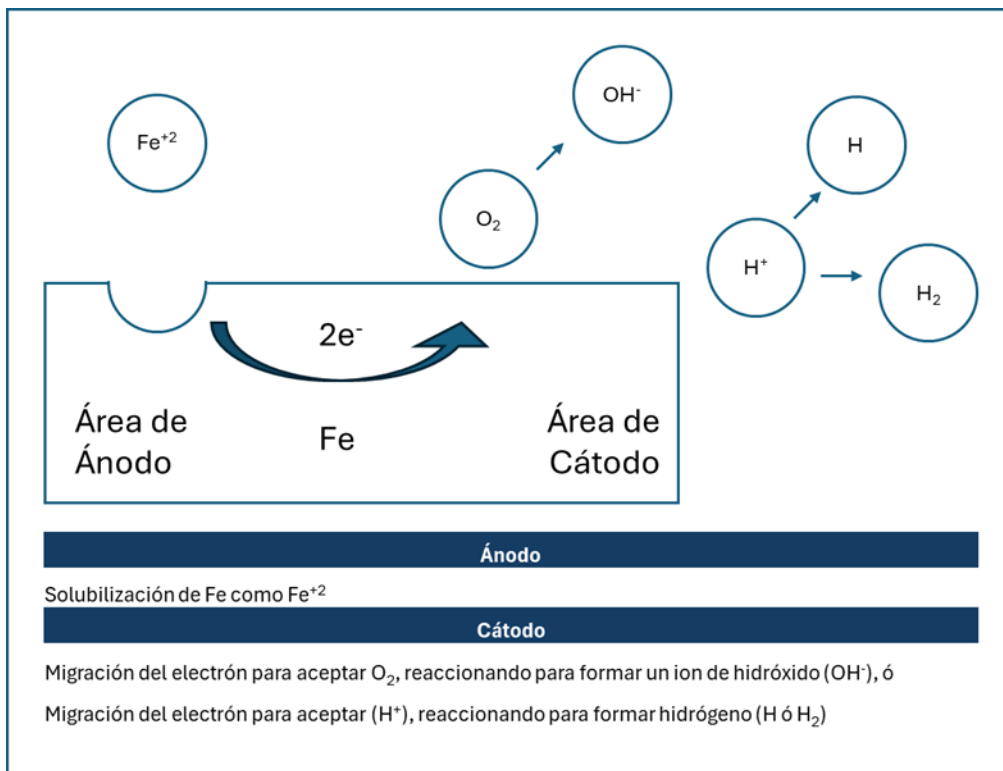
presencia del ion hidrógeno ( $H^+$ ). El ion hidrógeno se puede eliminar esencialmente elevando el pH de una salmuera. El pH de los fluidos que contienen sodio, potasio o calcio se puede elevar a un rango en el que solo estén presentes concentraciones insignificantes de iones hidrógeno.

Las salmueras monovalentes presentan una baja corrosividad, inclusive en condiciones de alta temperatura (200 °C), en comparación con salmueras bivalentes, que su corrosividad dependerá de la densidad de la salmuera requerida y de su composición química.

Inhibir o minimizar la corrosión es extremadamente importante en la planificación de un pozo. Este proceso implica la pérdida de metal, generalmente hierro, hacia el entorno generado por la naturaleza del fluido. Si las condiciones no son oxidantes este hierro disuelto puede permanecer en solución en forma de hierro ferroso, lo que le otorga un tono verde a la salmuera. Sin embargo, en caso de que las condiciones son oxidantes, el hierro disuelto puede oxidarse aún más y convertirse en el ion férrico, que comúnmente formará hidróxido férrico de color marrón rojizo y causará daños en la formación.

En el proceso de corrosión el metal pierde electrones. El lugar donde se produce la pérdida de electrones se denomina ánodo, el lugar donde se aceptan los electrones se denomina cátodo. Estos puntos suelen estar en diferentes lugares del metal y los electrones se desvían a través de él, como se muestra en la ilustración 2.

Ilustración 2 Proceso de corrosión.



Existen diversos factores para que ocurra el fenómeno de corrosión los cuales debemos tener en cuenta para la selección del fluido de terminación. Los principales factores son los siguientes:

- **Temperatura**

La mayoría de las reacciones químicas se producen con mayor velocidad a altas temperaturas. Esto también es cierto para las diversas reacciones involucradas en el proceso de corrosión.

- **Acidez de la salmuera (pH)**

Los fluidos de una sola sal varían de neutros a ligeramente básicos cuando se fabrican. Se los puede tratar para aumentar la alcalinidad y reducir la presencia del ion hidrógeno ( $H^+$ ) que promueve la corrosión con la adición cuidadosa de una base como hidróxido de sodio o cal.

- **Aireado superficial**

El oxígeno derivado del aire es un importante acelerador de la corrosión. La solubilidad del oxígeno en soluciones de sal concentradas es extremadamente baja y se vuelve aún más baja a medida que aumentan las temperaturas de la salmuera. Otras posibles fuentes de oxígeno son las fugas en los sellos de las bombas o los agitadores. Las salmueras más viscosas pueden tener pequeñas burbujas de aire y llevarlas hasta el pozo, con el aumento de la presión, el aire atrapado eventualmente reaccionará con la tubería de revestimiento, la tubería de producción o las herramientas de fondo de pozo.
- **Gases ácidos de formación**

Los gases más comunes en interacciones de formación y fluidos de terminación, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), pueden acelerar la corrosión. Ambos gases son ligeramente ácidos por naturaleza y contribuirán a la acidez de una salmuera.
- **Carbonatos**

Algunos yacimientos carbonatados pueden ser incompatibles con fluidos que contienen el ion calcio. La mezcla de agua de formación y salmueras que contienen calcio puede dar como resultado la precipitación de carbonato de calcio en el punto de contacto entre los dos fluidos. La formación de carbonato de calcio puede dar como resultado una reducción de la permeabilidad, que es difícil de revertir incluso con una fuerte estimulación ácida.

Si el análisis del agua de formación indica altos niveles del ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{+1}$ ), se deben evitar los fluidos que contienen calcio.
- **Sulfatos**

Si el agua de formación contiene el ion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en una concentración de más de 500 ppm, reaccionará con el ion calcio para formar un precipitado que no responderá fácilmente a la estimulación ácida. El análisis del agua de formación proporcionará el único medio confiable para evaluar el potencial de este tipo de daño a la formación.

Otro motivo de preocupación adicional es que el ion sulfato también puede convertirse en  $H_2S$  por acción de bacterias reductoras de sulfato. Si esto llega a pasar, se deberán considerar los problemas de salud y corrosión asociados con este tipo de sustancias. (Tetra technologies inc, 2007)

## **2 Requisitos volumétricos de los fluidos de terminación.**

La capacidad de un tanque de lodo, un pozo, el interior de una tubería o algún otro tanque, es el volumen que podría contener el recipiente si éste estuviera lleno. La capacidad de los tanques y pozos en la industria petrolera es usualmente medida en barriles, galones o metros cúbicos.

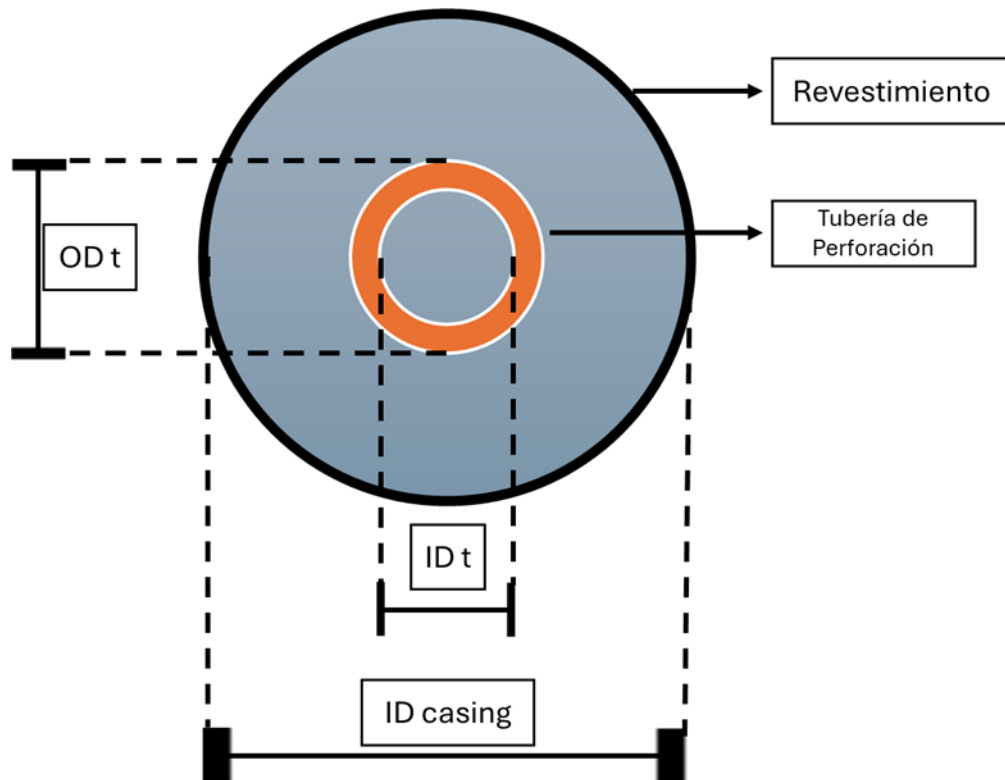
Un registro de cálculo de volumen debe incluir lo siguiente:

- **Volumen circulante**

Para determinar el volumen de salmuera necesaria para llenar el pozo y mantener la presión hidrostática requerida, es necesario sumar los volúmenes de la tubería de revestimiento o del pozo abierto, después, restar el volumen desplazado por la tubería de perforación o la tubería de producción. (IADC, 2015)

La ilustración 3 representa un esquema de los dos componentes del volumen del fondo del pozo, el volumen de la tubería y el volumen anular. La determinación del volumen de fluido requerido se puede hacer más fácil utilizando las capacidades internas de la tubería o la columna de trabajo utilizando las tablas API de capacidad y desplazamiento de las tuberías.

Ilustración 3 Esquema de TP y tubería de revestimiento



Los valores para la tubería combinada más la capacidad anular en barriles por pie se pueden calcular utilizando la ecuación 1. Esta ecuación también se presta para aplicaciones de registros de cálculo para determinar la capacidad volumétrica de la tubería y el espacio anular:

Ecuación 1

$$Can + t = \frac{(ID_{Casing}^2 - OD_t^2 + ID_t^2)}{1029.4}$$

Can+t = Capacidad combinada de tubo y anular, bbl/ft

ID casing = Diámetro interno de revestimiento, in

OD<sub>t</sub> = Diámetro externo de la TP, in

ID<sub>t</sub> = Diámetro interno de la TP, in

1029.4 = Factor de conversión de unidades, in<sup>2</sup> – ft/bbl

(Tetra technologies inc, 2007)

- **Presas**

La capacidad del tanque necesaria para trabajar salmueras suele ser mayor que la requerida para hacer circular un fluido de perforación. Dado que las salmueras se filtran continuamente, se deben contar con presas de almacenamiento, uno para el fluido de retorno que puede llevar sólidos y otro de igual volumen para el fluido filtrado. La presa de almacenamiento también puede estar limitado por las dimensiones del *RIG*.

Debe estar disponible al menos un volumen anular completo en la presa de reserva para permitir que las operaciones de filtración sigan el ritmo de los requisitos de circulación.

- **Tuberías de superficie**

Cualquier requisito inusual para la colocación de equipos puede generar volúmenes adicionales en mangueras, bombas y tuberías. En la práctica, una tolerancia de 10 barriles es una recomendación razonable.

- **Necesidades de contingencia**

Material densificante. El material densificante, es un fluido de alta densidad que se transporta y almacena en el lugar en caso de que sea necesario aumentar la densidad del fluido para controlar la presión. El volumen suele oscilar entre 75 y 150 barriles de una



mezcla de alta densidad seleccionada. El volumen de material densificante que se mantiene en reserva debe basarse en una serie de factores, entre ellos:

- Incertidumbre con respecto a la presión del fondo del pozo.
- Tratamiento de diluciones del fluido de trabajo.
- Espacio de almacenamiento disponible en la ubicación o plataforma.
- Diferencia de densidad entre el fluido de trabajo y el fluido de formación.
- Limitaciones ambientales de descarga/derrames.
- Consideraciones de costo.

(IADC, 2015)

### **3 Equipo y metodología**

#### **3.1 Pruebas de laboratorio requeridas para el fluido de terminación.**

Las diferentes pruebas de laboratorio aplicadas a distintos fluidos utilizados en el proceso de perforación, terminación u otros procesos son necesarias caracterizar adecuadamente estos.

Estas pruebas evalúan densidad, tiempos de escurrimiento, reología, impermeabilidad o comportamiento del fluido después de un ciclo de circulación en pozo.

Sin embargo, para este trabajo, la caracterización del fluido de terminación propuesto únicamente incluirá las siguientes pruebas de laboratorio:

##### **3.1.1 Obtención de la densidad mediante el uso de la balanza**

###### **hidrostática.**

La balanza hidrostática es un instrumento que nos permite medir la densidad de algún fluido este consta de una base de soporte en la cual descansa un brazo graduado con una copa y su tapa con

orificio de purga, un punto de apoyo en filo de cuchilla, nivel, un pilón corredizo y un contrapeso, véase ilustración 4.

El brazo graduado tiene cuatro escalas:

- **En una cara**
  - Libras por galón (lb/gal) en escala de 6 a 24 y se utiliza únicamente para determinar densidad en sistema inglés.
  - Libras por pulgada cuadrada por mil pies (lb/pg<sup>2</sup>/1000ft) y se utiliza para calcular el gradiente de presión del fluido.
  
- **Cara opuesta**
  - Libras por pie cubico (lb/ft<sup>3</sup>) medida de densidad en el sistema inglés.
  - Gramos por centímetro cubico (g/cm<sup>3</sup>) con rango de 0.72 a 2.88 y se utiliza únicamente para determinar la densidad en el sistema métrico decimal.

(Facultad de Ingeniería, 2023)

*Ilustración 4 Balanza hidrostática*



### **3.1.2 Caracterización reológica tixotrópica a través del viscosímetro rotacional.**

La palabra “tixotropía” deriva del griego “thixis” que significa cambio, y se emplea para describir el fenómeno mediante el cual las partículas coloidales en estado de reposo forman geles. Cuando estos geles se someten a agitaciones energéticas se destruyen y forman fluidos viscosos. Una sustancia presenta el fenómeno de la tixotropía cuando la aplicación de un esfuerzo deformante reduce el grado de resistencia que ofrece la mezcla a fluir o a deslizarse.

Parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología de un fluido se puede obtener para calcular las pérdidas de presión por fricción, analizar la contaminación del fluido y determinar los cambios de presión en el interior del pozo durante un viaje.

Existen diferentes clasificaciones de los fluidos dependiendo el comportamiento que estos presentan al analizar la velocidad de corte en función del esfuerzo de corte. La ilustración 5 representa el comportamiento reológico típico de diferentes fluidos.

- **Plástico de Bingham.**

Son aquellos materiales viscoplásticos que tienen comportamiento de sólido cuando son sometidos a bajos esfuerzos de corte y como fluido a altos esfuerzos de corte. Un ejemplo de este comportamiento es la pintura.

- **Pseudoplástico**

Estos fluidos presentan un comportamiento de disminución de la viscosidad en función del aumento de la velocidad de corte. Estos son fluidos no Newtonianos, es decir no tienen un comportamiento lineal de la viscosidad en relación con la velocidad de corte. Existen diferentes ejemplos de estos fluidos como lo son la sangre, el asfalto o la mayonesa.

- **Newtoniano**

Un fluido Newtoniano es aquel cuya viscosidad es constante, independientemente de la velocidad de corte ejercida sobre este. Los ejemplos más comunes de estos fluidos son el agua, la miel o las soluciones salinas.

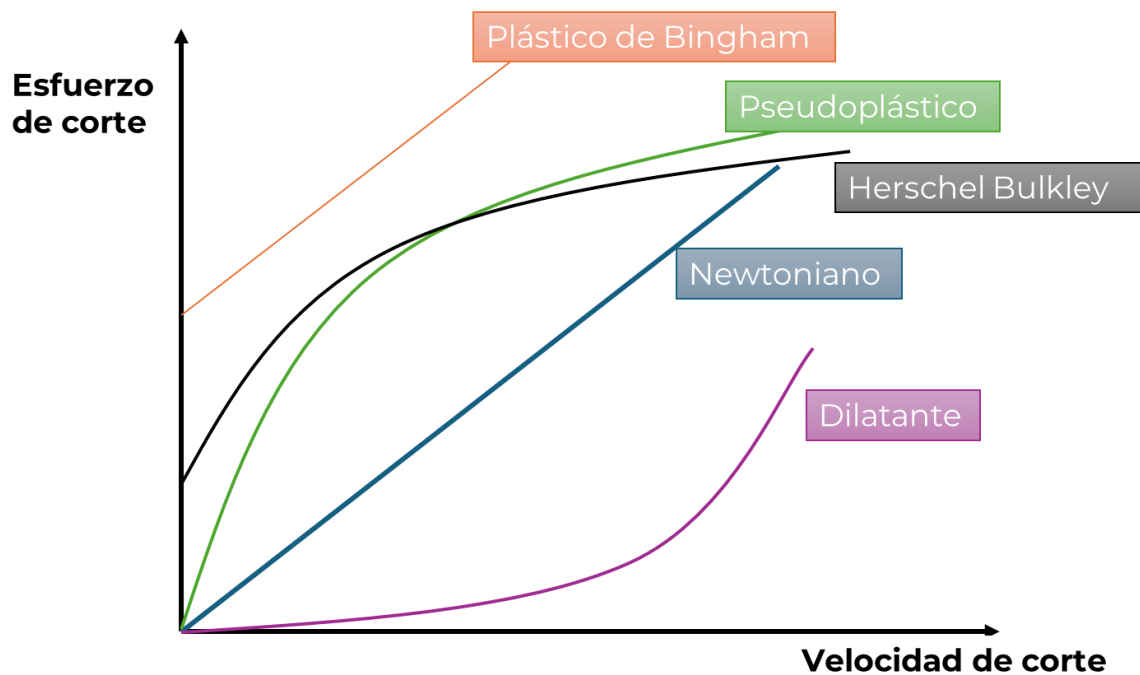
- **Dilatante**

Son aquellos fluidos no newtonianos cuya viscosidad aumenta cuando se les aplica un mayor esfuerzo cortante. Comúnmente podemos encontrar este tipo de comportamientos en la mezcla de almidón de maíz con agua.

- **Fluidos de Herschel y Bulkley**

Estos fluidos tienen un comportamiento no lineal, por lo que se caracteriza como un fluido no Newtoniano. Una de sus principales características es que se requiere una fuerza inicial para poder deformarlo, es decir, tiene punto de cedencia.

*Ilustración 5 Comportamiento reológico típico de diferentes fluidos*



El instrumento que permite evaluar el comportamiento reológico de los fluidos es el viscosímetro rotacional (ver ilustración 6), el cual opera bajo los principios de la ley de viscosidad de Newton. Con este instrumento es posible medir la resistencia del fluido a fluir a ciertas revoluciones por minuto. En función de los resultados es posible obtener el comportamiento reológico y otras propiedades como lo son la viscosidad aparente, viscosidad plástica, el punto de cedencia y el esfuerzo gel.

*Ilustración 6 Viscosímetro Rotacional.*



Con este instrumento obtendremos diversas mediciones de la resistencia del fluido a las velocidades de corte de 3, 6, 100, 200, 300 y 600 revoluciones por minuto, a partir de estos datos se obtienen las siguientes características del fluido.

- **Viscosidad aparente**

Es la resistencia al flujo de un fluido, causada por las fuerzas de atracción de sus partículas y, en menor grado, por la fricción creada entre ellas a una determinada velocidad de corte.

Se calcula de la siguiente manera:

$$V_a = \frac{L_{600}}{2}$$

*Ecuación 2*

- **Viscosidad plástica**

Es la resistencia al flujo originada por la fricción mecánica generada por el rozamiento y concentración de los sólidos entre sí y la viscosidad de la fase líquida que los rodea.

Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_p = L_{600} - L_{300}$$

*Ecuación 3*

- **Punto de cedencia**

Valor de la resistencia al flujo, debida a las fuerzas de atracción que existen entre las partículas o sólidos en suspensión. Es una condición dinámica.

Es calculada con la siguiente ecuación:

$$P_c = L_{300} - V_p$$

*Ecuación 4*

(Facultad de Ingeniería, 2023)

### **3.1.3 Filtro prensa de baja presión.**

Para evitar daños a la formación, es necesario conocer la capacidad de filtrado. El instrumento utilizado consta de un cuerpo cilíndrico o celda, regulador de presión, manómetro, probeta graduada, y un brazo de

soporte telescópico. La celda se acopla al regulador, se cierra la tapa inferior por medio de un yugo y tornillo, prensando una hoja de papel filtro contra una malla y un empaque de hule.

En esta prueba el fluido se somete a presión, esto permite cuantificar la fase continúa filtrada antes de que se genere una película impermeable (véase ilustración 7).

*Ilustración 7 Filtro Prensa de baja presión*



(Facultad de Ingeniería, 2023)

### **3.1.4 Filtro prensa de alta presión y temperatura.**

Una prueba necesaria en la evaluación de las capacidades de filtrado de los fluidos que se encuentran en contacto directo con las formaciones es la del filtro prensa de alta presión y temperatura, que también es conocido como filtro HPHT (High Pressure High Temperature).

Esta prueba somete el fluido a condiciones de presión y temperatura similares a las presentes durante la perforación, evaluando la pérdida de fase continua antes de generarse una película impermeable.

El equipo consta de una celda la cual contiene el fluido de estudio, una camisa de calentamiento, necesaria para elevar la temperatura de la celda un arreglo de válvulas que permiten controlar la presión interna de la celda y, al igual que el equipo de baja presión, dentro de la celda se coloca un papel filtro sobre una malla metálica donde el fluido de estudio genera un recubrimiento impermeable (véase ilustración 8).

*Ilustración 8 Filtro HPHT*



### **3.1.5 Horno de rolado.**

Este equipo se utiliza para evaluar la efectividad de un fluido de interés a través de una prueba térmico-dinámica. La muestra se somete a altas temperaturas en condiciones dinámicas dentro de una celda de contención (véase ilustración 9).



*Ilustración 9 Horno de rolado*



### **3.1.6 Tiempo de escurrimiento Marsh.**

El instrumento necesario para esta prueba es llamado embudo Marsh, el cual es un embudo de forma cónica que cuenta con un tubo en la parte inferior por el cual un fluido de interés fluye por efectos gravitatorios. Esta prueba consiste en la evaluación cualitativa del tiempo que tarda en desplazarse un fluido de análisis. La prueba consta de llenar el embudo, con capacidad de 1500 cm<sup>3</sup>, y contabilizar el tiempo que tarda en desplazarse un volumen de 1000 cm<sup>3</sup> (véase ilustración 10).

*Ilustración 10 Embudo Marsh*



(Facultad de Ingeniería, 2023)

## **4 Desarrollo experimental del fluido de terminación.**

En el presente capítulo se muestra el desarrollo del fluido de terminación, desde la selección de materiales y su caracterización, hasta la elaboración del fluido y las pruebas necesarias para evaluar las propiedades que el fluido debe cumplir.

### **4.1 Materiales empleados**

#### **4.1.1 Agua de mar**

Para este trabajo se utilizó como base del fluido el agua de mar, ya que es abundante, de fácil acceso y, principalmente, evitar el uso de agua dulce en la elaboración del fluido, promoviendo el cuidado de este recurso hídrico.

Las muestras del agua de mar empleada provienen de Tamiahua, Veracruz. La selección de esta localidad se basó en la facilidad de

recolección de las muestras y en la limpieza del agua debido a que no es un centro turístico altamente desarrollado o un puerto marítimo de alta afluencia, destacando que es una fuente de agua disponible en la cuenca sedimentaria del golfo de México.

Comúnmente el agua de mar tiene diversos minerales como lo son el magnesio, calcio, potasio, sodio, cloro, boro, fluor, yodo, por mencionar algunos, la concentración de estos minerales varía dependiendo la ubicación geográfica.

Para este desarrollo se evaluó la salinidad y densidad de la muestra de agua de mar recolectada. A continuación, se describen estos procesos.

*Ilustración 11 Muestra Agua de Mar*

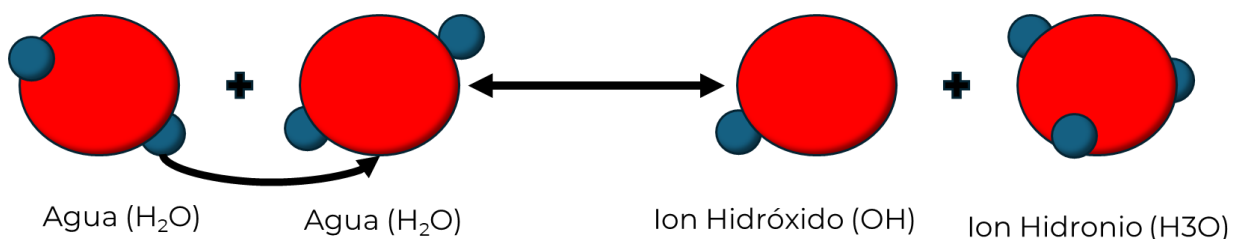


#### **4.1.1.1 Evaluación de la salinidad por el método argentométrico.**

El método argentométrico se trata de un análisis volumétrico estequiométrico, el cual está basado en la polaridad del agua, permitiendo reacciones químicas estequiométricas debido al fenómeno de intercambio iónico generado por el agua, representado en la ilustración 12.

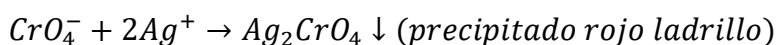
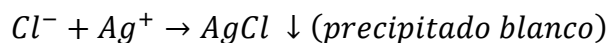
Es necesario que los reactivos se encuentren ionizados en ambientes acuosos para que las reacciones estequiométricas se puedan llevar a cabo.

Ilustración 12 Intercambio Iónico



Para determinar la salinidad del medio acuoso se emplea el método de titulación, que consiste en la reacción de un reactivo en disolución (de concentración conocida) con una especie de interés disuelta en el agua. Dicho reactivo se adiciona desde una bureta a la disolución de concentración conocida se le llama titulante.

El método de Mohr es un procedimiento propuesto en 1856, propone el empleo de una disolución de Cromato de Potasio (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) como un indicador de la reacción generada por los iones Cloro (Cl<sup>-</sup>) y los iones Plata (Ag<sup>+</sup>). El procedimiento se explica de la siguiente manera, si a una disolución neutra de un cloruro se adiciona una pequeña cantidad de Cromato de Potasio (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) y se titula con solución valorada de Nitrato de Plata (AgNO<sub>3</sub>) se formarán dos sales que precipitarán, el cloruro de plata, sal de color blanco (AgCl) y el cromato de plata, sal de color rojo (Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>). Siendo más insoluble la primera, en tanto existan iones cloruro en la solución tendrá lugar la formación del cloruro de plata y solo cuando todo el cloruro ha precipitado, un ligero exceso de iones plata producirá cromato de plata, que precipita un tinte rojizo que indica el final de la titulación. (Facultad de Ingeniería, 2023)



De este proceso se obtuvo un resultado de 20,158 partes por millón, referente a la salinidad de las muestras de agua de mar recolectadas

#### 4.1.1.2 Obtención de la densidad mediante el empleo de la balanza

##### hidrostática.

Mediante el empleo de la balanza de lodos se obtuvo una densidad de  $1.02 \text{ gr/cm}^3$  referente a el agua de mar empleada.

*Ilustración 13 Densidad Agua de Mar*



(Facultad de Ingeniería, 2023)

#### 4.1.2 Sal empleada en la elaboración del fluido de terminación.

En el fluido de terminación aquí expuesto se propuso el uso del cloruro de sodio (sal de mar), obtenido a través del método de evaporación, como densificante presente en forma de disolución en el agua de mar recolectada.

Debido a que la sal común o de mesa tiene un agregado de fluoruros y yoduros no permite alcanzar a la densidad máxima teórica que el cloruro de sodio nos ofrece en forma de disolución en agua. El fenómeno de disolución se ve afectado por estos componentes extras no deseados, provocando que la sal común agregada no pueda disolverse por completo en el agua de mar, ya que esta llega al punto de saturación máximo por efectos de las sales de flúor y yodo. En el proceso de experimentación se encontró que la densidad máxima alcanzada, utilizando sal común, solo llega a  $1.16 \text{ gr/cm}^3$ . Sin embargo, se recomienda realizar una prueba de

solubilidad antes de utilizar cloruro de sodio de algún otro tipo de naturaleza, esto es para comprobarla densidad máxima permisible.

*Ilustración 14 Sal de Mar empleada en la elaboración del fluido.*



#### **4.1.2.1 Adición de cloruro de sodio utilizado como densificante.**

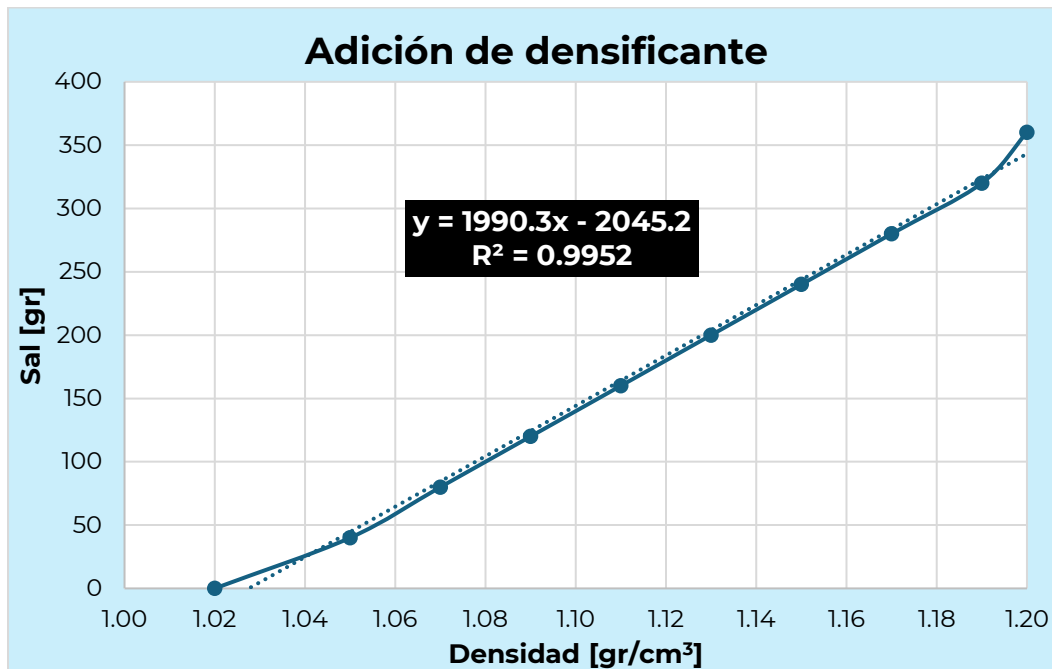
Se realizó un modelo matemático que nos permite aproximar la cantidad de material densificante necesario para el diseño de la densidad, se debe de considerar que la densidad mínima de diseño  $1.02 \text{ gr/cm}^3$ , siendo la densidad máxima  $1.20 \text{ gr/cm}^3$ , debido a las propiedades del material densificante empleado.

A continuación, en la tabla 4, se mostrarán los datos obtenidos, así como un modelo gráfico (gráfica 2) y su modelo matemático correspondientes a 1 litro de muestra preparada.

Tabla 4 Densidad en función de sal agregada

Sal [gr]	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]
0	1.02
40	1.05
80	1.07
120	1.09
160	1.11
200	1.13
240	1.15
280	1.17
320	1.19
360	1.20

Gráfica 2 Modelo de densidad



De la gráfica 2 se obtiene la siguiente fórmula:

$$GS = 1990.3 (\rho) - 2045.2$$

*Ecuación 5*

Donde:

GS = Gramos de sal

$\rho$  = Densidad deseada

#### **4.1.3 Polímero empleado en la elaboración del fluido de terminación.**

Los polímeros son macromoléculas constituidas por la unión de moléculas más pequeñas denominadas monómeros. Los polímeros presentan una estructura compleja.

El polímero orgánico lineal experimental empleado tiene la fundamental tarea de dotar, al fluido de terminación, con las capacidades reológicas necesarias para cumplir las funciones previamente descritas.

Se trata de un polímero natural el cual es compatible con soluciones salinas, permitiéndonos su uso como viscosificante en ambientes altamente salinos, como el agua de mar saturada con cloruro de sodio.

#### **4.1.4 Aditivos.**

Los aditivos son aquellos materiales que se ocupan en porciones pequeñas, en comparación con los demás materiales empleados. Los aditivos tienen la función de mejorar las propiedades o características de los fluidos.

En la elaboración de este fluido de terminación se utilizaron aditivos que funcionan como inhibidores de cristalización, anticorrosivos, alcalinizantes y un agente estabilizador.



## **4.2 Elaboración del fluido de terminación.**

Como primer paso se realizaron diversas pruebas a diferentes concentraciones de polímero adicionado al agua de mar; en este análisis pudimos observar la reacción del polímero a altas, bajas y medias concentraciones en ambientes salinos, dando como resultado que en altas concentraciones este tenía la consistencia de una gelatina; a bajas concentraciones el comportamiento del agua de mar parecía no verse afectado. Del análisis de la observación del fenómeno se planteó, encontrar la concentración adecuada de polímero, la cual nos permita obtener una reología óptima.

Posterior a la experimentación con la concentración del polímero se comenzó con la adición de cloruro de sodio. En este proceso no se tenía en cuenta que la sal de mesa tiene un tratamiento de flúor y yodo; fue hasta comprobar visualmente, con la sal precipitada en el fondo del recipiente, y con la balanza hidrostática, que no se solubilizo el suficiente de cloruro de sodio para llegar a la máxima densidad teórica ( $1.20 \text{ gr/cm}^3$ ), obteniendo una densidad de  $1.16 \text{ gr/cm}^3$ .

Debido al fenómeno previo se planteó el uso de sal sin tratamientos, es decir, obtenida a través de la evaporación.

Con el uso del cloruro de sodio obtenido a través del método de evaporación, se obtuvieron dos principales resultados. Uno de estos fue el evidente cambio de las propiedades reológicas del fluido bajo las mismas concentraciones de polímero. Sin embargo, el objetivo de alcanzar una densidad de  $1.20 \text{ gr/cm}^3$  se logró sin la presencia de precipitados de cloruro de sodio.

La caracterización reológica del fluido desarrollado se llevó a cabo con el uso del viscosímetro rotacional, estas pruebas se realizan desde temperatura ambiente hasta una temperatura objetivo. Durante la prueba con alta temperatura se observó el fenómeno de cristalización (ilustración 15). Otro fenómeno que se presentó durante los procedimientos de laboratorio fue el de corrosión hacia los equipos posterior a su uso.

La cristalización y la corrosión se deben evitar mediante el uso de aditivos, por lo cual se incorporaron aditivos para el control de estos fenómenos.

El uso de aditivo inhibidor de corrosión solo se trata de una concentración cualitativa con la cual se logró controlar este fenómeno en los equipos de laboratorio. Para realizar una prueba de corrosión se necesitan muestras de los materiales que se utilizan en campo, lo cual excede las capacidades de evaluación de propiedades que se realizaron en el desarrollo de este fluido. En las pruebas de corrosión se analiza la pérdida de material debido a este fenómeno, los poros que se generan, o el daño a la integridad del material.

El agente estabilizador se encarga de dotar estabilidad térmica al fluido, promoviendo su resistencia a altas temperaturas para evitar la degradación del polímero experimental utilizado.

*Ilustración 15 Cristalización generada en la prueba a 175° F en el Viscosímetro Rotacional*



Después de ajustar la concentración de polímero presente en el fluido, determinar la naturaleza de cloruro de sodio que se empleó y los aditivos se llegó a la siguiente formulación para un diseño de densidad de 1.20

gr/cm<sup>3</sup>. Todos los porcentajes de agregados mencionados a continuación están referidos a la masa de agua empleada.

- Agua de mar. (500 ml)
- Polímero orgánico experimental. (1.2%)
- Cloruro de sodio (36%)
- Inhibidor de cristalización. (0.1%)
- Inhibidor de corrosión. (0.1%)
- Alcalinizante. (0.1%)
- Agente estabilizador (3%)

A continuación, se describe el proceso de elaboración del fluido de terminación.

- 1.** Tomar una muestra de 500 ml de agua de mar y ponerla en dispersión, en este proceso se utilizó un multimixer para realizar esta tarea (ilustración 16).
- 2.** Se pesa una muestra de 6 g de polímero experimental, posteriormente se adiciona al agua de mar que ya se encuentra en dispersión, cabe la mención de que este polímero no se flocula, así que podemos agregarlo rápidamente (ilustración 17).
- 3.** Se procede a agregar 180 g de cloruro de sodio a la mezcla y posteriormente se debe dar el suficiente tiempo de agitación para que la sal de mar empleada pueda disolverse. Se comprueba el pH de la mezcla con el uso de tiras reactivas, obteniendo un pH neutro (ilustración 18).
- 4.** Continuamos con la adición de los inhibidores de cristalización y corrosión, nuevamente comprobamos el pH, obteniendo un resultado de 5 en la lectura, debido a la naturaleza ácida de los aditivos. La ilustración 19 es referente a la adición del inhibidor de cristalización (parte superior) y del inhibidor de corrosión (parte inferior). La ilustración 20 refiere la comprobación del pH.

5. Después de comprobar el pH de la mezcla se procede con la adición del agente estabilizante y posteriormente se agrega el aditivo alcalinizante.

### **4.3 Resultados y discusión**

#### **4.3.1 Control de las propiedades reológicas tixotrópicas.**

En esta sección se muestran los modelos reológicos más representativos obtenidos mediante el uso del viscosímetro rotacional, adicionalmente se mostrarán pruebas a diversas concentraciones de polímero y el tipo de cloruro de sodio empleado y una breve descripción del comportamiento reológico del fluido.

Se encontró que la concentración funcional de polímero para la generación de este fluido de terminación fue del 1.2% hasta 4% respecto a la masa del agua, ya que, al agregar más polímero hace que el fluido se gelifique de manera inmediata, imposibilitando su funcionamiento práctico como fluido de control.

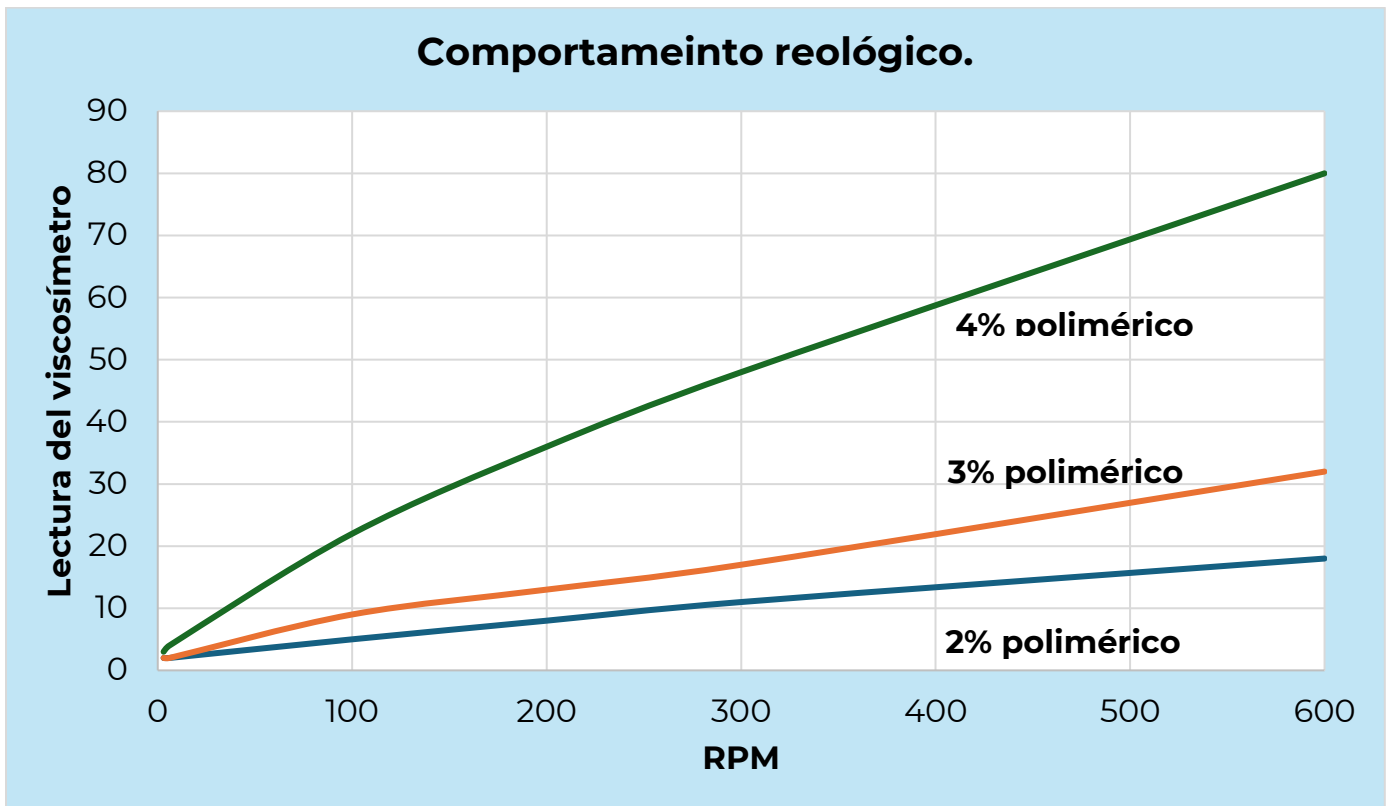
También se incluyen los resultados relacionados con el fluido de terminación propuesto en este trabajo y una comparación con fluidos de terminación utilizados en campo.

A continuación, se muestran las primeras pruebas de reología, únicamente con polímero, a diferentes concentraciones, y el agua de mar empleada. En la tabla 5 se encontrarán las lecturas correspondientes a cada concentración de polímero, posteriormente en la gráfica 5 se muestra su comportamiento y una breve descripción de ella.

Tabla 5 Lecturas del viscosímetro rotacional a diferentes concentraciones de polímero.

Concentración de polímero			
RPM	2%	3%	4%
3	2	2	3
6	2	2	4
100	5	9	22
200	8	13	36
300	11	17	48
600	18	32	80
300	11	17	47
200	9	13	35
100	7	9	20
6	4	2	4
3	2	2	3

Gráfica 3 Comportamiento reológico a diferentes concentraciones de polímero.



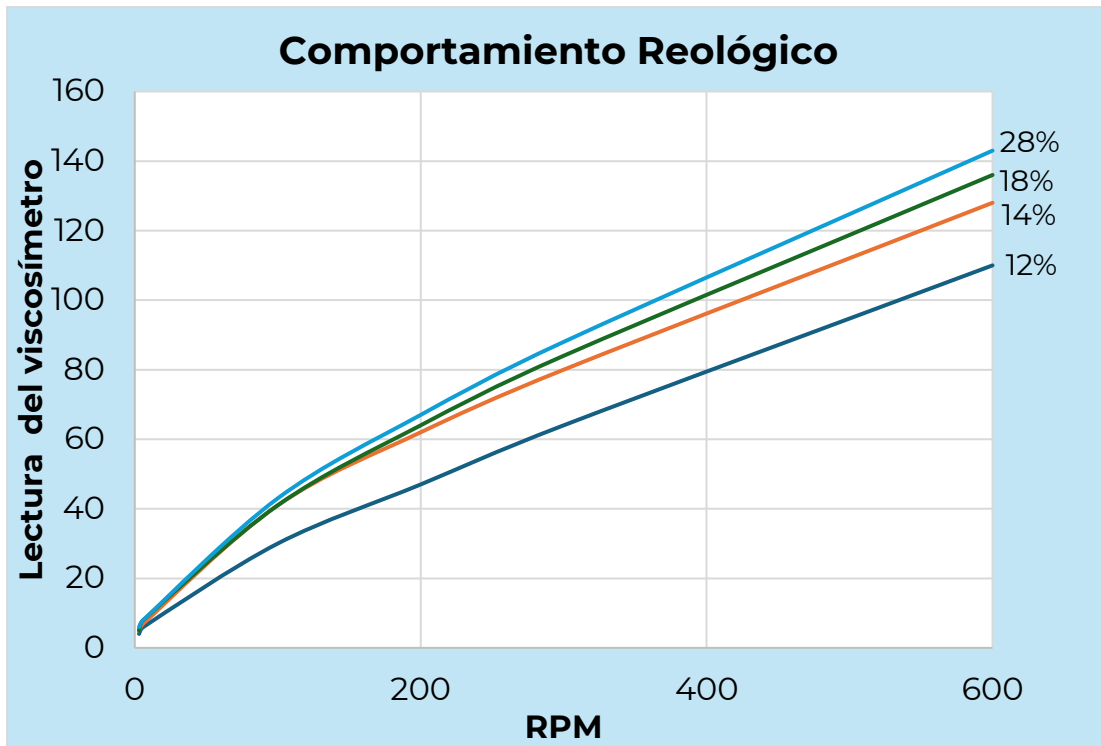
En la gráfica 5 se observa el cambio de la reología en función de la concentración de polímero, siendo más evidente este comportamiento a altas velocidades de corte.

Posterior a la experimentación con agua de mar y polímero se añadió la sal de mesa común. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos a diferentes concentraciones de cloruro de sodio, con un fluido al 4% polimérico.

*Tabla 6 Lecturas del viscosímetro rotacional a diferentes concentraciones de sal, con una concentración polimérica del 4%*

RPM	Concentración de sal de mesa			
	12%	14%	18%	28%
<b>3</b>	4	5	5	6
<b>6</b>	6	7	8	8
<b>100</b>	30	41	41	43
<b>200</b>	47	62	64	67
<b>300</b>	64	80	84	88
<b>600</b>	110	128	136	143
<b>300</b>	67	80	84	87
<b>200</b>	53	61	64	67
<b>100</b>	32	38	31	41
<b>6</b>	5	6	7	7
<b>3</b>	3	4	4	4

Gráfica 4 Modelos reológicos de diferentes concentraciones de Cloruro de Sodio en el Fluido con una concentración del 4% polimérica.



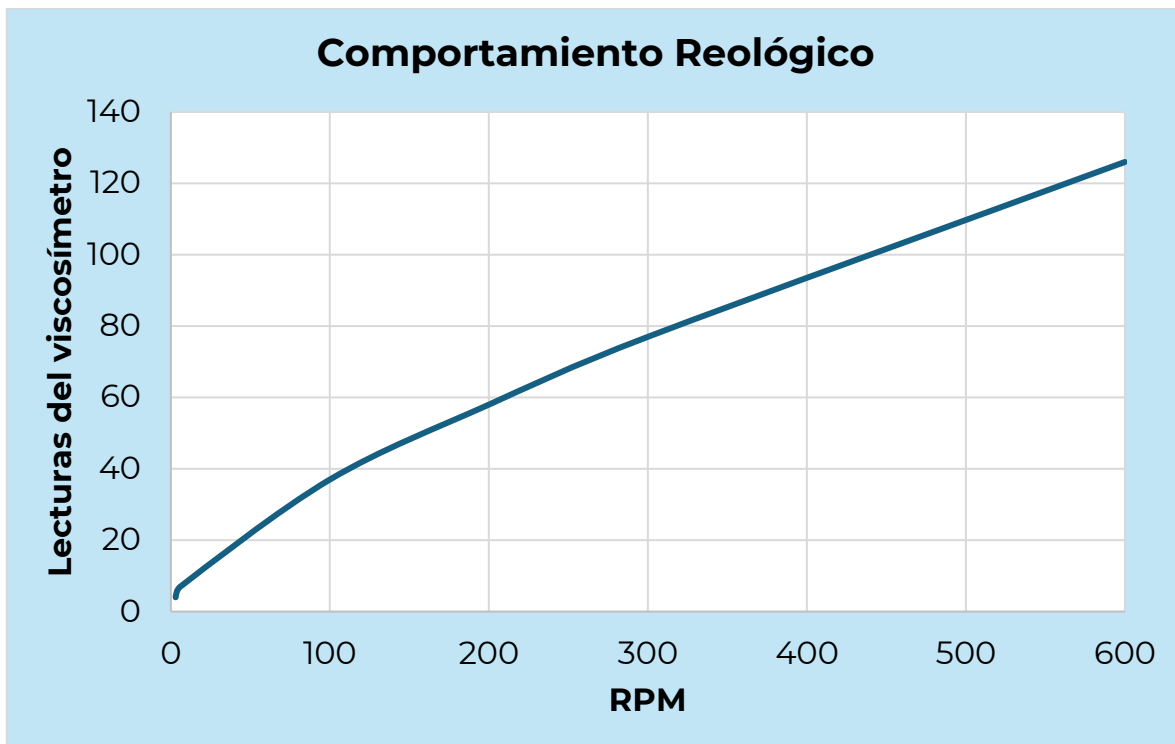
En la gráfica 6 se aprecia el comportamiento reológico del fluido a diferentes concentraciones de cloruro de sodio. Este comportamiento corresponde a las pruebas realizadas con el viscosímetro rotacional destacando el incremento de la viscosidad en lecturas de altas velocidades de corte; podemos hacer la comparación de las lecturas de 600 RPM del fluido al 4% polimérico sin la adición de cloruro de sodio con la lectura del mismo fluido con una concentración de Cloruro de Sodio del 28%, donde las lecturas se elevan a casi el doble.

La siguiente prueba fue realizada con el fluido a una concentración de 4% polimérica y una concentración del 36% de cloruro de sodio obtenido por el método de evaporación, los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 lecturas del viscosímetro rotacional del fluido al 4% polimérico, con una concentración del 32% de cloruro de sodio obtenido por el método de evaporación.

	Concentración de cloruro de sodio
	<b>36%</b>
<b>RPM</b>	
<b>3</b>	4
<b>6</b>	7
<b>100</b>	37
<b>200</b>	58
<b>300</b>	77
<b>600</b>	126
<b>300</b>	77
<b>200</b>	57
<b>100</b>	35
<b>6</b>	5
<b>3</b>	3

Gráfica 5 Comportamiento del fluido al 4% polimérico, con una concentración del 36% de cloruro de sodio obtenido por el método de evaporación.

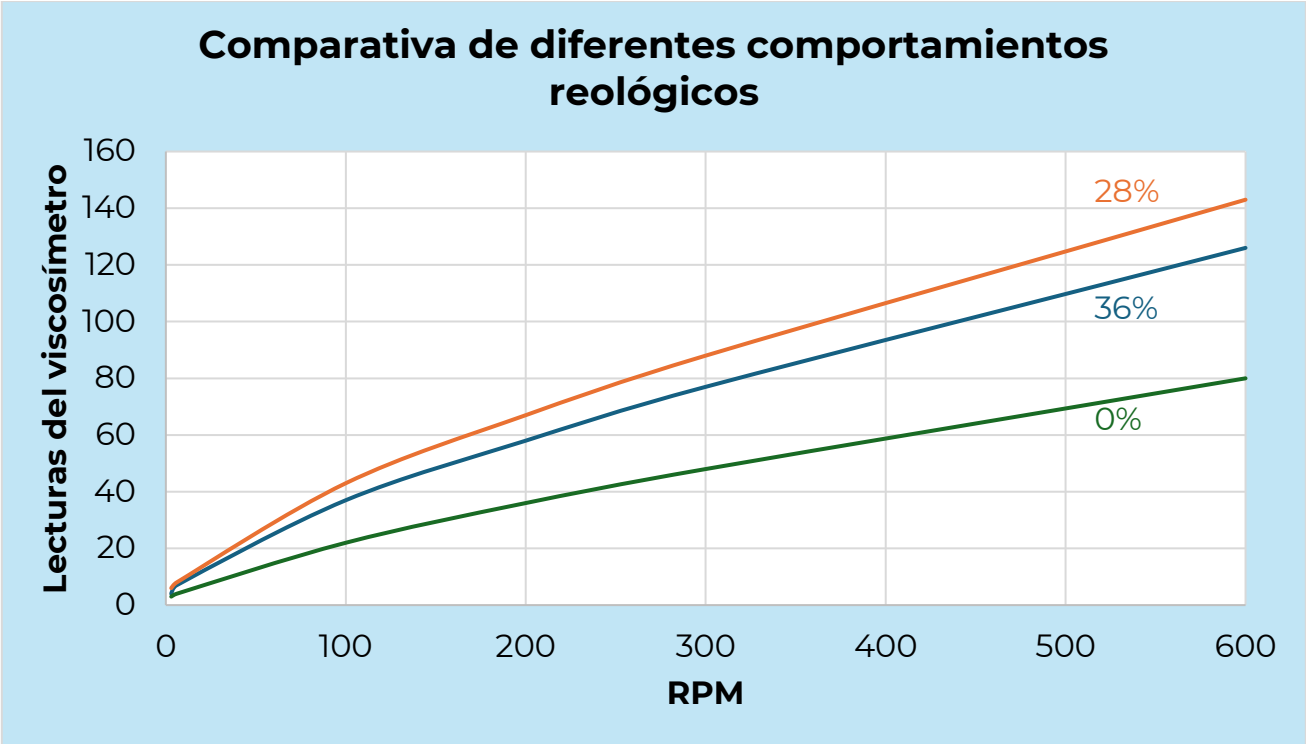




En la gráfica 5 se muestra el comportamiento reológico del fluido en una concentración polimérica del 4%, el cual se encuentra saturado de cloruro de sodio, con una densidad de 1.20 gr/cm<sup>3</sup>; en comparación con los resultados del fluido a la misma concentración polimérica, pero con una menor concentración de cloruro de sodio debido a que tiene adiciones de flúor y yodo impidiendo que se llegue a la densidad objetivo. Se puede apreciar un decremento en la viscosidad, a pesar del aumento de la concentración de cloruro de sodio.

En la gráfica 6 se muestra el fenómeno antes descrito. Se debe notar que el fluido elaborado al 36% de cloruro de sodio fue realizado con sal de mar obtenida por el método de evaporación, en el fluido elaborado al 28% se utilizó sal común y en el fluido al 0% no fue adicionada ninguna sal.

Gráfica 6 Comparación del comportamiento reológico del fluido, con una concentración polimérica del 4%, a diferentes concentraciones de cloruro de sodio.



Como parte del procedimiento de la caracterización reológica se hace empleo de la termocopa, la cual permite elevar la temperatura del fluido durante la prueba del viscosímetro rotacional (ilustración 21).

*Ilustración 16 Viscosímetro rotacional con termocopa.*

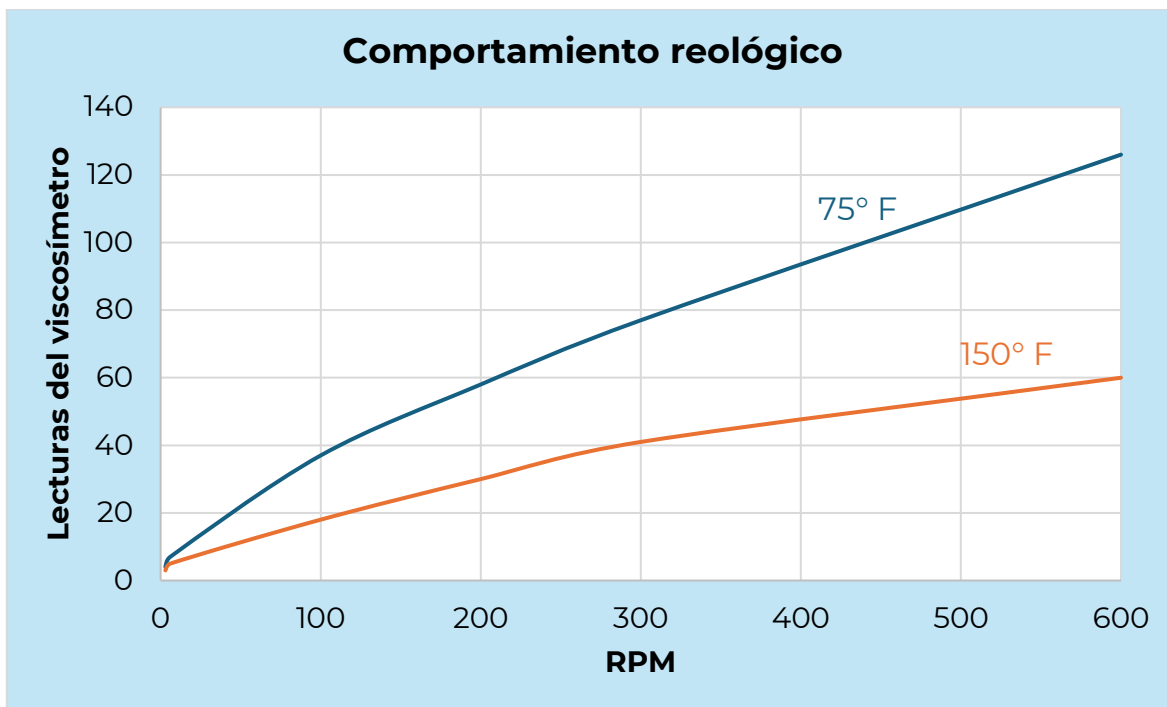


En la tabla 8 se muestran los resultados del procedimiento realizado sobre el fluido, a 75°F y a 150°F, densificado con sal de mar a una concentración del 36%, con una concentración polimérica del 4% y que contiene los aditivos propuestos.

Tabla 8 Lecturas del viscosímetro rotacional a 75 °F y a 150 °F del fluido propuesto.

Lecturas del viscosímetro		
RPM	75°F	150°F
3	4	3
6	7	5
100	37	18
200	58	30
300	77	41
600	126	60
300	77	36
200	57	25
100	35	14
6	5	6
3	3	3

Gráfica 7 Comportamiento reológico del fluido propuesto a 75° F y a 150°F.



Como se puede apreciar en la tabla 8 y la gráfica 7 existe un cambio evidente en el comportamiento reológico del fluido debido a los efectos de la temperatura. Sin embargo, a pesar del aumento en la temperatura, el comportamiento del fluido se mantiene como un fluido de Herschel y Bulkley, cuyas características reológicas se muestran a continuación.

En la tabla 9 se muestran los valores de la viscosidad plástica, aparente y el punto de cedencia de las pruebas reológicas del fluido de terminación propuesto, a 75°F y a 150°F. con una concentración polimérica del 4%.

Tabla 9 Viscosidades y punto de cedencia.

	75°F	150°F
<b>Viscosidad aparente cp</b>	63	30
<b>Viscosidad plástica cp</b>	49	19
<b>Punto de cedencia lb/100ft<sup>2</sup></b>	28	22

Después de las pruebas anteriores se realizaron las correspondientes al fluido propuesto, el cual tiene una concentración polimérica del 1.2%. A continuación, se mostrarán dichas pruebas reológicas para fluidos con densidades de 1.10, 1.15 y 1.20 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabla 10 Reología del fluido de terminación de 1.10 gr/cm<sup>3</sup>.

<b>Densidad 1.10 gr/cc</b>				
<b>RPM</b>	<b>Temperatura °F</b>			
	<b>75</b>	<b>120</b>	<b>175</b>	<b>*75</b>
<b>3</b>	4	5	5	6
<b>6</b>	5	6	6	7
<b>100</b>	7	7	10	13
<b>200</b>	9	9	12	17
<b>300</b>	11	10	14	22
<b>600</b>	17	14	23	37
<b>* Lecturas tomadas después de someter el fluido a 175°F y dejando enfriar</b>				

Gráfica 8 Comportamiento reológico del fluido con densidad de 1.10 gr/cm<sup>3</sup>.

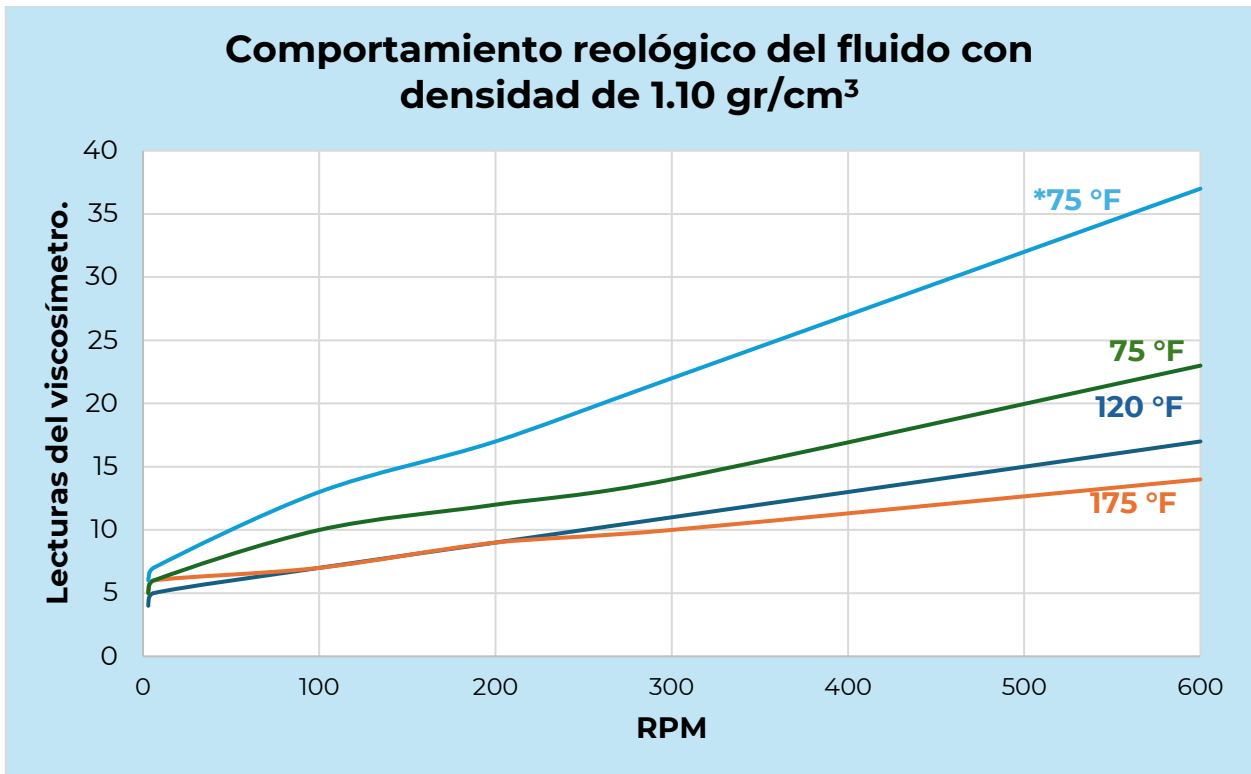


Tabla 11 Viscosidad aparente, plástica y punto de cedencia de densidad 1.10 gr/cm<sup>3</sup>.

	Densidad 1.10 gr/cm <sup>3</sup>			
	Temperatura °F			
	75	120	175	*75
<b>Viscosidad aparente</b>	8.5	7	11.5	18.5
<b>Viscosidad plástica</b>	6	4	9	15
<b>Punto de cedencia</b>	5	6	5	7
<b>*Cálculos después de someter el fluido a 175 °F y dejando enfriar</b>				

Tabla 12 Reología del fluido de terminación de 1.15 gr/cm<sup>3</sup>.

Densidad 1.15 gr/cm <sup>3</sup>				
RPM	Temperatura °F			
	75	120	175	*75
3	1	1	1	2
6	2	2	2	4
100	4	4	4	13
200	7	6	7	20
300	10	8	10	25
600	17	13	15	40

\* Lecturas tomadas después de someter el fluido a 175°F y dejando enfriar

Gráfica 9 Comportamiento reológico del fluido con densidad de 1.15 gr/cm<sup>3</sup>.

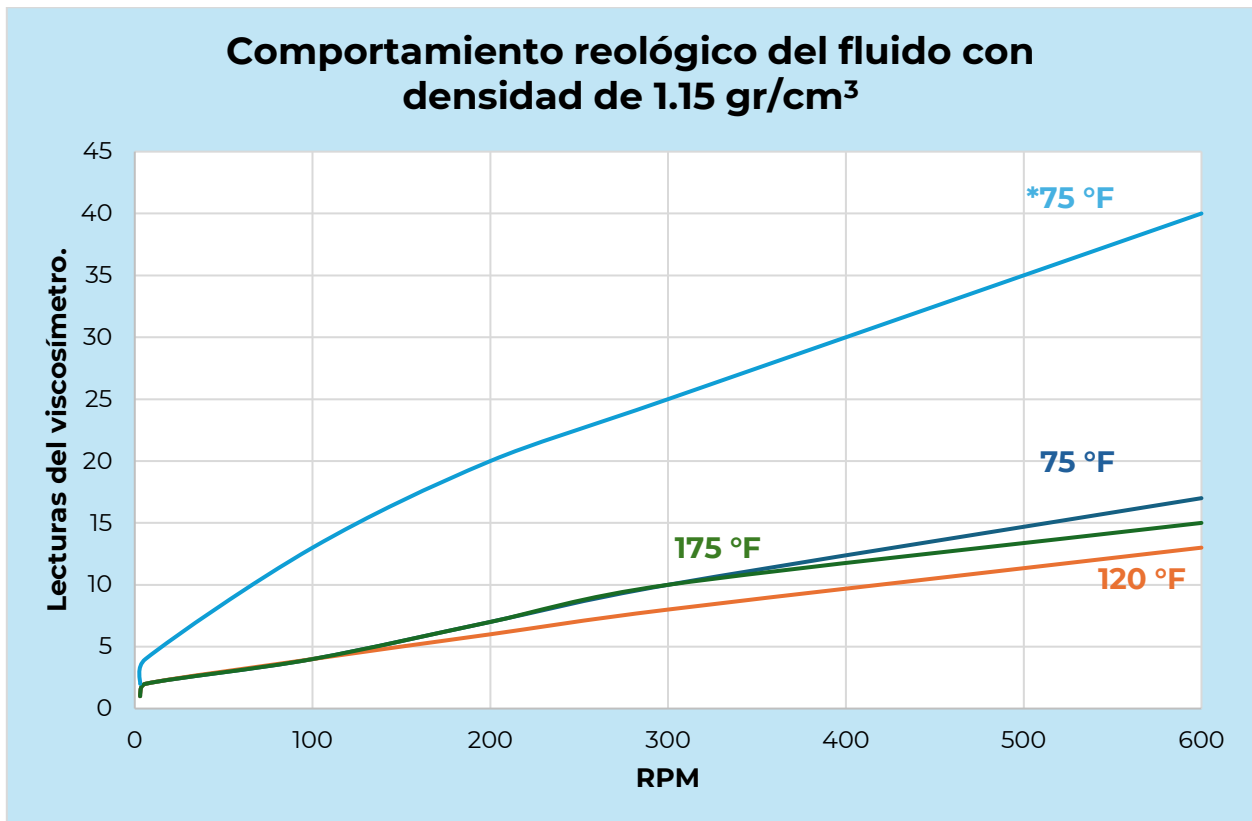


Tabla 13 Viscosidad aparente, plástica y punto de cedencia de densidad 1.15 gr/cm<sup>3</sup>.

	<b>Densidad 1.15 gr/cm<sup>3</sup></b>			
	<b>Temperatura °F</b>			
	<b>75</b>	<b>120</b>	<b>175</b>	<b>*75</b>
<b>Viscosidad aparente</b>	8.5	6.5	7.5	20
<b>Viscosidad plástica</b>	7	5	5	15
<b>Punto de cedencia</b>	3	3	5	10
<b>*Cálculos después de someter el fluido a 175°F y dejando enfriar</b>				

Tabla 14 Reología del fluido de terminación de 1.20 gr/cm<sup>3</sup>.

<b>RPM</b>	<b>Densidad 1.20 gr/cm<sup>3</sup></b>			
	<b>Temperatura °F</b>			
	<b>75</b>	<b>120</b>	<b>175</b>	<b>*75</b>
<b>3</b>	1	1	1	2
<b>6</b>	2	2	2	3
<b>100</b>	4	3	3	9
<b>200</b>	7	4	5	17
<b>300</b>	10	6	7	22
<b>600</b>	17	10	13	32
<b>* Lecturas tomadas después de someter el fluido a 175°F y dejando enfriar</b>				

Gráfica 10 Comportamiento reológico del fluido con densidad de 1.20 gr/cm<sup>3</sup>.

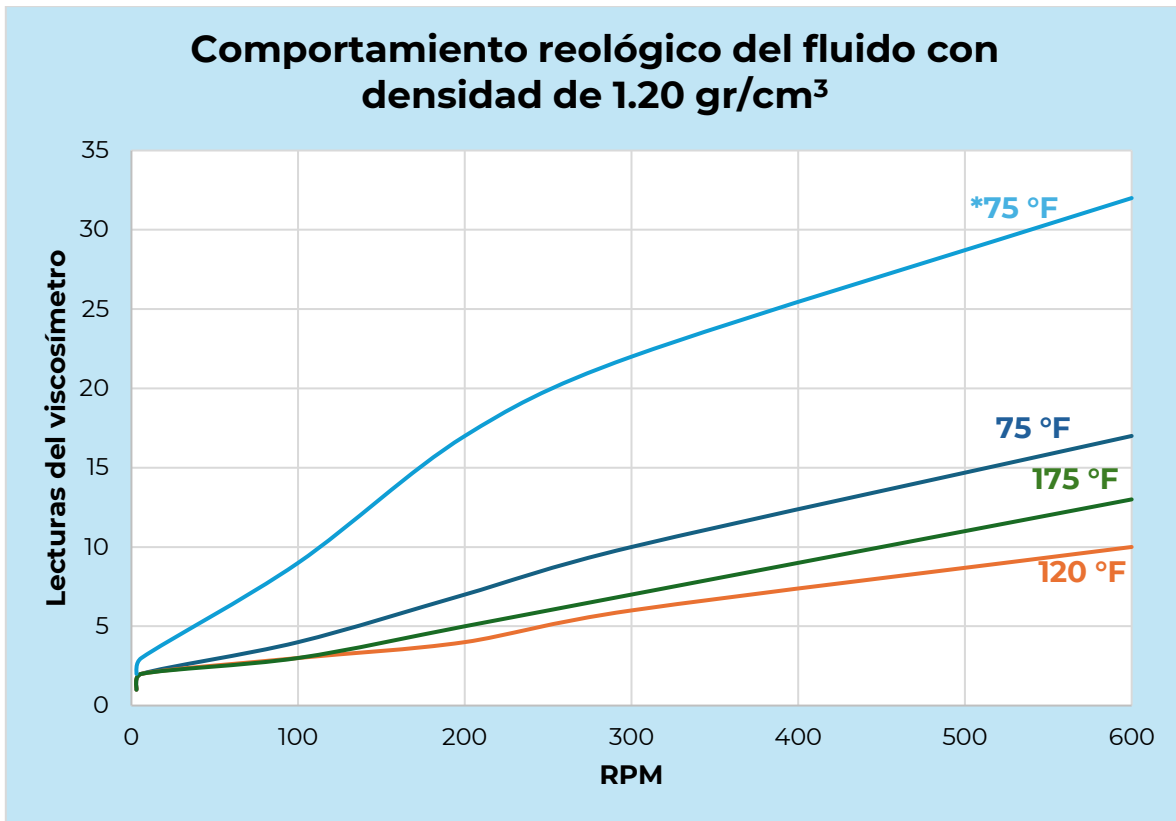


Tabla 15 Viscosidad aparente, plástica y punto de cedencia de densidad 1.20 gr/cm<sup>3</sup>.

	Densidad 1.20 gr/cm <sup>3</sup>			
	Temperatura °F			
	75	120	175	*75
<b>Viscosidad aparente</b>	8.5	5	6.5	16
<b>Viscosidad plástica</b>	7	4	6	10
<b>Punto de cedencia</b>	3	2	1	12
<b>*Cálculos después de someter el fluido a 175°F y dejando enfriar</b>				



Como se puede observar en las anteriores pruebas reológicas se denota un cambio reológico del fluido al calentarse y dejarse enfriar. El comportamiento reológico del fluido es correspondiente a un fluido de Herschel-Bulkley, el cual es más evidente en el fluido de mayor densidad que contiene una mayor concentración de cloruro de sodio.

#### **4.3.2 Prueba de filtrado a baja presión.**

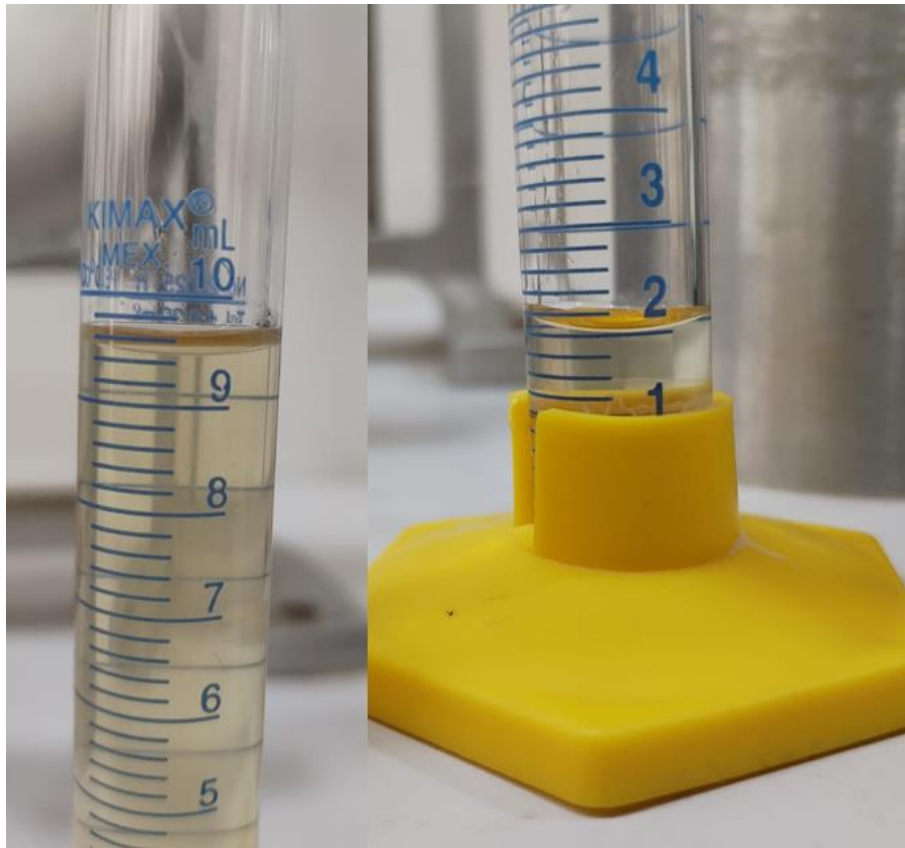
La prueba de filtrado es aquella que nos permite evaluar las capacidades de impermeabilidad que el fluido ofrece. Se obtuvieron los siguientes resultados, únicamente evaluando la mezcla de agua de mar adicionada con polímero y densificada con cloruro de sodio en condiciones de temperatura ambiente a una presión de 100 psi durante un tiempo de 15 minutos.

- **Pérdida de fase continua**

Una vez transcurrido el tiempo establecido se obtuvo un resultado de 10.40 cm<sup>3</sup> en pérdida de fase continua.

La ilustración 22 corresponde a la cuantificación de la pérdida de fase continua en la prueba de filtro prensa; se utilizaron dos probetas graduadas de 10 cm<sup>3</sup>, en la probeta de la izquierda podemos aforar un volumen de 9.4 cm<sup>3</sup>, mientras que en la probeta de la derecha se aprecia un aforo de 1 cm<sup>3</sup>.

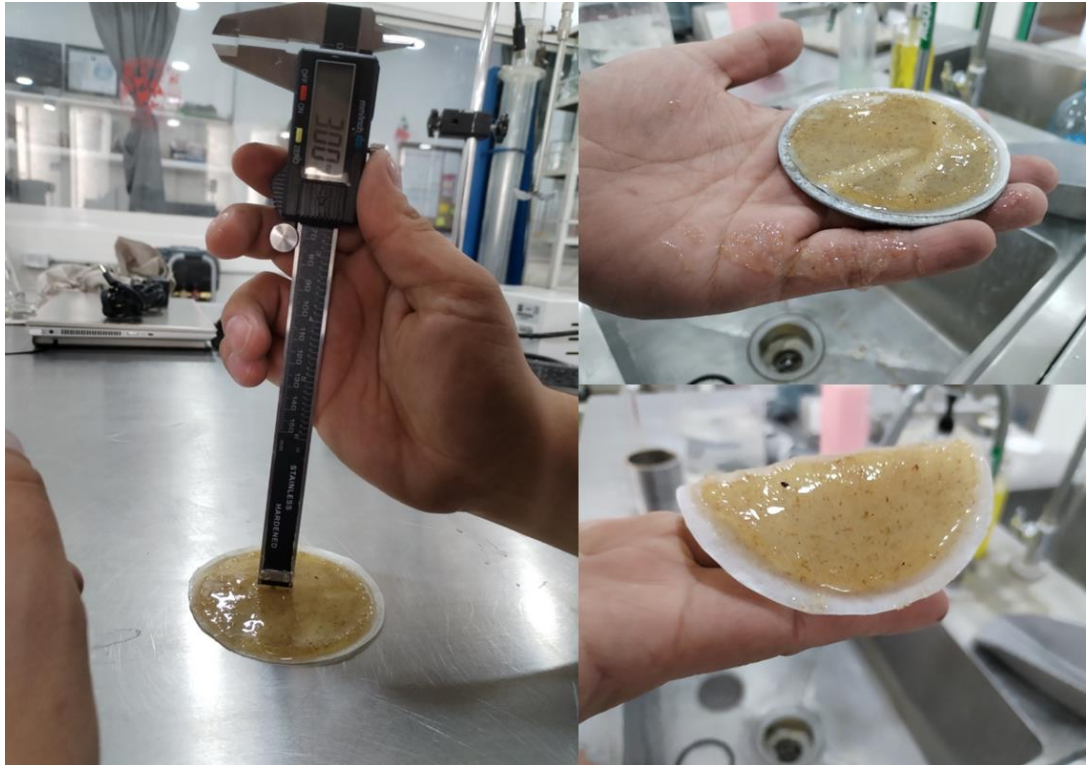
*Ilustración 17 Aforo de la pérdida de fase continua.*



- **Película impermeable**

Parte del análisis de esta prueba consta de evaluar el grosor y características de la película impermeable generada por el fluido, la cual, como se muestra en la ilustración 23, consta de un grosor de 3.00 mm y tiene suficiente flexibilidad para no romperse.

*Ilustración 18 Película impermeable generada por el fluido propuesto sin aditivos.*



De la misma manera antes descrita se repitió el procedimiento de laboratorio una vez que ya se agregaron los aditivos al fluido.

- **Perdida de fase continua**

Se obtuvo una pérdida de fase continua de  $6 \text{ cm}^3$  en un tiempo de 7 minutos y medio, debido a que en este punto ya no existía filtrado de fase continua, la prueba finalizó.

La ilustración 24 corresponde a la cuantificación de la pérdida de fase continua, del lado izquierdo se puede apreciar el proceso de laboratorio, mientras que del lado derecho se observa la probeta graduada con la fase continúa desplazada.

*Ilustración 19 Filtro prensa y la fase continua desplazada.*



- **Película impermeable**

La película impermeable generada por el fluido, después de agregar los aditivos, consta de un grosor de 1.36 mm y tiene suficiente flexibilidad para no romperse, como se muestra en la ilustración 25.

*Ilustración 20 Película impermeable generada por el fluido después de agregar los aditivos.*

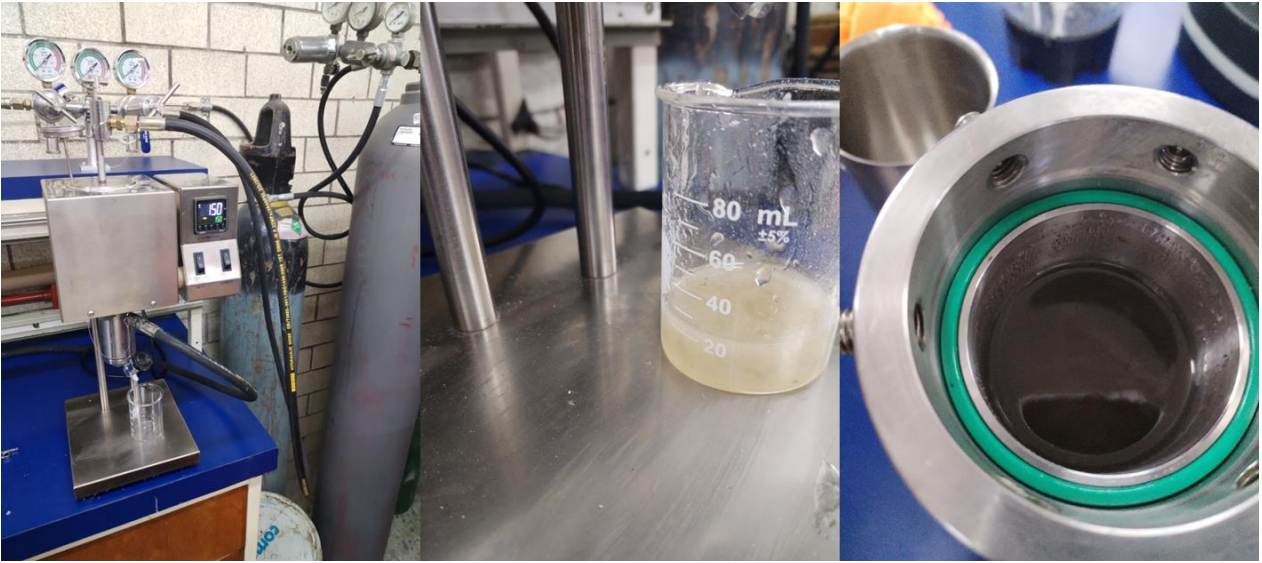


### **4.3.3 Filtro prensa de alta presión y temperatura.**

La prueba de filtrado de alta presión y temperatura o HPHT, por sus siglas en inglés, es aquella que nos permite evaluar las capacidades de impermeabilidad que el fluido puede ofrecer. Dentro de los alcances de la evaluación a el fluido desarrollado se obtuvieron los siguientes resultados evaluando el fluido propuesto, con densidad de  $1.20 \text{ gr/cm}^3$  con una concentración polimérica de 1.2%, a condiciones de alta temperatura,  $150^\circ\text{C}$ , y a una presión diferencial de 500 psi.

En esta prueba se obtuvo un resultado de filtrado de 20 ml, como se muestra en la ilustración 26.

*Ilustración 21 Prueba filtro prensa HPHT.*



#### **4.3.4 Horno de rolado**

El horno de rolado se trata de un equipo el cual nos permite someter el fluido de análisis a condiciones dinámicas con temperatura estable. En esta prueba el fluido propuesto se sometió, durante un periodo de 24 horas, a condiciones de 100 °C. Posteriormente se deja enfriar a temperatura ambiente y nuevamente se obtiene su comportamiento reológico mediante el uso del viscosímetro rotacional.

Ilustración 22 Fluido propuesto después de la prueba de horno de rolado.



A continuación, se mostrarán las pruebas reológicas realizadas al fluido de terminación con densidades de 1.10, 1.15 y 1.20 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabla 16 Reología después de horno de rolado.

Reología después del horno de rolado			
RPM	Densidad gr/cm <sup>3</sup>		
	1.10	1.15	1.20
3	6	4	4
6	7	5	6
100	13	15	12
200	20	22	18
300	25	27	23
600	35	38	31

Gráfica 11 Comportamiento reológico de diferentes densidades después del horno de rolado

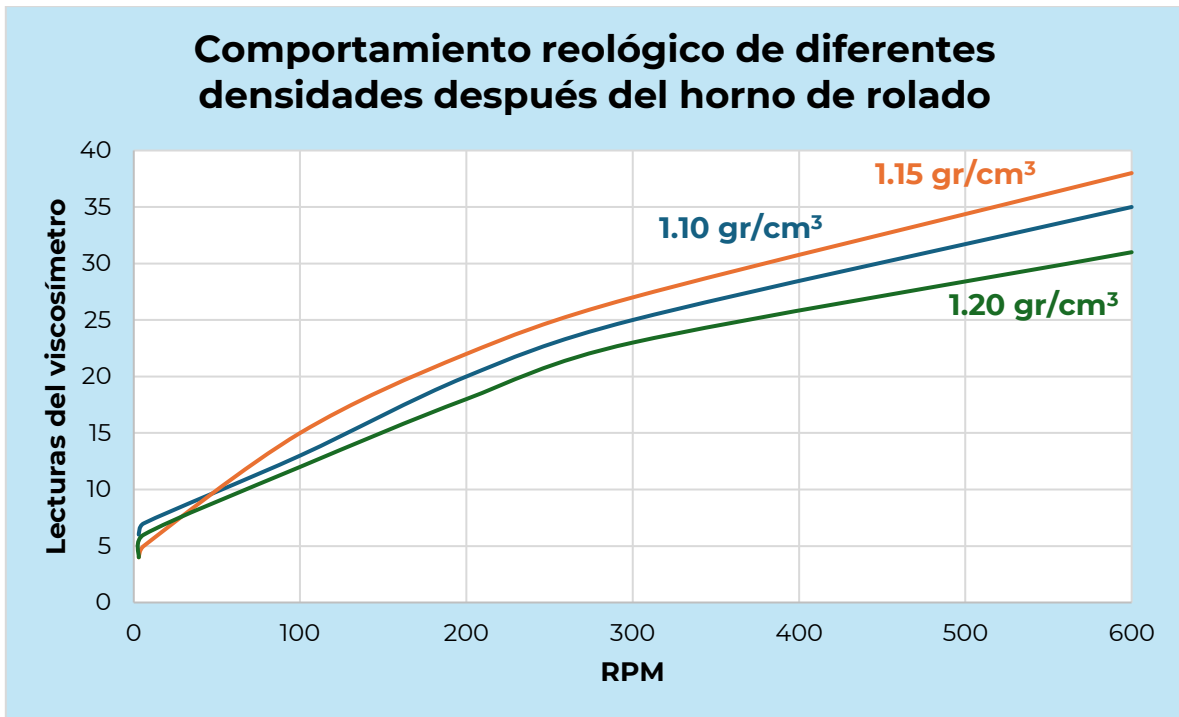


Tabla 17 Viscosidad aparente, plástica y punto de cedencia después del horno de rolado.

	Cálculos después de horno de rolado		
	Densidad gr/cm <sup>3</sup>		
	1.10	1.15	1.2
Viscosidad aparente cP	17.5	19	15.5
Viscosidad plástica cP	10	11	8
Punto de cedencia lb/100ft <sup>2</sup>	15	16	15



### 4.3.5 Tiempo Marsh

Parte de la caracterización del fluido propuesto es la medición de tiempos de escurrimiento Marsh. Sin embargo, debido a las limitantes de cantidad de los materiales necesarios para la elaboración del fluido propuesto solo se realizaron dos pruebas de embudo Marsh para una densidad de 1.20 gr/cm<sup>3</sup>, ambas a temperatura ambiente, una previo a calentamiento y otra después de someterse a una temperatura de 120°F, las cuales se muestran en la tabla 18.

Tabla 18 Tiempo Marsh.

TIEMPO MARSH (s)		
	Previo a temperatura	Posterior a temperatura
Lectura 1	34.19	35.35
Lectura 2	33.13	35.42
Lectura 3	32.49	35.18
Promedio	<b>33.27</b>	<b>35.32</b>

### 4.3.6 Observaciones.

De acuerdo con las características y propiedades observadas en la elaboración del fluido de terminación, se puede aseverar que el comportamiento reológico es adecuado de acuerdo con su viscosidad y tixotropía.

La temperatura afecta su reología, pero su desempeño no se ve comprometido y puede seguirse utilizando.

Una clave importante del uso de este polímero es que, durante el periodo de experimentación, el cual fue cercano a un año, no se observó crecimiento bacteriano a simple vista.

Otro punto importante que resaltar es que al dejar el fluido en reposo por una semana el volumen agua que se separa es muy bajo debido al uso de este polímero experimental.

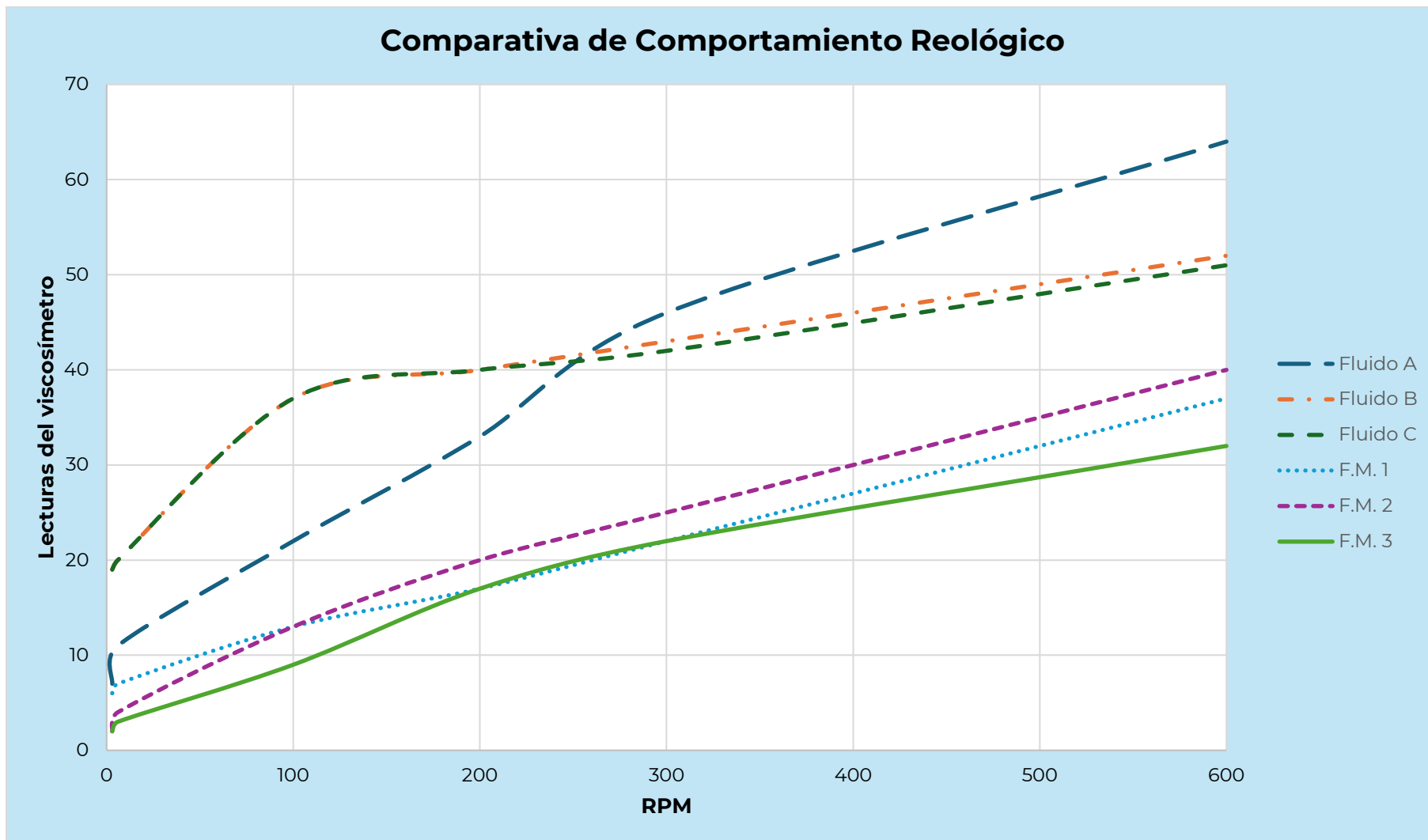
## 5 Comparativa reológica

Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación de la reología del fluido propuesto con fluidos de terminación que son utilizados en campo, a estos fluidos nos referiremos como A, B y C.

Tabla 19 Datos de fluidos de campo y de laboratorio.

<b>Datos de los fluidos comparados</b>						
	<b>Fluidos de campo</b>			<b>Fluido modificado de laboratorio</b>		
<b>Densidad</b>						
<b>[gr/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>1.25</b>	<b>1.02</b>	<b>1.02</b>	<b>1.10</b>	<b>1.15</b>	<b>1.20</b>
<b>Datos de viscosidad</b>						
<b>Viscosidad aparente [cP]</b>	32	26	25.5	18.5	20	16
<b>Viscosidad plástica [cP]</b>	18	9	9	15	15	10
<b>Punto de cedencia [lb/100ft<sup>2</sup>]</b>	28	34	33	7	10	12
<b>Viscosidad Marsh [s]</b>	60	72	58	-	-	35
<b>Temperatura</b>						
<b>[°F]</b>	120	106	-	75	75	75
<b>Lecturas del viscosímetro</b>						
<b>RPM</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>F.M. 1</b>	<b>F.M. 2</b>	<b>F.M. 3</b>
<b>3</b>	7	19	19	6	2	2
<b>6</b>	11	20	20	7	4	3
<b>100</b>	22	37	37	13	13	9
<b>200</b>	33	40	40	17	20	17
<b>300</b>	46	43	42	22	25	22
<b>600</b>	64	52	51	37	40	32

Gráfica 12 Comparativa de Comportamiento Reológico.



Como se puede observar en la gráfica 12 y la tabla 19, el comportamiento reológico de los fluidos A, B y C corresponden a un fluido de Herschel-Bulkley. Comparando con el comportamiento del fluido propuesto, se puede afirmar que este fluido también corresponde a un fluido de Herschel-Bulkley.

De los comportamientos reológicos anteriores se denota que los fluidos A, B y C tienen una reología más elevada a pesar de que los fluidos B y C tienen una menor densidad y el fluido A tiene una mayor densidad respecto al fluido propuesto. De este comportamiento podemos afirmar que los fluidos A, B y C necesitan una mayor energía para ser desplazados, contrastando con el fluido propuesto.

## **6 Cálculos previos a la aplicación en simulador instrumentado a escala laboratorio.**

En este capítulo se ejemplifica la obtención del volumen requerido de fluido para su aplicación en el simulador desarrollado en el proyecto PAPIME PE108424 a través del uso de planos isométricos referentes al simulador instrumentado a escala laboratorio.

## 6.1 Prototipo de laboratorio.

Ilustración 23 Plano aéreo (a) tomado del manual de uso para el simulador de flujos e influjos.

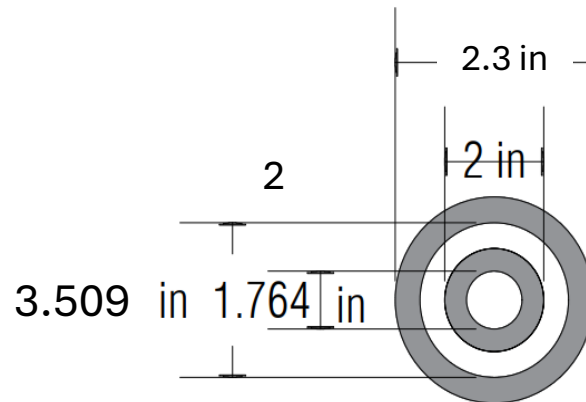
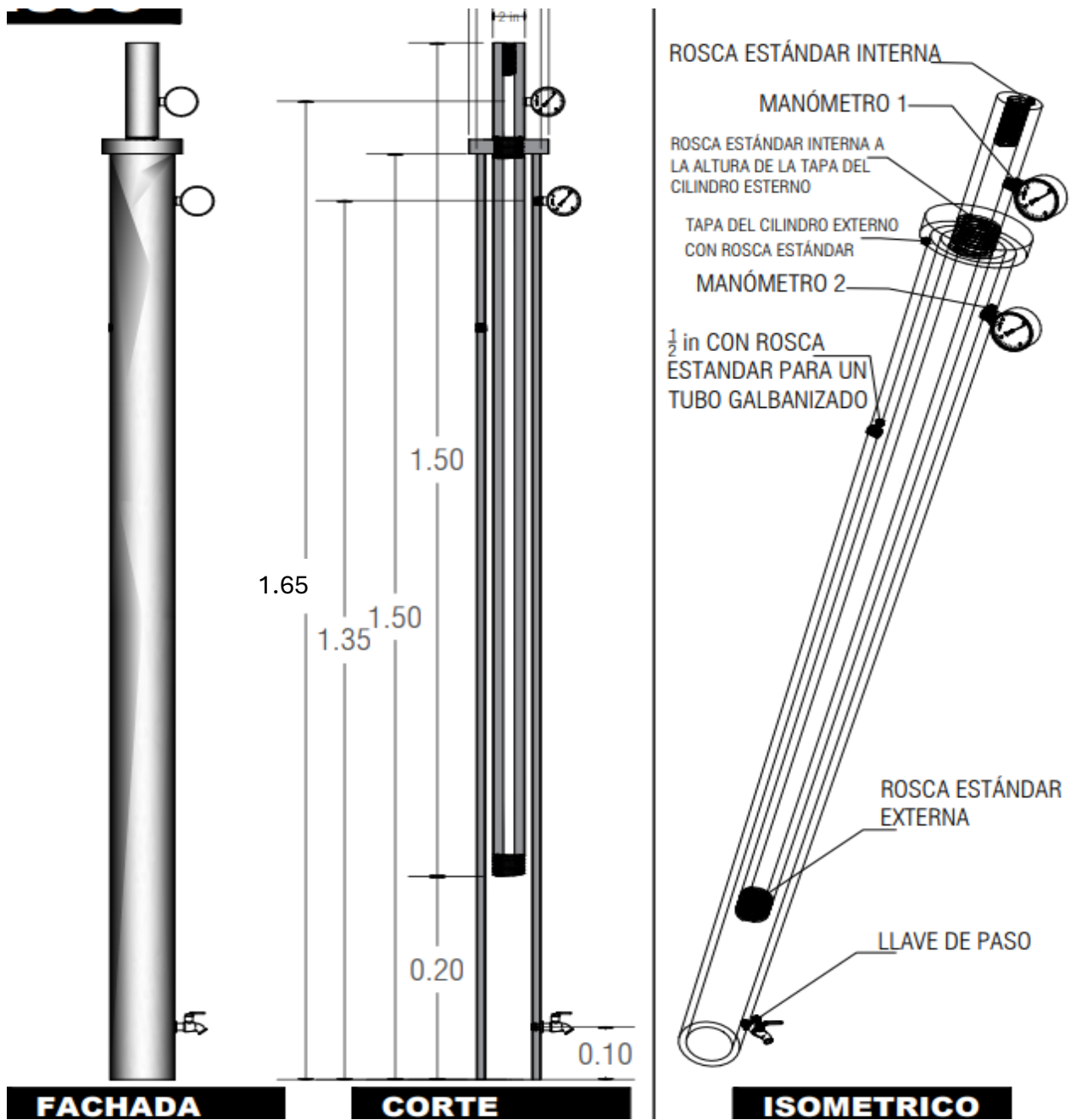


Ilustración 24 Piezas del plano aéreo tomado del manual de uso para el simulador de flujos e influjos.



Ilustración 25 Plano arquitectónico aéreo (b) tomado del manual de uso para el simulador de flujos e influjos.



## 6.2 Cálculos de volumen de fluido.

Se comienza con el cálculo de factor del volumen anular por la longitud del simulador:

$$C_{an+t} = \frac{(ID_{casing}^2 - OD_t^2 + ID_t^2)}{1029.4}$$

*Ecuación 6*

$$C_{an+t} = \frac{(3.509^2 - 2.3^2 + 2^2)}{1029.4} = 0.010708 \left[ \frac{bbl}{ft} \right]$$

*Ecuación 7*

Este factor de volumen deberá ser multiplicado por la altura que comprenden los tubos del simulador:

$$Volumen \ a \ utilizar = \left( 0.010708 \left[ \frac{bbl}{ft} \right] \right) \left( \frac{3.28 \ [ft]}{1 \ [m]} \right) (1.65 \ [m]) = 0.050793 \ [bbl]$$

*Ecuación 8*

Se realiza la conversión de unidades a escala laboratorio:

$$Volumen \ a \ utilizar = (0.050793 \ [bbl]) \left( \frac{159 \ [l]}{1 \ [bbl]} \right) = 9.21 \ [l]$$

*Ecuación 9*

El volumen calculado es únicamente para el fluido de terminación a utilizar en el espacio anular. Se agregará 1 litro más de bache espaciador y 10 litros más de fluido de perforación ya que se busca ver la interacción entre todos estos y lograr una mejor visualización de cómo se lleva a cabo un procedimiento real, a escala laboratorio.

## **7 Aplicación en simulador instrumentado a escala laboratorio.**

En el desarrollo del proyecto PAPIME PE108424 se planteó la aplicación de fluidos de control en el simulador instrumentado a escala laboratorio. En este trabajo se promueve el uso de este simulador mediante la representación de la operación de terminación.

Se plantea el análisis del procedimiento de terminación, de cómo el fluido de terminación desplaza a el fluido de trabajo, haciendo especial énfasis en la interacción de dichos fluidos dentro del simulador.

Para realizar la simulación de esta operación se contempla que el simulador debe estar lleno de fluido de trabajo, posteriormente se bombea la cantidad necesaria de fluido de terminación para desplazar el fluido de trabajo en el espacio anular, de tal manera que el simulador este lleno de fluido de terminación.

A continuación, se muestran imágenes de este procedimiento. Se debe de considerar que, por practicidad, se tomó agua como fluido de trabajo, posteriormente, se realizó una prueba donde se propició la interacción de fluido de perforación bentonítico base acuosa con el fluido de terminación propuesto.



Ilustración 26 Desplazamiento de fluido de trabajo con fluido de terminación.



En la ilustración 31 se aprecia la interacción del fluido de terminación con el agua donde el bombeo de fluido de terminación estaba comenzando. Se observa la zona de transición entre estos fluidos dentro del simulador donde, a pesar de notarse que se mezclan, se desplazó por completo el fluido de trabajo.

Cabe mencionar que este procedimiento realizado en el simulador se puede recrear con algún otro fluido de naturaleza acuosa.

*Ilustración 27 Simulador lleno de fluido de terminación.*



En la ilustración 32 se observa el simulador lleno de fluido de terminación. En este punto ya se había bombeado la totalidad de fluido, logrando desplazar toda el agua presente en el simulador.

Con esta acción se finaliza la simulación de bombeo de fluido de terminación en el simulador instrumentado a escala laboratorio.

*Ilustración 28 Interacción de fluido de terminación con fluido de perforación.*



La ilustración 33 corresponde a la prueba posterior de interacción entre el fluido de terminación propuesto con un fluido de perforación bentonítico base acuosa. Se destaca la inmiscibilidad de estos fluidos, lo que comprueba que el fluido desarrollado no genera interacciones inesperadas con el fluido de perforación, permitiendo que el fluido propuesto pueda desplazar al fluido de trabajo.

## 8 Conclusiones y recomendaciones.

- **Conclusiones**

- Uno de los principales aportes del desarrollo de este fluido es evitar el uso de agua dulce en el proceso de elaboración, ayudando a preservar este recurso de vital importancia. A través de este desarrollo se implementa el uso de agua marina sin ningún tratamiento especial, es decir, se utiliza directamente extraída del mar, lo que permite la elaboración del fluido en el lugar de trabajo.

Derivado de las observaciones anteriores se genera un impacto económico y en tiempos de operación relacionados con la preparación in situ, dicho de otra manera, no es necesario el uso de un transporte que traslade el fluido previamente preparado hasta la locación.

- La presente tesis propone el uso de un polímero de origen natural como viscosificante en fluidos de terminación base salmueras. Tradicionalmente el empleo de la carboximetilcelulosa es el más común como un viscosificante en ambientes acuosos para fluidos de terminación, sin embargo, este polímero presenta temas como la floculación y, debido a su naturaleza, genera condiciones donde prolifera el crecimiento bacteriano; contrastando con polímero propuesto el cual, a reserva de realizar una prueba de crecimiento bacteriano, no ha presentado esta problemática.

- Se deben destacar las propiedades de densidad y pH en el ámbito del rango y control de estas. Relacionado con la densidad, se tiene un rango de control, desde  $1.02 \text{ gr/cm}^3$  hasta  $1.20 \text{ gr/cm}^3$ , en función de concentración de sal adicionada.

Con respecto al control de pH se deben notar los rangos con aditivos y sin aditivos. Sin aditivos, el fluido propuesto se caracteriza por tener un pH neutro. Con los aditivos anticorrosivo y anticristalizantes, debido a su naturaleza ácida, contamos con un pH de 5, añadiendo el agente alcalinizante, dependiendo de

su concentración, nos permitirá alcalinizar el fluido en función de la compatibilidad de la formación.

- Una característica adicional por destacar es la gelificación que el fluido presenta, la cual se rompe con poca energía, es decir, la gelificación evita la separación de las fases y en caso de ser necesario el fluido podría ser recirculado.

- **Recomendaciones**

- En operaciones de perforación costa afuera se suele utilizar una técnica llamada pump and dump, esta consiste en perforar la primer etapa del pozo, hasta la tubería de revestimiento superficial o, de ser necesario, hasta la tubería de revestimiento intermedia, sin el uso de BOP (*Blow Out Preventor*).

Es importante evidenciar que en la perforación pump and dump no se cuenta con retorno de fluidos de perforación en superficie. Estos, al tratarse de una mezcla de fluidos de alta densidad y agua de mar, al ser bombeados directamente en el lecho marino, provocan una contaminación ambiental.

El fluido propuesto puede fungir como una alternativa de fluido de perforación en la técnica pump and dump. Debido a la naturaleza orgánica del polímero experimental, a la compatibilidad de este con el uso de agua de mar y a que se propone, como densificante, la sal marina, puede ser beneficioso en el aspecto de la reducción del impacto ambiental que se provoca al verter residuos en el lecho marino.

- Adicional al desarrollo experimental y pruebas de laboratorio al fluido se deben realizar evaluaciones de corrosión, crecimiento bacteriano, biodegradabilidad, miscibilidad en ambientes marinos e impacto ambiental.

- **ANEXO**

- Costos

A continuación, se mostrará el costo promedio de la elaboración del fluido experimental propuesto. Sin embargo, se debe realizar una observación referente al polímero experimental y los inhibidores de cristalización y corrosión ya que estos se lograron obtener en grado alimenticio, lo que afecta directamente los costos de adquisición.

Se recomienda realizar una búsqueda de proveedores que puedan proporcionar los materiales antes referidos en grandes cantidades, sin ser necesario que estos productos cuenten con la aprobación de grado alimenticio.

*Tabla 20 Costos de fabricación del fluido propuesto.*

<b>Materiales</b>	<b>Costo por unidad \$ MXN</b>	<b>Cantidad por utilizar por litro</b>	<b>Costo por litro \$ MXN</b>
Agua de mar	0.00	1000 ml	0.00
Sal de mar	0.06	360 gr	19.80
Alcalinizante	0.09	2 ml	0.18
Polímero experimental	0.63	12 gr	7.50
Inhibidor de cristalización	0.70	1 gr	0.70
Inhibidor de corrosión	2.20	1 gr	2.20
Agente estabilizante	0.17	30 ml	5.10
<b>Costo total por litro</b>			35.48
<b>Costo total por barril</b>			5641.32

## 9 Bibliografía

Austin, E. (2012). *Drilling Engineering handbook*. Springer Science & Business Media.

Basurto, H. C. (05 de 11 de 2025). Obtenido de ptolomeo unam: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/RepoFi/18471/Tesis.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Caenn R. Darley, H. &. (2016). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Gulf Professional Publishing.

Facultad de Ingeniería. (2023). *Manual de prácticas del laboratorio de fluidos de perforacion de pozos*. Ciudad de México.

IADC. (2015). *Drilling manual*. Texas: IADC.

IADC. (2015). *WellSharp course*. Texas: IADC.

IADC. (2019). *Well control manual*. Texas: IADC.

Tetra technologies inc. (2007). *Engineered solutions guide for clear brine fluids and filtration*. Texas: Tetra technologies.