

01/24
28



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

"ANALISIS DEL EFECTO DE LA FRACCION DE GAS SOBRE
LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS ESPUMOSOS".

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
ALEJANDRINA MOTA PERALTA

DIRECTOR: ING. CRISTINA AVILES ALCANTARA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CD. UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

MARZO DE 2003

A





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-0043

SRITA. ALEJANDRINA MOTA PERALTA
Presente

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Ing. María Cristina Avilés Alcántara y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

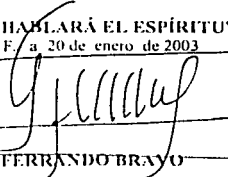
ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FRACCIÓN DE GAS SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS ESPUMOSOS

- I INTRODUCCIÓN
- II FUNDAMENTOS TEÓRICOS
- III FLUIDOS ESPUMOSOS
- IV EXPERIMENTACIÓN
- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- APÉNDICE
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F. a 20 de enero de 2003
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAYO

GFB*RLLR*ggg
P

Autorizo a la Dirección General de DISEÑO
UNAM a difundir en formato electrónico el
contenido de mi trabajo recepc.

NOMBRE: MOTA PERALTA
ALEJANDRINA
FECHA: 8 de Abril 2003
C.M.O.: SPERALTA

B

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Tesis:

**"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA FRACCIÓN DE GAS SOBRE LAS PROPIEDADES
DE LOS FLUIDOS ESPUMOSOS"**

Presentada por:

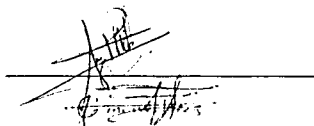
MOTA PERALTA ALEJANDRINA

Dirigida por:

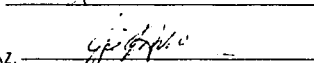
ING. CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA

Jurado:

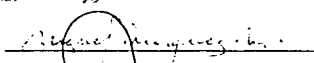
Presidente: **M. I. JOSÉ MARTINEZ PÉREZ.**



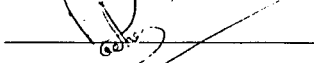
Vocal: **ING. CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA.**



Secretario: **ING. MA. GUADALUPE CONTRERAS ORDAZ.**



1er. Suplente: **M. C. MIGUEL MARQUEZ MARTÍNEZ.**



2do. Suplente: **ING. GERARDO PACHECO HERNÁNDEZ.**



Ciudad Universitaria, México, D: F., Marzo de 2003.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios que me permitió lograr esta meta tan importante para mí.

Mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi "Alma Mater",

A mis profesores, compañeros, amigos y familiares que me acompañaron en esta etapa de mi vida,

Al Ing. José Martínez Pérez por su apoyo, confianza y amistad que me ha brindado todo el tiempo,

A la Ing. Eva Sánchez Olea y al Ing. José A. González Guevara por tener mucho corazón y su ayuda desinteresada,

En forma muy especial a mi Madre María Elena Peralta y Campa porque siempre conté con su apoyo para seguir adelante en los momentos difíciles.

Alejandrina

CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
I.1 Fluidos de control	1
I.1.1 Tipos de fluidos de Control	1
I.2 Teoría de las emulsiones	5
I.2.1 Tipos de emulsiones	5
I.2.2 Propiedades físicas	7
I.2.3 Estabilidad de una emulsión	12
I.2.4 Mecanismo de acción de los emulsificantes	13
I.3 Espuma	14
I.3.1 Formación de la espuma	16
I.3.2 Diferentes tipos de espuma	16
I.3.4 Estabilidad de la espuma	17
CAPÍTULO II FLUIDOS ESPUMOSOS	20
II.1 Tipo de viscosificante	22
II.2 Definición de calidad	23
II.3 Caracterización de la espuma	24
II.4 Propiedades reológicas	26
II.5 Efectos de la fracción de gas	29
II.6 Efectos de la concentración	29
II.7 Efectos de la temperatura	30
II.8 Efecto del surfactante	30
II.9 Capacidad de acarreo de los recortes	31
II.10 Estabilidad de los fluidos espumosos	32
II.11 Comportamiento de flujo	33
II.12 Beneficios	34

CAPITULO III EXPERIMENTACIÓN	36
III.1 Procedimiento	38
III.2 Procesamiento de los datos	45
CAPITULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	53
CONCLUSIONES	69
APÉNDICE	72
BIBLIOGRAFÍA	74

RESUMEN

El propósito de esta tesis es proporcionar información del análisis de las propiedades de los fluidos espumosos con respecto a la presencia de la fracción de gas.

En el primer capítulo trata los fundamentos teóricos de los fluidos de control, se mencionan los conceptos básicos de la teoría de las emulsiones, así como explicar el concepto de las espumas, base para entender la importancia del tema.

En el segundo capítulo describe las características de las espumas como fluidos de control a fin de entender las ventajas de la utilización de esta tecnología en la perforación de pozos en la Región Marina.

El tercer capítulo describe el diseño experimental empleado para la preparación de las espumas como fluido de control, y el procedimiento para evaluar las propiedades de los fluidos importantes en las operaciones de perforación de pozos.

El cuarto capítulo presenta el análisis y discusión de los resultados de los datos obtenidos en la experimentación; proporcionando información suficiente para observar el efecto de la fracción de gas sobre las propiedades evaluadas, determinando así la eficiencia del fluido.

Por último se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación experimental.

**TESIS CON
FALLA DE
ORIGEN**

INTRODUCCIÓN

El campo Cantarell es el más importantes de México, se ubica a 85 km al norte de Ciudad del Carmen; la profundidad del mar en que se ubica el yacimiento varía de 35 a 40 metros. El campo cubre un área de 134 km². Representa una porción sustancial de las reservas, la producción y la exportación del país.

La evolución del Campo Cantarell en sus etapas de desarrollo y de explotación, ha originado un abatimiento de la presión; presenta pérdidas totales y parciales de circulación durante la perforación, que se deben a la geología del yacimiento, ya que se considera un yacimiento naturalmente fracturado, así como por consecuentes problemas de inestabilidad previos y dentro de la zona productora, la formación del casquete de gas y la inestabilidad de arcillas a la altura de Paleoceno Superior, Paleoceno Inferior y del Cretácico Medio.

En el campo Cantarell, la perforación de la formación Brecha Paleoceno Cretácico Superior (BPKS) representa incremento de tiempos y costos por los siguientes aspectos:

- La existencia de cuerpos arcillosos implica la utilización de un lodo con alto contenido de diesel, considerado como un fluido de baja densidad.
- Alto consumo de fluidos de perforación al perforar la etapa con pérdida total de circulación y tiempos no productivos por espera de materiales para preparar el lodo, sin olvidar la Logística.

El impacto económico que se tiene debido al costo por concepto del fluido perdido durante la perforación, y al costo de equipo derivado de las desviaciones en el tiempo del programa de perforación (espera de barcos con fluidos y materiales para el suministro y/o generación del fluido de perforación), representa una parte de la problemática que presenta el campo y que se pretende resolver con otras tecnologías.

La industria petrolera mexicana interesada en buscar nuevas alternativas que aporten la mayor rentabilidad económica en la extracción de los hidrocarburos, ha realizado un análisis para las posibles soluciones de la problemática que se presenta en el campo Cantarell.

De las alternativas para disminuir los tiempos y los costos de la perforación en zonas de pérdida de circulación, siendo las más importantes:

- Perforación bajo balance
- Fluido espumoso
- Utilización de liners de sacrificio
- Tuberías de revestimiento expandibles

El Instituto Mexicano del Petróleo en apoyo a las necesidades de la industria petrolera mexicana, investiga la utilización de fluidos alternos como son los fluidos aireados, fluidos espumosos empleando aire los cuales puedan dar una solución a la problemática en la Región Marina.

En el presente trabajo se realiza un análisis de los fluidos espumosos con respecto a su comportamiento reológico, de acuerdo al efecto de la relación de aire atrapado en el fluido.

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

I.1 Fluidos de control

Definición:

Es el fluido circulatorio que se utiliza en un equipo de perforación o terminación de pozo, formado por una mezcla de aditivos químicos que proporcionan propiedades físicas y químicas idóneas a las condiciones operativas y a las características de la formación litológica a perforar[1].

I.1.1 Tipos de Fluidos de control

La descripción de los tipos de fluidos de control, utilizados en la industria del petróleo, se presentan a continuación:

Fluidos Neumáticos

Existen fluidos que se emplean para perforar zonas o contactos litológicos, que, por su naturaleza requieren de operaciones especiales, como son los fluidos basados en aire, gas o espuma, conocidos como fluidos Neumáticos.

Aire seco. El Aire seco es ideal para obtener altos valores de velocidad de penetración. Su aplicación queda restringida por agujeros inestables, formaciones productoras de agua y factores económicos. La posibilidad de explosiones en el agujero, debida a una mezcla crítica de aire con metano, es siempre una amenaza[2].

Niebla. La perforación con niebla es la perforación de aire seco con pequeñas cantidades de agua y surfactantes espumosos, inyectados a altas velocidades en una corriente de aire. La niebla se puede usar para perforar zonas donde se encuentran pequeñas cantidades de agua de formación[2].

Espuma. Los fluidos de espuma se elaboran inyectando agua y surfactantes o polímeros para formar una espuma viscosa con una capacidad de acarreo alta.

Las espumas se utilizan cuando existen flujos débiles en las formaciones atravesadas. En comparación con el aire, la espuma ejerce una presión mayor, que actúa sobre los fluidos de las formaciones[2].

Fluidos aireados. Estos fluidos se elaboran inyectando aire y una mezcla gelatinosa. Estos fluidos son usados para perforar formaciones con baja presión, en ocasiones se utilizan en zonas de pérdida de circulación[2].

Fluidos Base Agua

Los fluidos base agua se clasifican por la resistencia a los tipos de contaminantes de la formación y a sus temperaturas, los cuales se van transformando en su formulación por la incorporación de flujos como gases, sal, arcillas y líquidos propios de la formación[1].

Fluido Bentonítico. El fluido de perforación es tratado con bentonita, que se puede utilizar en la perforación de pozos someros en áreas no problemáticas[2].

Fluido Bentonítico Polimérico. Estos fluidos de control incorporan polímeros con pesos moleculares altos y, son utilizados para encapsular sólidos con el objeto de prevenir la dispersión e inhibición de las capas de las lutitas o para incrementar la viscosidad y reducir la pérdida de fluido. Varios tipos de polímeros están disponibles para este propósito como la celulosa y productos basados en gomas naturales. Frecuentemente las sales inhibidoras tales como cloruro de potasio o cloruro de sodio son usadas para proveer una mayor estabilidad a las lutitas[3].

Es empleado para perforar formaciones de bajo contenido de arcillas; su objetivo es que los sólidos se floculan para facilitar su desplazamiento y así mejorar la estabilidad y características de perforación.

Fluido Agua de Mar. Los fluidos saturados de sal tienen una concentración de cloruro cercana a 190,000 mg/L, los niveles más bajos son referidos a fluidos de agua de mar o agua salobre. Los fluidos salados son preparados usualmente a partir de agua salobre y agua de mar[3].

Fluido Disperso - No Inhibido. Se utilizan dispersantes químicos para deflocular a la bentonita sódica, no se utilizan iones de inhibición, ya que los dispersantes van a actuar sobre los sólidos perforados, maximizando su dispersión.

La viscosidad del sistema es controlada con facilidad mediante el uso de dispersantes. Se trata de un sistema con buena tolerancia a los contaminantes más comunes y a grandes contenidos de sólidos. Además, si se agregan surfactantes y una mayor cantidad de lignitos, resulta excelente para perforar pozos con altas temperaturas[1].

Fluido Disperso – Inhibido. A grandes profundidades donde se requieren altas densidades, o donde las condiciones del agujero pueden ser problemáticas, los fluidos son dispersados frecuentemente con lignosulfonatos y lignito; estos productos químicos son efectivos defloculantes y reductores de filtrado[3].

Fluidos Base Aceite

Los sistemas base aceite son usados para una variedad de aplicaciones donde la estabilidad del fluido y la inhibición son necesarias para pozos con

temperaturas altas, y donde la pegadura de la tubería y la estabilidad del agujero son un problema[3].

La emulsión inversa tiene las características de los fluidos base aceite, ya que el aceite es la fase continua y el filtrado es únicamente aceite. Estos fluidos son estables a altas temperaturas, son inertes a la contaminación química y pueden ser densificados después de ser ajustada la relación agua - aceite. El agua que forma parte del sistema consiste de pequeñas gotas que se hallan dispersas y suspendidas en el aceite. Cada gota de agua actúa como una partícula de sólido.

En las zonas depresionadas, las necesidades actuales para lograr los objetivos de la perforación, requieren fluidos de baja densidad. Este tipo de fluido es sólo aplicable en zonas depresionadas en donde las rocas están fracturadas y son susceptibles de pérdidas de circulación; o en la reparación de pozos en campos productores de gas; para evitar daño a la formación[1].

1.2 Teoría de las Emulsiones

Definición:

La emulsión es un sistema de dos fases que consiste de dos líquidos parcialmente miscibles, uno de los cuales es dispersado en el otro en forma de glóbulos. La fase dispersa o interna es el líquido desintegrado en glóbulos, el líquido circundante es la fase continua o externa[5].

La suspensión es un sistema de dos fases muy semejante a la emulsión, cuya fase dispersa es un sólido. La espuma es un sistema de dos fases similares a la emulsión, en el que la fase dispersa es un gas. La niebla es lo contrario a la espuma: el aire es la fase continua y el líquido la fase dispersa.

1.2.1 Tipos de Emulsiones

El tipo de emulsión depende de la naturaleza de los constituyentes, el modo en que se prepara la misma y de las proporciones relativas de los constituyentes.

Las emulsiones pueden pertenecer a cualquiera de los dos siguientes tipos: Aceite en agua (o/w) donde la fase continua es el agua, o bien agua en aceite (w/o) donde la fase continua es el aceite (Fig.1). En muchos casos se puede transformar una emulsión aceite-agua a agua-aceite, o viceversa, por pequeñas modificaciones en el sistema. A este fenómeno se le conoce como inversión[5].

La relación de volúmenes respectivos de las dos fases líquidas es una característica importante en una emulsión. La inversión a veces se puede dar cambiando esta simple relación[5].

En ocasiones no está claramente definido el tipo de emulsión, pues la fase interna y externa en vez de ser homogénea, contiene porciones de la fase contraria; una emulsión de esta clase se llama emulsión dual.



Fig. 1. Esquema : A. Agua y aceite. B. Emulsión agua en aceite. C. Emulsión aceite en agua.

1.2.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de una emulsión indican la estabilidad del sistema, estas propiedades son dependientes de la composición y de la manera en la cual la emulsión fue preparada[5].

Solubilidad de una emulsión

La solubilidad de una emulsión es determinada por la fase continua, si la fase continua es hidrosoluble, la emulsión puede ser diluida en agua, si la fase continua es oleosoluble, la emulsión se puede disolver en aceite. La facilidad con que se puede disolver una emulsión se puede aumentar reduciendo la viscosidad de la emulsión[5].

Tamaño de la Partícula

La fase interna de una emulsión se dispersa en gotas con un diámetro de 250 nm y las más grandes alcanzan un diámetro 100 veces mayor. Aún en una emulsión sencilla los diámetros de las gotas pueden estar lejos de ser uniformes[5].

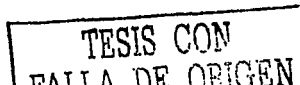
La distribución del tamaño de las gotas con un máximo de gotas de pequeño diámetro, en apariencia representa una situación de estabilidad máxima.

El tamaño de las partículas es gobernado por la cantidad y la eficacia del emulsificante, el orden de la mezcla y la clase de agitación que se haga; Si se reduce poco a poco el tamaño de las partículas varía el color y el aspecto de la emulsión[5].

Movimiento Browniano

Las partículas que forman suspensiones se ven en movimiento de zigzag continuo, cuando se observan a través de un microscopio. Esto es lo que se conoce como movimiento Browniano[5].

El movimiento es producido por bombardeo real de las partículas por las moléculas del medio en suspensión. El movimiento Browniano tiene un efecto negativo en la estabilidad de las gotas pequeñas de la emulsión, debido a que aumenta la probabilidad de colisión entre partículas y de aquí, la coagulación[5].



Viscosidad

Desde el punto de vista teórico, las medidas de viscosidad unidas con la teoría hidrodinámica, dan suficiente información acerca de la estructura de las emulsiones y son con frecuencia una guía para su estabilidad[5].

La viscosidad de una emulsión, cuando hay exceso de fase continua es virtualmente la viscosidad de dicha fase. Al aumentar la proporción de la fase dispersa aumenta la viscosidad de la emulsión hasta un punto en que la emulsión deja de ser líquida. Cuando el volumen de la fase dispersa sobrepasa el de la fase continua, se aglomeran las partículas de la emulsión y la viscosidad aparente es parcialmente viscosidad estructural[5].

La viscosidad de las emulsiones puede ser afectada notablemente por los cambios relativamente mínimos en la naturaleza y en la concentración del emulsificante[5].

Una viscosidad elevada disminuye la frecuencia de las colisiones entre los glóbulos dispersados y por lo tanto la energía de colisión resulta ser favorable a la estabilidad de la emulsión.

La viscosidad de una emulsión se incrementa cuando se incrementa la proporción la fase dispersa, pero el principal incremento sucede cuando la fase dispersa excede el 40%. Por ejemplo. Una emulsión aceite en agua tiene un viscosidad de 12 cp cuando el contenido del aceite fue de 40%, 35 cp cuando el contenido fue de 60%.

Se puede modificar la viscosidad de una emulsión de la siguiente manera:

a) Para reducir la viscosidad:

1. Se aumenta la proporción de la fase continua.
2. Se reduce la viscosidad de la fase continua.

b) Para aumentar la viscosidad:

1. Se agregan esperadores, como gomas y geles.
2. Se aumenta la proporción de la fase dispersa.
3. Se reduce el tamaño de la partícula de la emulsión.
4. Se incorpora aire en estado de división fina.

Los factores que pueden afectar las propiedades reológicas de las emulsiones son los siguientes:

- La viscosidad de la fase continua
- Concentración en volumen de la fase dispersa.
- Viscosidad de la fase dispersa.
- Naturaleza del agente emulsionante y la película interfacial formada en la interfase.
- Efecto electroviscoso.
- Distribución de tamaño de la partícula.

La mayor parte de las emulsiones indican una proporcionalidad directa entre la viscosidad de la emulsión y la fase continua. En muchas emulsiones el agente emulsionante se disuelve en la fase continua. Esto es de especial importancia cuando se añaden agentes estabilizantes coloidales (tales como gomas), puesto que tienen un efecto notorio sobre la viscosidad.

Tamaño de gota y distribución de tamaño.

La presencia y concentración del emulsionante y de la interfase originada tiene un efecto sobre el tamaño de la partícula y distribución del tamaño de los glóbulos de la emulsión, y esto, a su vez, tiene un efecto en la viscosidad de la emulsión[5].

Para emulsiones aceite en agua y agua en aceite, la estructura de sus respectivas películas estabilizadoras interfaciales del agente emulsionante es diferente. Los glóbulos en emulsiones agua en aceite se comportan como esferas indeformables, mientras que las gotas de los sistemas aceite en agua se deforman con una velocidad de corte aplicada.

Las emulsiones que tienen un tamaño de partícula similar, a bajas velocidades de corte, muestran que las viscosidades son más altas en emulsiones que presentan películas interfaciales en estado más condensado, que también corresponde con las tensiones interfaciales más bajas.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la forma más conveniente de distinguir entre las emulsiones aceite en agua (o/w) y agua en aceite (w/o).

Los estudios de conductividad de las emulsiones están ampliamente relacionados con las emulsiones de petróleo. Esto es de esperar puesto que los métodos eléctricos se emplean para la separación de tales emulsiones.

1.2.3 Estabilidad de una Emulsión:

La estabilidad de una emulsión es la propiedad más importante, y el sistema no será clasificado como emulsión si no cumple con un mínimo de estabilidad. Se mide la estabilidad por la velocidad con la cual las gotas de la fase dispersa se agrupan para formar una masa de líquido cada vez mayor que se separa por gravedad.

El agente emulsificante no es siempre un cuerpo soluble, sino quizás un sólido muy finamente dividido, insoluble en los dos líquidos. Para las emulsiones industriales se busca generalmente una buena estabilidad en condiciones de almacenamiento.

En general, se representa la estabilidad por el tiempo de conservación sin ruptura de una emulsión en condiciones normales de almacenamiento; aunque también hay pruebas aceleradas de estabilidad, aumentando el efecto gravitacional mediante el fenómeno de centrifugación y determinando la velocidad de separación de las dos fases. La estabilidad a

temperaturas elevadas, a agentes químicos y la resistencia a la acción mecánica son otras pruebas importantes.

Los dos factores más importantes para la estabilidad de las emulsiones son:

1. La existencia de una película interfacial que se puede considerar como una envoltura alrededor de cada glóbulo dispersado.
2. Una débil tensión interfacial gracias a agentes tensoactivos que se adsorben positivamente en la interfase.

1.2.4 Mecanismo de Acción de los Emulsificantes

La emulsión posee una estabilidad mínima que puede controlarse añadiendo un tensoactivo o sólidos finamente divididos.

Cuando la emulsión se forma, (emulsión aceite en agua) el emulsificante o tensoactivo se coloca en la interfase entre el agua y el aceite con su cadena hidrófoba orientada hacia el aceite y el grupo hidrófilo orientado hacia el agua. En el caso de una emulsión agua en aceite, el grupo hidrófilo está dirigido hacia el interior de los glóbulos acuosos, mientras que la parte hidrófoba se orienta a la fase continua.

La eficacia de un emulsificante depende del modo y la intensidad de la agitación y la forma en que el emulsificante ha sido introducido; el papel de la agitación es dividir las dos fases, de tal forma que una de las fases se convierta en pequeñas gotas.

1.3 Espumas

Definición:

Las espumas son dispersiones aire - líquido, constituidas por un conjunto de burbujas gaseosas separadas por películas delgadas de líquido (lamellae). Los puntos de unión están formados por tres películas adyacentes conocidas como el borde de Plateau, el cual asemeja un conducto triangular aproximadamente (Fig. 2). La curvatura de las paredes del borde de Plateau origina una diferencia de presión entre el líquido que se encuentra en la película y los bordes de Plateau, de modo que las películas comienzan a adelgazarse cada vez más con el tiempo y eventualmente pueden colapsarse promoviendo la destrucción de la espuma.

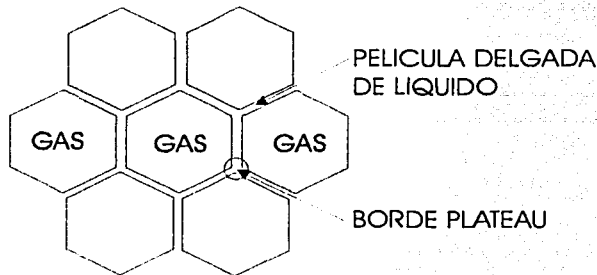


Fig. 2. Estructura de una espuma poliédrica.

Como la presión dentro de la burbuja (P_i) es mayor que la presión en el borde de Plateau (P_e), donde se encuentra la mayor cantidad de líquido; la presión dentro de la película delgada de líquido (P_l) que separa los dos planos paralelos de las superficies de la burbuja es igual a la presión dentro de la burbuja (P_i), lo que significa que la presión de la película es mayor que la presión en el borde de Plateau. En estas condiciones, el líquido que separa a las dos películas drena hacia el borde, hasta que la superficie de ambas burbujas y comienzan a estar en contacto hasta unirse en una sola burbuja, iniciando la destrucción de la espuma (Fig.3).

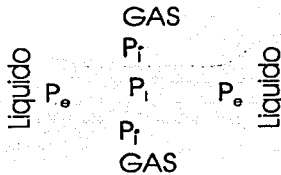


Fig.3. Borde de Plateau y lamellae.

Generalmente, la presencia de agentes tensoactivos aún de débil actividad superficial, favorece la producción y la estabilidad de las espumas. Sin embargo, se ha observado que ciertas sales minerales de tensión superficial alta, dan espumas persistentes, por lo que la tensión superficial no es el único factor que interviene en la formación y estabilidad de las espumas[6].

1.3.1 Formación de la Espuma

Las causas físicas de la formación de espumas son varias: una agitación enérgica del líquido con el aire, la caída del líquido desde una cierta altura, el borboteo de aire u otro gas en el seno de un líquido.

Las causas fisicoquímicas pueden ser: la naturaleza del agua; el agua dulce proporciona por agitación con una solución de jabón una espuma importante y persistente; otra causa es la presencia de impurezas orgánicas y la concentración de ellas; la liberación de gas en una reacción química o bioquímica como el monóxido de carbono[6].

Un líquido puro no produce espuma, ya que no presenta variación de tensión superficial. Por el contrario, si la concentración de soluto es relativamente grande, las capas superficiales están compuestas casi exclusivamente de moléculas de sustancia activa y no hay formación considerable de espuma. Debe haber una diferencia de tensión superficial entre la solución y la capa superficial; mientras más grande sea esta diferencia más consistencia y estabilidad tendrá la espuma.

1.3.2 Diferentes Tipos de Espuma

La célula unitaria de las espumas es una burbuja, ésta puede estar presente en la superficie o en el seno del líquido. En la superficie, un menisco limita el volumen del gas de un lado, mientras que una película líquida limita la burbuja del resto del sistema. La película tiene dos paredes: una externa y

otra interna formada cada una por una capa monomolecular del líquido. La ubicación y la forma de la espuma permite clasificarlas como espumas esféricas u oclusas y las poliédricas o superficiales[6].

Las espumas esféricas están en el interior del líquido y las presiones externas e internas son las mismas, por lo que el sistema está en equilibrio. Las espumas poliédricas o superficiales son consideradas como resultado del resbalamiento del líquido a través de la espuma esférica. Estas espumas están formadas por células de gas separadas, las unas de las otras por finas laminas líquidas. En las espumas poliédricas se presenta la doble capa de Gibbs cuya constitución influye en la estabilidad de la misma[7].

La forma de obtención de la espuma así como la composición del líquido son factores que influyen en el tamaño de las burbujas. Una burbuja en el interior de un líquido tiende a subir ya que la presión hidrostática va disminuyendo por lo que la burbuja tiende a expandirse a medida que se acerca a la superficie, según la Ley de Boyle-Mariotte.

1.3.3 Estabilidad de la Espuma

Los factores que contribuyen a la estabilidad de la espuma son:

1. La repulsión eléctrica de las superficies cargadas por los grupos ionizados del agente espumante impide el adelgazamiento de la película.

2. Los enlaces de hidrógeno que el agua forma con diferentes sustancias, ligan todas las moléculas del líquido entre sí.
3. La viscosidad del medio líquido.
4. La plasticidad de la película líquida así como su elasticidad disminuye la ruptura de la burbuja.

Todas estas fuerzas que se oponen al rompimiento de las espumas dependen de propiedades características de las capas superficiales y de las soluciones de los agentes de superficie que se sitúan en las dos superficies de contacto de las láminas líquidas y del gas que ellas aprisionan.

La adición de sustancias que aumentan la viscosidad de la fase líquida, la presencia de sustancias sólidas finamente pulverizadas y la temperatura, son factores que favorecen la formación de espumas y su estabilidad.

En una burbuja, la presión interna es mayor que la externa: entonces, al buscar el equilibrio de presiones la burbuja crece, ya que entre mayor sea el radio de la burbuja mayor es la presión en exceso, esto explica los mecanismos de ruptura de una espuma, ya que el aire se difunde de la burbuja pequeña hacia la grande a través de la película que las separa y así las burbujas grandes crecen a expensas de las pequeñas hasta que se llegan a romper generalmente en la superficie.

Al crecer una burbuja se va produciendo elasticidad en la película, la elasticidad puede relacionarse con la variación de la tensión superficial por el agente tensoactivo. Una película se rompe cuando alcanza espesores del orden de 5 nm La fuerza de gravedad influye en el adelgazamiento de la película hasta su eventual ruptura, ya que el líquido fluye hacia las paredes verticales y el borde de Plateau sufre una succión de líquido hacia el interior de la pared.

La tensión superficial de un líquido se opone a la formación de una película que forma los lados de las burbujas, por tanto, la disminución de la tensión superficial con la ayuda de sustancias con poder interfacial, permite la formación de espuma.

No hay una relación directa entre la disminución de la tensión superficial y el volumen de la espuma; tampoco hay una relación directa entre el poder espumante y otra propiedad de superficie como la detergencia.

El poder espumante se refiere al grado de aptitud que tienen ciertas sustancias tensoactivas para formar espumas. La detergencia es definida como el desplazamiento de toda clase de contaminaciones grasosas situadas sobre superficies sólidas con ayuda de una solución acuosa(8).

CAPÍTULO II FLUIDOS ESPUMOSOS

La industria del petróleo continúa explorando nuevos caminos para producir hidrocarburos a un costo efectivo; la demanda de nueva tecnología y las innovaciones continúan creciendo. La aplicación de sistemas de fluidos espumosos en la industria del petróleo está ganando aceptación debido a la posibilidad de modificar muchas propiedades deseables de los fluidos espumosos para operaciones de campo.

Actualmente, el fluido espumoso puede prepararse para tener una alta capacidad de acarreo, baja densidad y bajo filtrado, originando un fluido ideal para una perforación bajo balance, por su alta capacidad de acarreo se les usa como fluidos fracturantes, pueden ser recuperados completamente después de las operaciones de fracturamiento y solamente una pequeña cantidad de líquido es colocada en la fractura[9].

Los fluidos espumosos son mezclas complejas de gas, de líquido y un surfactante cuyas propiedades reológicas, el esfuerzo de corte y la viscosidad son influenciadas por parámetros como la temperatura, la presión, las propiedades de la fase líquida, la estabilidad de la espuma, la textura de la espuma, la calidad de la espuma y el tipo y concentración del surfactante[9].

Los cambios en estos parámetros afectan las propiedades de flujo del fluido espumoso y puede cambiar seriamente el comportamiento hidráulico. Este efecto puede afectar la viscosidad, el almacenamiento de energía y la predicción de las pérdidas por fricción[9].

Las espumas pueden ser de tipo acuoso o gelada; las de tipo acuoso tienen baja estabilidad (cerca de 3 a 4 minutos de vida media). Las de tipo gelada tienen viscosidad y estabilidad altas (cerca de 20 a 30 minutos de vida media)[9].

Espumas acuosas

En estudios realizados por otros investigadores a este tipo de espumas se reporta un marcado efecto del resbalamiento de pared cuando se incrementa el esfuerzo de corte y el diámetro de la tubería. Para las espumas acuosas se encontró que se comportan como fluidos Newtonianos para calidades menores al 54%, éstas se comportan como fluidos Bingham para calidades mayores al 54%. Para calidades mayores a 97% los sistemas espumosos se convierten a flujo bache o flujo de niebla[9].

Espumas geladas

Se investigó la espuma gelada de hidroxipropil Guar (HPG) y se encontró que la permeabilidad de la roca, la concentración del gel, la temperatura, la textura y el tamaño de burbuja afectan el coeficiente de pérdida de fluido dinámico. Sin embargo, la longitud de la muestra, la calidad de la espuma, el agente espumante y la fase líquida no tuvieron efecto sobre el coeficiente de pérdida de fluido para las espumas geladas, pero tuvieron efecto para espumas sin gel[9].

El estudio reportado en la literatura referente a los fluidos espumosos usando el gel HPG, para espumas con N_2 y CO_2 , se encontró que un incremento en la concentración del agente viscosificante mejora la estabilidad de la espuma, y se observó que las espumas de nitrógeno son más estables que las espumas de dióxido de carbono[9].

La investigación concerniente a la reología de las espumas con nitrógeno reporta que no se encontró el fenómeno de resbalamiento de pared. Para altas concentraciones del agente viscosificante no se logra mejorar la estabilidad de la espuma a temperaturas elevadas. El punto de cedencia se encontró que es función de la calidad de la espuma y de la viscosidad de la fase líquida del fluido[9].

II.1 Tipo de viscosificante

Los geles comúnmente usados en las industrias del petróleo son: Guar, base Guar, celulosa y base de celulosa. Otro gel como la Xantana también es empleado. Factores como el costo, la hidratación y si son biodegradables se toman en consideración cuando se seleccionan estos geles[9].

Goma Xantana.

La goma Xantana es usada normalmente como viscosificante para fluidos de perforación, terminación y reparación de pozos. Es generalmente empleada solamente como un sistema gel y raramente como un fluido reticulado[9].

En años recientes ha sido usada en estimulación de pozos como espesador para ácido clorhídrico. Este uso es limitado a concentraciones mayores al 15%, para una temperatura de 95° C. Otra aplicación de la Xantana es en la recuperación mejorada[9].

Para la mayoría de los polímeros, la viscosidad decrece con el tiempo por degradación física y química. La degradación física comienza a partir del efecto de corte, mientras que la degradación química puede comenzar con la oxidación, la hidrólisis, la ruptura térmica o el ataque de una enzima. Un incremento en la temperatura, el pH, la fuerza iónica y un incremento ligero en la concentración los agentes reductores aceleran estos mecanismos[9].

En la siguiente sección se define la *calidad*, que es el parámetro más importante para el análisis de las propiedades del fluido. También se discute la reología y las características de las espumas.

II.2 Definición de Calidad

La calidad del sistema espumoso se define como la fracción de volumen de gas contenido dentro de la espuma, expresada en por ciento[9].

La expresión matemática para obtener la calidad es función de la densidad del líquido, de la densidad del gas y de la densidad de la espuma y se presenta a continuación:

$$Q = \frac{\rho_L - \rho_f}{\rho_L - \rho_g} \times 100$$

Donde:

Q : calidad del sistema espumoso

ρ_f : Densidad del sistema espumoso

ρ_g : Densidad del gas

ρ_l : Densidad del líquido

Si la calidad de la espuma se encuentra en el rango 0 a 54%, la espuma consiste de burbujas independientes dispersadas en el gas; en el rango de 54% a 96% el sistema es análogo a una emulsión con gas como la fase dispersa y el líquido como la fase continua. Una calidad mayor al 96 %, alude que el sistema está formado de gotitas de agua ultra microscópicas dispersadas en el gas, es lo que conocemos como niebla[10].

La calidad debe ser calculada a las condiciones del pozo, debido a que la compresibilidad del gas cambia con la presión y la temperatura. Algún cambio en los gastos de bombeo en superficie basado en una calidad incorrecta puede ser desastroso[11].

II.3 Caracterización de la espuma

Las espumas constan de un agregado de burbujas de gas en una matriz de líquido continuo. El surfactante o un agente espumante en la fase líquida, estabiliza la membrana que forma las paredes de la burbuja de la estructura de la espuma[12].



Las espumas pueden ser caracterizadas como fluidos compresibles, Newtonianos o no Newtonianos, dependiendo de su composición volumétrica de gas / líquido. La calidad y la textura son otros dos términos empleados para caracterizar a las espumas.

Las espumas son clasificadas frecuentemente de acuerdo a la forma de las burbujas. Las espumas recién generadas contienen burbujas muy pequeñas, las burbujas tienen forma de esfera y éstas son llamadas espumas esféricas; las espumas poliédricas contienen burbujas en forma de poliedros. Generalmente, las espumas esféricas tienen fracciones de volumen de líquido más altas que las espumas poliédricas[12].

Una espuma húmeda es aquella que tiene una calidad baja, debido a que contiene más líquido que una espuma con altas calidades, por esta razón a estas últimas se les conoce como espuma seca[12].

La textura describe el tamaño y distribución de las burbujas. Una espuma fina tiene pequeñas burbujas y las espumas burdas contienen burbujas grandes. Combinando estos términos, las espumas esféricas tienden a ser de baja calidad, las espumas finas y las espumas poliédricas tienden a ser de alta calidad[12].

Cuando son usadas en operaciones de campo las espumas que se encuentran en estado transitorio debido a los constantes cambios de temperatura, presión, composición y velocidad de corte. Estos cambios afectan las propiedades de flujo de los fluidos espumosos y pueden alterar drásticamente su comportamiento hidráulico. En consecuencia, todos los valores de las variables durante el diseño de los procesos dependen de los cambios de las propiedades de las espumas. Por esta razón, el cálculo y predicción de las pérdidas de presión por fricción en flujo laminar y turbulento para fluidos espumosos es el principal reto en operaciones de campo[13].

II.4 Propiedades Reológicas

Los fluidos espumosos tienen características reológicas únicas, haciendo que se dificulte predecir con precisión su comportamiento de flujo y el perfil de presión de circulación asociada[12].

Diferentes modelos han sido propuestos para describir el comportamiento no Newtoniano de las espumas que tienen una calidad alta, algunos autores proponen que las espumas se comportan como fluidos pseudoplásticos (Ley de Potencias). Otros estudios sugieren que las espumas se pueden describir como un plástico de Bingham. Se ha reportado que el comportamiento reológico de un fluido espumoso es principalmente un fluido pseudoplástico con punto de cedencia[12].

Las propiedades reológicas dependen principalmente de la viscosidad del aire, del líquido y la calidad de la espuma.

Modelo Reológico

Algunos autores han modelado fluidos espumosos como plásticos de Bingham y otros como ley de Potencias o como fluidos de Herschel – Bulkley (conocido como Ley de potencias con punto de cedencia). Estos modelos son expresados matemáticamente como [13]:

Plástico de Bingham: $\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma$

Ley de Potencia: $\tau = k \gamma^n$

Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_0 + k \gamma^n$

donde

τ : Esfuerzo de corte

τ_0 : Punto de cedencia

μ_p : Viscosidad plástica

γ : Velocidad de corte

k : Índice de consistencia

n : Índice de comportamiento

El esfuerzo de corte y la viscosidad aparente aumentan cuando la velocidad de corte decrece. El índice de consistencia aumenta gradualmente en calidades bajas y muestra un dramático incremento en calidades más altas[13].

Bajo las consideraciones previas y dado que el modelo de Herschel-Bulkley es satisfactorio para fluido pseudoplástico, o para un fluido Newtoniano., éste es el modelo más apropiado para describir el comportamiento reológico de los sistemas espumosos[13].

Las correlaciones experimentales desarrolladas para predecir la viscosidad aparente de los fluidos espumosos son función de las propiedades de la fase líquida y de la calidad de la espuma[13].

Las características físicas que afectan las propiedades reológicas de las espumas son[14].

1. La viscosidad del gas en la fase interna.
2. La viscosidad del fluido en la fase externa.
3. Las concentraciones en volumen con respecto a las fases de gas y líquido.
4. El tipo y naturaleza de la película interfacial formada.
5. Las fuerzas eléctricas.
6. La distribución del tamaño de las burbujas.

En la mayoría de los casos solamente las tres primeras características son importantes en la perforación rotatoria. El tamaño de la burbuja puede ser de gran importancia si la presión es reducida de tal manera que las burbujas puedan expandirse y unirse. La vida media de la espuma es también importante porque su uso puede ser restrictivo si su vida media es muy corta [14].

II.5 Efectos de la fracción de gas

La fracción de gas en un sistema espumoso esta representada por la calidad de la espuma; como se ha mencionado, la calidad es definida como el porcentaje de gas presente en la espuma relativa al volumen total de la espuma. El efecto de la fracción de gas sobre la reología del sistema espumoso se determina mediante la realización de los reogramas de viscosidad aparente contra velocidad de corte, para cada temperatura [13].

II.6 Efectos de la concentración

La viscosidad de la fase líquida tiene un efecto significativo sobre la viscosidad final de la espuma, porque los líquidos más viscosos producen esfuerzos de corte más altos y viceversa. Esto significa que las fases líquidas más viscosas producen un sistema espumoso más viscoso, cuando se comparan a la misma calidad y temperatura [13].

II.7 Efectos de la temperatura

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre la reología del sistema espumoso, es necesario elaborar las gráficas de viscosidad aparente contra velocidad de corte, con la temperatura como parámetro.

La generación de la espuma es más difícil a medida que se incrementa la temperatura. Uno de los factores que pueden explicar este comportamiento, es que un incremento en la temperatura causa inestabilidad en la espuma. Las altas temperaturas tienen efectos de adelgazamiento térmicos sobre la fase líquida y en los espesores en la película, lo cual acelera la degradación del líquido en la película delgada de líquido (lamellae) y reduce la estabilidad de la espuma[13].

II.8 Efecto del surfactante

El agente espumante produce un incremento en el área superficial, la reducción de la tensión superficial por la adición de un surfactante es esencial. Sin embargo, la reducción de la tensión superficial no es solo el factor pertinente, la estructura molecular del surfactante también es significativa. Una teoría establece que los que los aniones son orientados normalmente a la superficie de la película y los cationes son distribuidos entre las paredes de la solución, de este modo las paredes manejan una carga electrostática y la repulsión entre estas cargas impide juntarse.

II.7 Efectos de la temperatura

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre la reología del sistema espumoso, es necesario elaborar las gráficas de viscosidad aparente contra velocidad de corte, con la temperatura como parámetro.

La generación de la espuma es más difícil a medida que se incrementa la temperatura. Uno de los factores que pueden explicar este comportamiento, es que un incremento en la temperatura causa inestabilidad en la espuma. Las altas temperaturas tienen efectos de adelgazamiento térmicos sobre la fase líquida y en los espesores en la película, lo cual acelera la degradación del líquido en la película delgada de líquido (lamellae) y reduce la estabilidad de la espuma[13].

II.8 Efecto del surfactante

El agente espumante produce un incremento en el área superficial. La reducción de la tensión superficial por la adición de un surfactante es esencial. Sin embargo, la reducción de la tensión superficial no es solo el factor pertinente, la estructura molecular del surfactante también es significativa. Una teoría establece que los que los aniones son orientados normalmente a la superficie de la película y los cationes son distribuidos entre las paredes de la solución, de este modo las paredes manejan una carga electrostática y la repulsión entre estas cargas impide juntarse.

II.9 Capacidad de acarreo de recortes

El transporte de recortes es controlado por un vasto número de variables, como son: inclinación del pozo, diámetro del agujero, diámetro de la tubería de perforación, velocidad de rotación de la tubería de perforación, velocidad de penetración, características de los recortes (tamaño, porosidad, forma, densidad), razón de flujo, velocidad de flujo, régimen de flujo, tipo de lodo y la reología de un lodo no Newtoniano[12].

Por ejemplo, en el caso de las espumas, la calidad (húmeda, seca), la textura (fina, burda) y el tipo de espuma (estable, rígido) deben ser considerados. En el caso de fluidos aireados, el gasto óptimo de gas, el gasto de inyección del líquido, el tamaño del estrangulador y el diámetro de la tubería, son algunas de las variables importantes; el conocimiento de cómo estas variables afectan el transporte de recortes será un avance importante en el uso de los fluidos compresibles[12].

La capacidad de acarreo de los recortes de una espuma depende de las propiedades reológicas de la espuma.

En un sistema espumoso la barrena no perfora más rápido, sin embargo, los recortes serán removidos con mayor eficiencia, también los mantiene en suspensión cuando se detiene la circulación. Esto tiene dos aspectos importantes: los recortes en la sección vertical del pozo previene su precipitación al fondo del agujero; mientras que los recortes en la sección

lateral no se fijan al lado en el fondo del pozo. Los recortes que se fijan al lado son generalmente sedimentos finos por la acción de la sarta de perforación[11].

El sistema espumoso permite entonces una perforación más rápida debido a la limpieza del agujero y una segregación mínima del fluido en el espacio anular e se opone a que la barrena perfora más rápido[11].

II.10 Estabilidad de los fluidos espumosos

Una espuma estable mantiene la dispersión de las burbujas de gas en el medio líquido[11].

La estabilidad del fluido espumoso es afectada por:

- Tipo de polímero.
- Concentración de polímero.
- Tipo de surfactante.
- Calidad de la espuma.
- Energía de mezclado.

Una medición de la estabilidad de la espuma es referida a la "vida media". La vida media de una espuma es una medida cualitativa referida al tiempo requerido para que la mitad de la fase líquida se separe del gas a condiciones atmosféricas.

Un rango de calidad aceptable para una espuma estable es del 53 al 96%. Si la calidad cae fuera de este rango, la segregación entre la fase líquida y la fase gaseosa ocurrirá, perdiendo el fluido las propiedades reológicas[11].

La estabilidad de la espuma debe perdurar a las condiciones de presión de y temperatura en el fondo del pozo. La inestabilidad de la espuma puede observarse en las presiones medidas, las cuales son más bajas que las presiones calculadas. Esto se debe a las pequeñas pérdidas de fricción asociadas con el sistema de flujo multifásico[11].

II.11 Comportamiento de flujo

Las características de flujo de un fluido espumoso pueden ser determinadas analizando las pérdidas por fricción en el pozo. Las pérdidas por fricción de las espumas son más grandes que las pérdidas por fricción de un fluido convencional, si las pérdidas por fricción son más pequeñas que las esperadas, esto es un excelente indicador de que la estabilidad de la espuma es pobre y el problema puede ser atribuido a un problema de mezclado o el tipo de surfactante no es el correcto[11].

La generación de espuma es fácil bajo condiciones de flujo turbulento con la adecuada concentración del surfactante, sin embargo el flujo turbulento no se alcanza con gastos de bombeo bajos. Un generador de espuma se requiere si la presión por fricción indica que el fluido espumoso presenta un flujo laminar y el mezclado no es suficiente para generar el sistema espumoso[11].

Los gastos de inyección en la superficie deben ser ajustados basándose en la calidad de la espuma calculada a las condiciones del fondo del pozo se monitorea la presión de fondo comparándola con la presión de fondo calculada por el modelo utilizado, alguna desviación a partir de la predicción de la presión indica la existencia de un problema. La observación cuidadosa de la calidad confirma que las características de la espuma tienen un determinado arreglo a esas condiciones de presión y la limpieza del agujero puede ser adversamente afectada[11].

II.12 Beneficios

La perforación con fluidos compresibles ha demostrado proveer importantes beneficios incluyendo[12]:

1. Incremento de la velocidad de penetración de la barrena.
2. Minimización o eliminación de pérdida de circulación durante la perforación.
3. Reducción o eliminación de pegadura de la tubería.
4. Reducción del daño a la formación, por ende aumento de la productividad.
5. Mejoramiento en la evaluación de la formación durante la perforación.
6. Reducción de los requerimientos de estimulación de pozos.

La principal ventaja de los fluidos (aire, niebla y espumas) con bajo contenido de sólidos (menor al 2%) es la baja densidad existente en la barrena, que es uno de los principales factores que afectan la velocidad de penetración[14].

Las importantes ventajas inherentes a perforar con fluidos compresibles pueden ser contrarrestadas por un ineficiente transporte de los recortes a la superficie. Estas ventajas dependen del conocimiento que se tenga sobre la interacción entre el fluido y los recortes de perforación, el comprender esta compleja interacción es limitada. Los fluidos compresibles introducen nuevas variables que impactan a muchos de los parámetros mencionados previamente [12].

Los complejos mecanismos de flujo involucrados en la circulación del fluido compresible, provocan que la combinación óptima de la relación de inyección del líquido y del gas sea muy difícil de determinar. Otras interrogantes que permanecen son cómo predecir la presión de fondo, y cómo combinar las diferentes variables controlables para obtener la eficiencia óptima del transporte de recortes y la hidráulica de la barrena.

La limpieza del agujero (transporte de recortes) es uno de los principales factores que afectan el costo, el tiempo y la calidad de los pozos direccionales, horizontales, de alcance extendido y multilateral. Una inadecuada limpieza del agujero puede inferir problemas de perforación costosos como son: uso prematuro de la barrena, perforación lenta, fracturamiento de la formación [12].

CAPÍTULO III EXPERIMENTACIÓN

El objetivo de este trabajo experimental es diseñar un fluido espumoso base agua de mar para zonas con pérdida total de circulación, la formulación se diseña con el mínimo de requerimientos de aditivos para disminuir los costos de operación. Con la experimentación se desea caracterizar el comportamiento reológico del sistema espumoso, evaluar la funcionalidad del fluido diseñado mediante pruebas de laboratorio, determinar la fracción de aire presente en el sistema para analizar como se afectan las propiedades de los fluidos de control (viscosidad, punto de cedencia, índice de comportamiento, índice de consistencia), esta información proporciona un conocimiento más amplio de los beneficios y desventajas en la eficiencia del fluido.

El procedimiento experimental que debe seguirse es muy importante para garantizar la función óptima del fluido espumoso, debido a que si se alteran los tiempos de preparación, las propiedades reológicas y tixotrópicas cambian drásticamente. En esta sección se describen con detalle las pruebas de laboratorio que permiten la evaluación de los fluidos de control.

De acuerdo al procedimiento experimental se presentan las lecturas que se obtienen en cada una de las pruebas de laboratorio, realizadas al fluido espumoso, y se registran en las tablas correspondientes.

FORMULACIÓN

Las espumas son preparadas usando agua de mar, un reductor de filtrado y un viscosificante que constituyen la fase líquida, para este caso se utilizó aire como la fase gaseosa y el empleo de un surfactante como agente espumante.

Reactivos

- Agua de mar.
- Reductor de Filtrado: Celulosa polianiónica.
- Viscosificante: Goma Xantana.
- Emulsificante.

Materiales

- Balanza analítica.
- Probetas de 1 000 mL.
- Recipientes de 1 L y 2 L.
- Mezclador tipo dispersor con regulador de velocidad.
- Horno para añejamiento dinámico con rodillos internos y control de temperatura.
- Filtro prensa de baja presión – temperatura ambiente.
- Equipo de presurización con nitrógeno y accesorios.
- Celdas de acero inoxidable con válvula para presurizar.
- Termómetro de vidrio con rango de 0° C – 100° C.

- Medidor de intervalos de tiempo con alarma.
- Viscosímetro rotacional.
- Copa térmica para viscosímetro.
- Picnómetro

III.1 Procedimiento

Preparación del fluido

- a) Para el mezclado: en un recipiente verter 1 000 mL de agua de mar, agitar en el Multimixer, en un lapso de 2 minutos adicionar lentamente $17.71 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ del viscosificante, debe asegurarse la perfecta incorporación del aditivo para evitar la floculación; seguir agitando por un periodo de 8 minutos. Continuar la agitación en un equipo Hamilton a baja velocidad, durante 4 minutos. Posteriormente, agregar $41.36 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ de reductor de filtrado empleando el equipo Hamilton a alta velocidad por un periodo de 14 minutos para lograr una buena incorporación.
- b) Determinar la densidad de la fase líquida, con un picnómetro.
- c) En otro recipiente verter 500 mL de agua de mar, agitar en el dispersor a 500 revoluciones por minuto, adicionar 21 mL del emulsificante. Para generar la espuma, agitar durante 10 minutos.



Fig.1 Mezclador tipo Mullimixer.

- d) Para incorporar las dos fases: al volumen de 500 mL agregar los 1 000 mL preparados en el inciso a), agitar en el dispersor a la velocidad a la cual se desea evaluar el fluido de control. Para esta experimentación las velocidades consideradas son a 4 000, 7 000 y 10 000 revoluciones por minuto.
- e) Estabilizar térmicamente al fluido espumoso recién preparado en el horno, para garantizar que los aditivos se encuentren perfectamente incorporados.

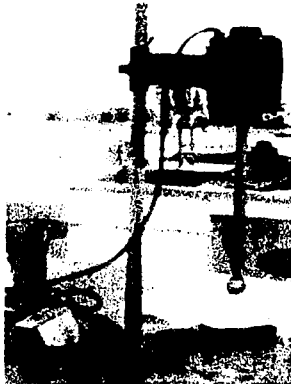


Fig.2 Mezclador tipo dispersor.

Pruebas de laboratorio

La evaluación del fluido permite controlar las propiedades físicas y químicas del fluido de control para asegurar un adecuado desempeño del mismo durante las operaciones de campo.

Estabilidad térmica

El método determina la capacidad del fluido para controlar las propiedades reológicas y fixotropicas, así como la filtración del fluido, después de someterlo a un añejamiento térmico-dinámico a una temperatura y tiempos establecidos.

- f) Transferir la muestra del fluido, recientemente agitado, a una celda de rolar (1 cm abajo del borde superior), cerrar y presurizar con nitrógeno a 100 lb_f/in².

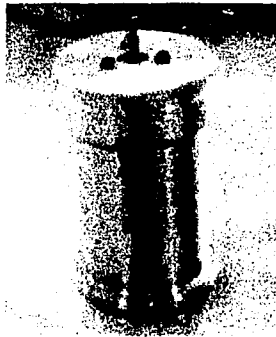


Fig.3 Celda de acero inoxidable.

- g) Colocar la celda en el horno rolar, previamente calentado a la temperatura correspondiente. Estabilizar dinámicamente rolando la celda en el horno a 65° C durante 18 horas.
- h) Enfriar las celdas a temperatura ambiente, no usar agua para acelerar el proceso. Desfogar la presión de la celda, abrir y vaciar a un recipiente apropiado. Agitar 10 minutos en el dispersor a la velocidad de agitación de interés, en este caso a 4 000, 7 000 o 10 000 revoluciones por minuto.
- i) Determinar la densidad del sistema espumoso con un picnómetro.

- j) Determinar las lecturas a 600, 300, 200, 100. rpm en el viscosímetro rotacional a 25° C.

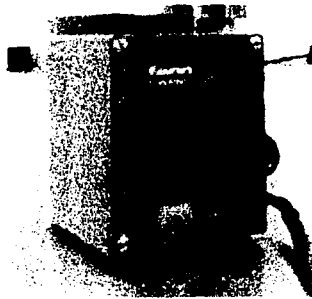


Fig.4 Copa térmica para viscosímetro.

- k) Determinar con el viscosímetro rotacional la gelatinosidad a 10 minutos a 25° C.
- l) Determinar el filtrado en el filtro prensa a 100 lb_f/in², durante 30 minutos.
- m) Determinar la viscosidad empleando el embudo de Marsh.
- n) Para la estabilidad térmica a 120° C, preparar y acondicionar la muestra de acuerdo con el inciso a) hasta el inciso f).

- o) Colocar la celda en el horno rolator, calentar previamente a la temperatura correspondiente. Añejar dinámicamente a 120°C durante 18 horas.

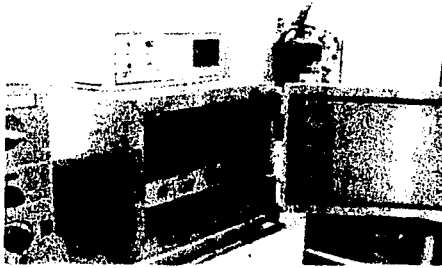


Fig.5 Horno para añejamiento dinámico.

- p) Enfriar las celdas a temperatura ambiente (no use agua para acelerar el proceso) Destogar la presión de la celda, abrir y vaciar a un recipiente apropiado. Agitar 10 minutos en el dispersor a la velocidad de agitación de interés (4 000, 7 000 o 10 000 revoluciones por minuto).
- q) Determinar las mediciones de acuerdo al inciso i) al inciso m).
- r) Preparar la muestra como se especifica en el inciso n), para estabilizar térmicamente a una temperatura de 150°C .

- s) Transferir la muestra del fluido, recientemente agitado, a una celda de rolar (1 cm abajo del borde superior), cerrar y presurizar con nitrógeno a 150 lb_i/in².
- i) Colocar la celda en el horno rolador, previamente calentado a la temperatura correspondiente. Añejar dinámicamente a 150° C durante 18 horas.
- u) Medir la densidad, las lecturas en el viscosímetro rotacional y por último el filtrado del sistema espumoso.

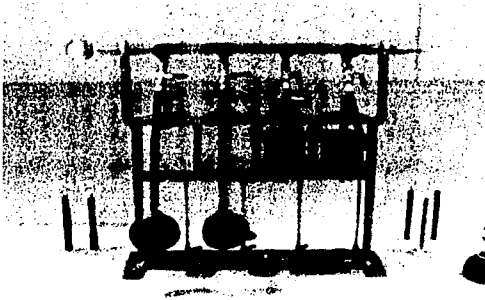


Fig.6 Cámaras de filtración de baja presión.

En el apéndice se presentan las fotografías del fluido espumoso después de la estabilidad térmica al que es sometido durante la experimentación.

III.2 Procesamiento de los datos

En esta sección se describen los métodos y procedimientos empleados para calcular las propiedades del sistema espumoso. Los datos obtenidos en las pruebas incluyen la densidad del líquido, la densidad del sistema, el filtrado, la resistencia del gel y la viscosidad, las cuales representan las propiedades de la espuma a condiciones atmosféricas; ciertas fórmulas y principios fueron utilizados para estimar dichas propiedades; solamente los datos obtenidos bajo condiciones estables son usados en los cálculos.

Propiedades Reológicas y Tixotrópicas

Las propiedades reológicas y tixotrópicas definen el comportamiento de flujo del fluido de control, son importantes en el cálculo de las pérdidas por fricción y para determinar la capacidad de acarreo de los recortes. Las propiedades reológicas fundamentales son la viscosidad y la resistencia del gel.

Para mediciones simples de viscosidad se emplea el embudo Marsh. Éste mide la velocidad de flujo en un tiempo medido; para una mejor medición se emplea un viscosímetro rotacional que proporciona dos parámetros reológicos: viscosidad plástica y punto de cedencia.



Las características tixotrópicas miden la capacidad para desarrollar una estructura rígida o semirrígida durante el periodo de reposo. En la tabla III.1 se muestran las mediciones para las propiedades del sistema espumoso.

VELOCIDAD DE AGITACIÓN	PARÁMETROS	TEMPERATURA		
		Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
4 000 rpm	Punto de cedencia (Ib _r /100 ft ²)	18.0	18.2	20.0
	Gel a 10 segundos (Ib _r /100 ft ²)	20.0	16.0	3.0
	Gel a 10 minutos (Ib _r /100 ft ²)	35.0	32.0	6.0
7 000 rpm	Punto de cedencia (Ib _r /100 ft ²)	18.7	17.5	16.0
	Gel a 10 segundos (Ib _r /100 ft ²)	22.0	15.0	4.0
	Gel a 10 minutos (Ib _r /100 ft ²)	34.0	33.0	5.0
10 000 rpm	Punto de cedencia (Ib _r /100 ft ²)	2.2	2.0	1.4
	Gel a 10 segundos (Ib _r /100 ft ²)	24.0	13.0	5.0
	Gel a 10 minutos (Ib _r /100 ft ²)	34.0	30.0	9.0

Tabla III.1 Datos del punto de cedencia y la resistencia del gel del fluido espumoso.

Cálculo de la densidad del aire

Durante esta experimentación el aire es usado como la fase interna del fluido espumoso. La densidad del aire es función de la presión y la temperatura del sistema, la ecuación de estado usada para determinar la densidad del aire puede ser expresada como:

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{MP}{ZRT}$$

donde

M: peso molecular, lb/lb-mol

P: presión, psia

R: constante universal de los gases, psia.ft³/(° R.lb-mol)

T: Temperatura, ° R

Z: factor de compresibilidad

ρ_{aire} : densidad del aire, lb/ft³

El factor de compresibilidad es calculado utilizando una correlación generalizada para gases. Esta correlación la desarrollo Pitzer y colaboradores cuya expresión es la siguiente[15]:

$$Z = Z^0 + wZ^1$$

donde

$$Z^0 = 1 + B^0 \frac{P_{pr}}{T_{pr}}$$

$$Z^1 = B^1 \frac{P_{pr}}{T_{pr}}$$

Z^0 y Z^1 son funciones de la temperatura y presión pseudo reducidas y w es el factor acéntrico.

Los coeficientes B^0 y B^1 están representados con las siguientes ecuaciones:

$$B^0 = 0.083 - \frac{0.422}{T_{pr}^{1.6}}$$

$$B^1 = 0.139 - \frac{0.172}{T_{pr}^{4.2}}$$

Cálculo de la calidad

La variación de la fracción de gas en el fluido espumoso se analiza a partir de las diferentes velocidades de agitación de 4 000, 7 000 y 10 000 revoluciones por minuto, que son manejadas en el procedimiento experimental para la incorporación de las dos fases.

La calidad del sistema espumoso es calculada con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\rho_l - \rho_f}{\rho_l - \rho_{aire}} \times 100$$

La densidad del líquido y la densidad del sistema espumoso se obtienen experimentalmente. Para este cálculo es importante mencionar que el único valor que cambia es la densidad del sistema espumoso, la cual varía después de cada prueba de estabilidad térmica. En la tabla III.2 se muestran los valores de las densidades de la fase líquida, del aire y del sistema espumoso.

PARÁMETROS	TEMPERATURA		
	Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
Densidad del líquido (lb/gal)	9.17	9.17	9.17
Densidad del aire (lb/gal)	0.009839	0.009839	0.009839
Densidad del sistema (lb/gal) a 4 000 rpm	8.22	6.68	2.55
Densidad del sistema (lb/gal) a 7 000 rpm	7.38	6.22	2.15
Densidad del sistema (lb/gal) a 10 000 rpm	6.86	5.88	1.90

Tabla III.2 Datos de las densidades empleadas para el cálculo de la calidad.

En esta sección se incluye la tabla III.3 de los datos de la viscosidad Marsh, debido a que después de medir la densidad del líquido y la densidad del sistema espumoso, se hace la medición de la viscosidad Marsh.



PARÁMETROS	TEMPERATURA		
	Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
Viscosidad Marsh (s) a 4 000 rpm	677	248	45
Viscosidad Marsh (s) a 7 000 rpm	1139	260	50
Viscosidad Marsh (s) a 10 000 rpm	1173	281	66

Tabla III.3 Datos de la viscosidad Marsh del fluido espumoso.

Cálculo de la Viscosidad Aparente

La expresión matemática empleada para calcular la viscosidad aparente es la siguiente:

$$\mu_a = 47880 \frac{\tau}{\gamma}$$

donde

τ : Esfuerzo de corte

γ : Velocidad de corte

μ_a : Viscosidad aparente

47 880 Factor de conversión a centipoise

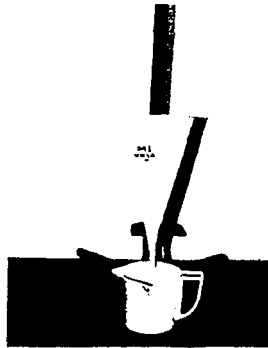


Fig. 7 Embudo Marsh.

A partir de los datos del esfuerzo de corte calculados con los datos medidos experimentalmente, se realizaron las gráficas correspondientes para cada temperatura de añejamiento al que fue sometido el fluido espumoso.

La viscosidad aparente se calculó para una velocidad de corte de 511 s^{-1} . Los resultados se presentan en la tabla III.4.

PARÁMETROS	TEMPERATURA		
	Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
Viscosidad Aparente (cP) a 4 000 rpm y 511 s^{-1}	198.946	82.972	6.998
Viscosidad Aparente (cP) a 7 000 rpm y 511 s^{-1}	203.943	88.975	8.997
Viscosidad Aparente (cP) a 10 000 rpm y 511 s^{-1}	208.942	94.973	9.997

Tabla III.4 Datos de la viscosidad aparente calculada para una velocidad de corte a 511 s^{-1}

Análisis del Efecto de la Fracción de Gas sobre las Propiedades de los Fluidos Espumosos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Filtrado a baja presión

Cuando se circula a través de una formación permeable, el fluido de control perderá parte de la fase líquida hacia el interior de la formación. El líquido que se pierde por la filtración hacia la formación es el filtrado.

El método para medir la pérdida relativa de un fluido es mediante la presión aplicada al fluido y la temperatura del fluido. El ensayo API estándar se lleva a cabo a temperatura ambiente y a una presión de 100 lbr/in². Este método se le conoce como filtrado a baja presión.

Los valores del filtrado para el fluido espumoso evaluado se presentan en la tabla III.5.

PARÁMETROS	TEMPERATURA		
	Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
Filtrado (ml) a 4 000 rpm	10.0	14.0	35.0
Filtrado (ml) a 7 000 rpm	9.7	18.0	37.0
Filtrado (ml) a 10 000 rpm	9.2	32.0	38.0

Tabla III.5 Datos del filtrado para el fluido espumoso.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los datos obtenidos experimentalmente se procede a caracterizar el comportamiento reológico del sistema espumoso, estableciendo que modelo reológico se ajusta al fluido, por lo que es necesario elaborar los reogramas de esfuerzo de corte contra velocidad de corte. Con los reogramas anteriores, se calculan los parámetros reológicos del índice de consistencia y el índice de comportamiento y posteriormente se inicia a calcular la calidad; es decir, la fracción de aire presente en el fluido.

Los reogramas para la viscosidad aparente, el punto de cedencia y la calidad, también son realizados para el fluido espumoso en estudio.

El análisis de los resultados se hace a partir de la información obtenida de los reogramas elaborados para la velocidad de corte, la viscosidad aparente, el punto de cedencia y por último para la calidad. Las variables consideradas para el análisis son la temperatura de añejamiento de 65°, 120° y 150° C y la velocidad de agitación de 4 000, 7 000 y 10 000 revoluciones por minuto.

Los parámetros del modelo reológico se analizan para determinar como se afectan por la fracción de aire incorporado en el fluido espumoso, a partir de la información derivada de los reogramas.

Los reogramas de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para el fluido espumoso evaluado a diferentes temperaturas de añejamiento muestran que el fluido tiene un comportamiento pseudoplástico. Se encontró que el esfuerzo de corte se incrementa con el aumento de la velocidad de corte. Las siguientes figuras muestran el comportamiento reológico del fluido espumoso:

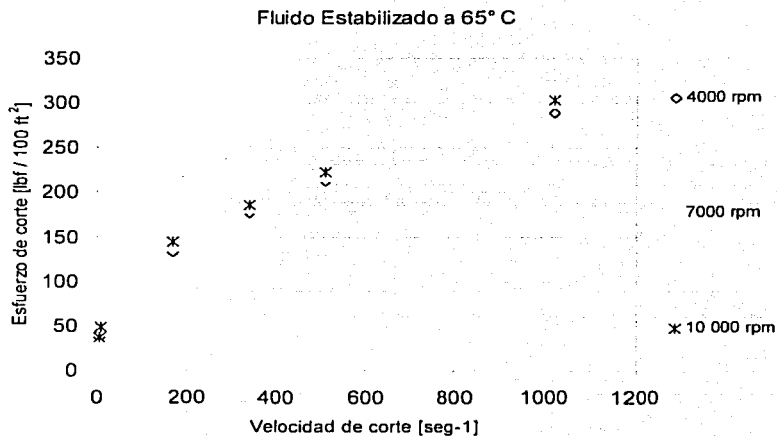


Fig. 1 Reograma de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para el fluido estabilizado a 65° C.



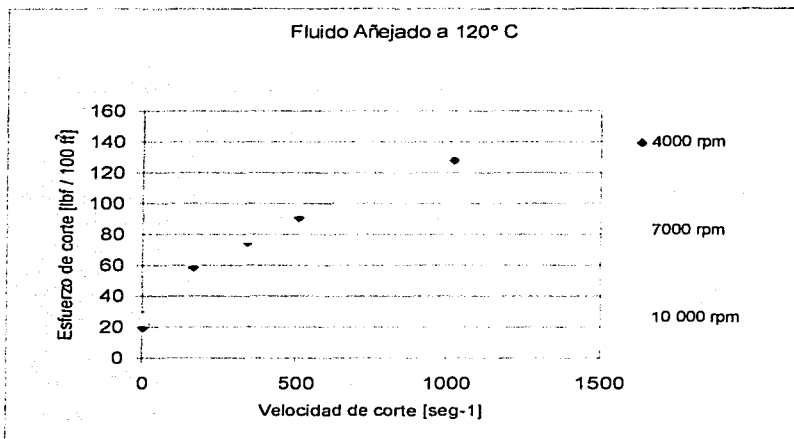


Fig. 2 Reograma de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para el fluido añejado a 120 ° C.

Las figuras 1 y 2 muestran los reogramas del esfuerzo de corte como función de la velocidad de corte, ambas gráficas exhiben resultados similares; es decir, que el esfuerzo de corte se incrementa cuando aumenta la velocidad de corte. La finalidad de la comparación es hacer el análisis con respecto a la estabilidad térmica del fluido, lo que permite deducir que cuando aumenta la temperatura de añejamiento de 65° a 120° C el esfuerzo de corte disminuye aproximadamente en un 50 %, debido a la degradación térmica del sistema. Como se observa en la figura 1, el aumento de la velocidad de agitación origina un incremento del esfuerzo de corte aproximadamente del 7 %, también en la figura 2 se presenta el mismo comportamiento.

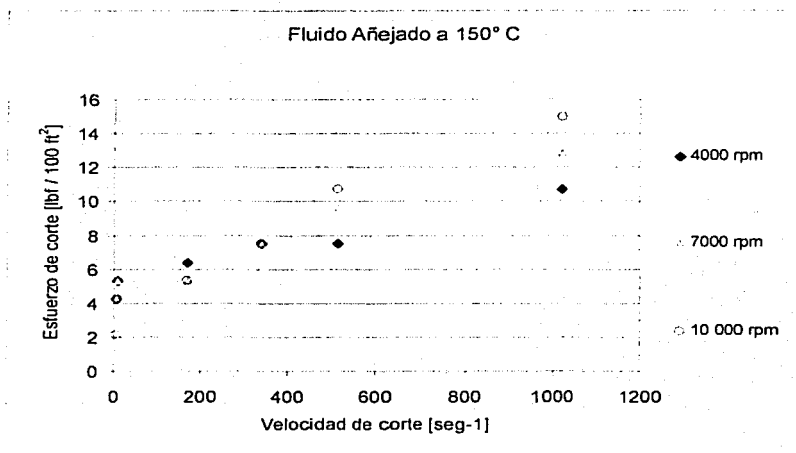


Fig. 3 Reograma de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para el fluido añejado a 150 ° C.

La figura 3 muestra el reograma para el fluido añejado a 150° C, se observa que el esfuerzo de corte se incrementa cuando aumenta la velocidad de corte; como se advierte, la tendencia de incremento no se mantiene, es decir, los valores de esfuerzo de corte no cambian para bajas velocidades de corte. Sucede de forma similar para las diferentes velocidades de agitación, por lo que algunos puntos coinciden. En el caso de altas velocidades de corte, la variación entre los valores del esfuerzo de corte a diferentes velocidades de agitación es notable, debido a que a mayor velocidad de agitación, mayor es el valor del esfuerzo de corte. Para esta temperatura se modifica el comportamiento reológico del fluido

El procedimiento para caracterizar el comportamiento reológico considera dos aspectos: la selección del modelo y la determinación de los parámetros reológicos.

A. Selección del modelo

1. Con las lecturas del viscosímetro rotacional se elaboran en coordenadas cartesianas los reogramas de esfuerzo de corte contra velocidad de corte. (Fig.1, 2, 3). La finalidad de graficar los valores experimentales es observar el posible comportamiento reológico del fluido.

2. En la mayoría de los casos es imposible hacer la elección mediante los reogramas, es necesario realizar ciertos cálculos empleando una regresión lineal.

3. Con el coeficiente de regresión lineal R^2 se elige el modelo que más se aproxime a la unidad. Si el valor del coeficiente de la regresión es mayor que 0.95 significa que es una excelente correlación. De lo anterior, comprobamos que el modelo de Herschel - Bulkley es el que mejor describe la reología del fluido en estudio ($R^2=0.99$).

B. Determinación de los parámetros reológicos

1. Para nuestro caso de estudio, se elabora una gráfica logarítmica de esfuerzo de corte contra velocidad de corte para obtener gráficamente el valor cambia de cedencia (Fig.4).

2. La diferencia entre el esfuerzo de corte y el valor de cedencia origina una nueva variable llamada "tao", con estos valores el índice de comportamiento n y el índice de consistencia k , se obtienen a partir de una regresión lineal de los datos (Fig. 5), de acuerdo a la siguiente ecuación: $\tau = \tau_0 + k \gamma^n$

Para la regresión de los datos se emplea un método de mínimos cuadrados. Los parámetros n , k y el coeficiente de la regresión lineal R^2 se presentan en la tabla IV.1.

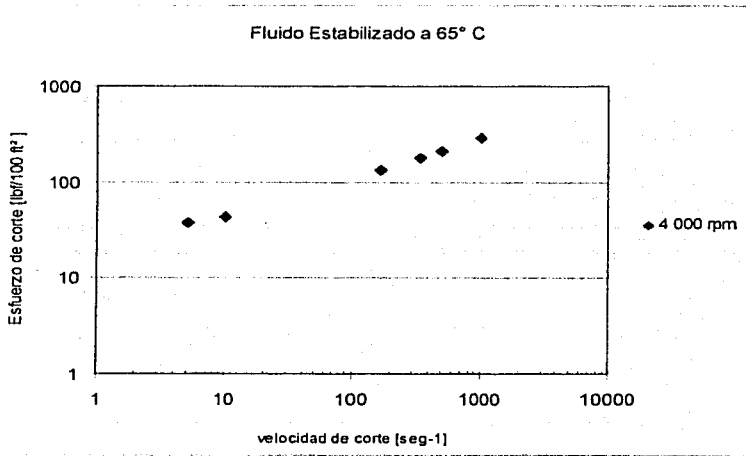


Fig.4 Gráfica logarítmica de esfuerzo de corte contra velocidad de corte.

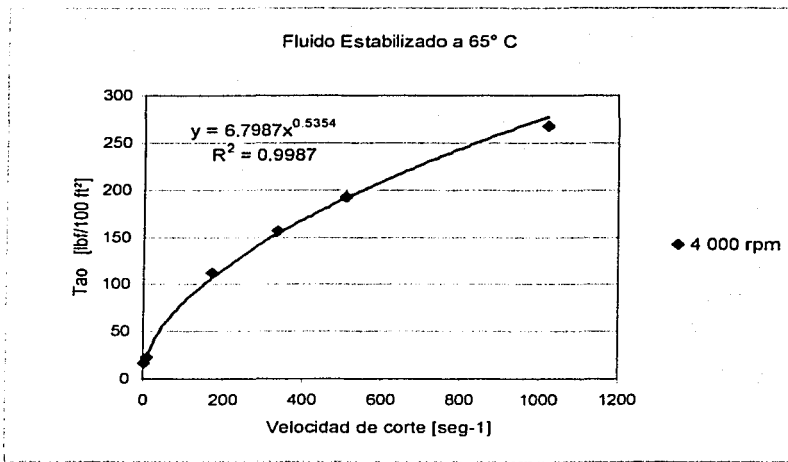


Fig.5 Gráfica que muestra los parámetros reológicos (n, k) y el coeficiente de regresión R^2 .

El reograma de la viscosidad aparente contra la velocidad de corte, se exhibe en la figura 6. En esta gráfica se hace la comparación de la viscosidad aparente con las diferentes temperaturas de añejamiento. En el análisis de este reograma se advierten dos comportamientos importantes del sistema espumoso:

La dependencia inversamente proporcional de la viscosidad aparente sobre la velocidad de corte es clara, debido a que la viscosidad aparente se incrementa cuando decrece la velocidad de corte. El segundo comportamiento que se advierte es que cuando se incrementa la

temperatura de añejamiento, disminuye la viscosidad aparente del sistema.

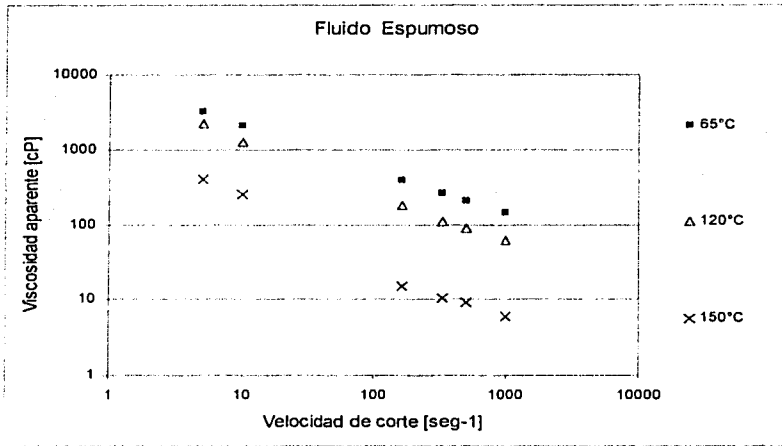


Fig. 6 Gráfica comparativa de viscosidad aparente contra velocidad de corte.

La temperatura tiene un efecto significativo sobre la viscosidad del sistema espumoso, en el fluido la alta viscosidad es la que proporciona la consistencia para la capacidad de acarreo y la estabilidad del fluido espumoso.

Las altas temperaturas tienen efectos de adelgazamiento térmico sobre la fase líquida y en los espesores de la película formada alrededor de las burbujas de aire. Entonces, el incremento de la temperatura produce inestabilidad a la espuma.

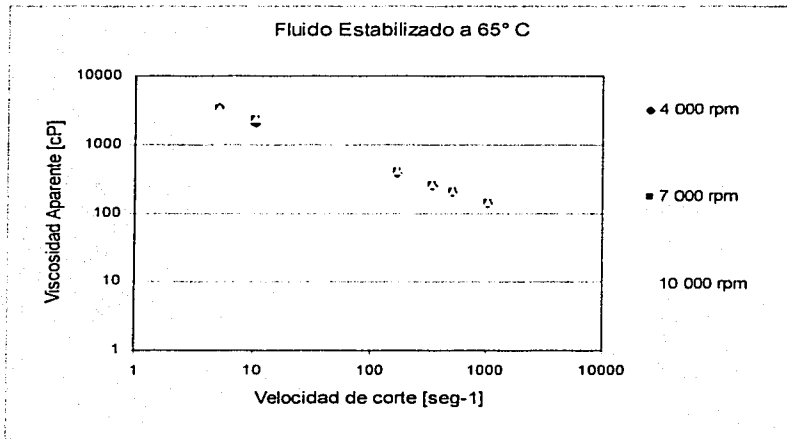


Fig. 7 Gráfica de viscosidad aparente contra velocidad de corte para el fluido estabilizado.

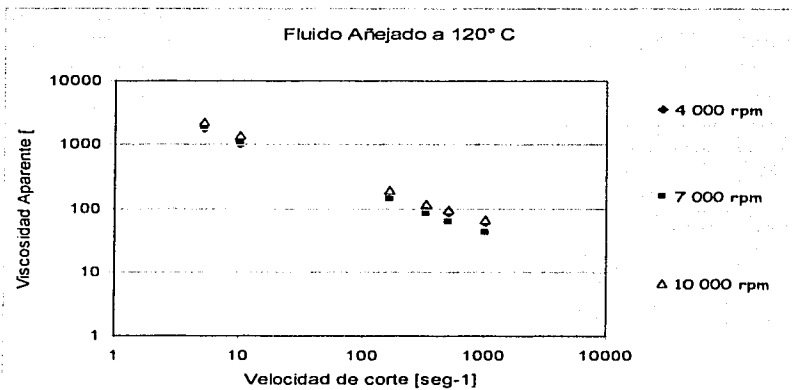


Fig. 8 Gráfica de viscosidad aparente contra velocidad de corte para el fluido añejado a 120° C.

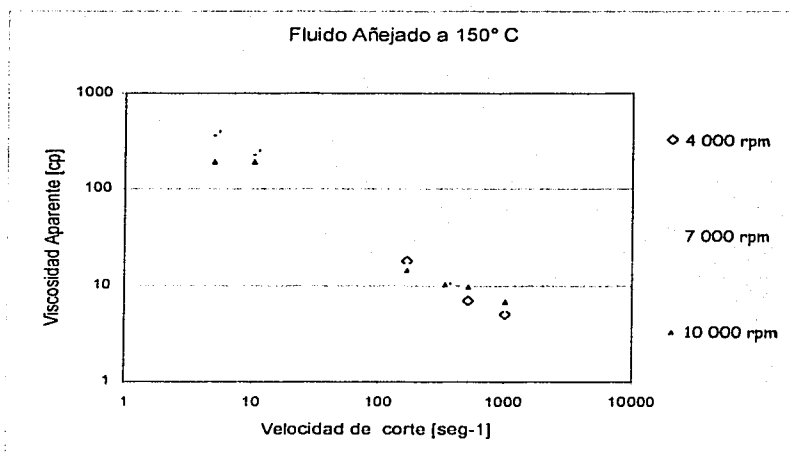


Fig. 9 Gráfica de viscosidad aparente contra velocidad de corte para el fluido añejado a 150° C.

El análisis referente a la velocidad de agitación sobre la viscosidad aparente se puede visualizar en las figuras 6, 7 y 8. La viscosidad aparente ligeramente se incrementa cuando crece la velocidad de agitación, esto es más perceptible en la tabla IV.1, donde el valor de la viscosidad aparente está referido a una velocidad de corte de 511 s⁻¹.

En el fluido añejado a 150° C, el cual está representado en la figura 8, se advierte que para altas velocidades de corte, la viscosidad aparente decrece drásticamente; esto es un indicador del *rompimiento del sistema espumoso*, manifestándose con la pérdida de sus propiedades reológicas.

El efecto del incremento de la calidad, sobre la reología de la espuma, se analiza a partir de la figura 9, que es la gráfica de viscosidad aparente contra la calidad, para una velocidad de corte de 511 s^{-1} , en la cual se observa que la viscosidad aumenta conforme aumenta la calidad.

La viscosidad aparente crece cuando la calidad se incrementa, el incremento es gradual para bajas calidades como acontece para este sistema espumoso. La razón es que la reología de la espuma es función de la estructura del sistema espumoso. Para bajas calidades, las burbujas pueden fluir libremente y no interfieren unas con otras para producir un incremento significativo en la viscosidad del fluido espumoso.

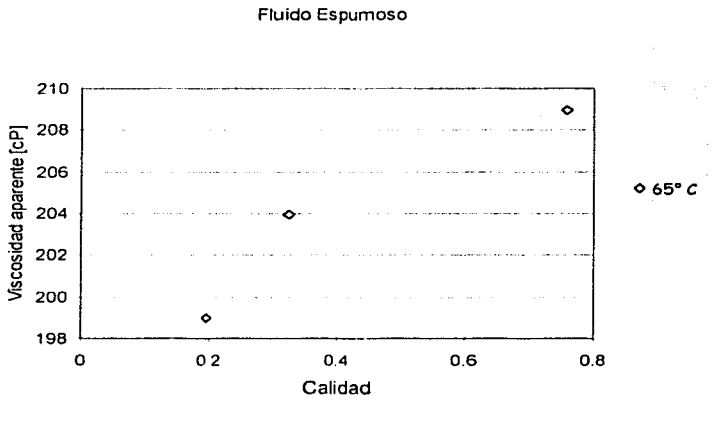


Fig. 10 Efecto de la calidad sobre la viscosidad aparente a una velocidad de corte 511 s^{-1} .

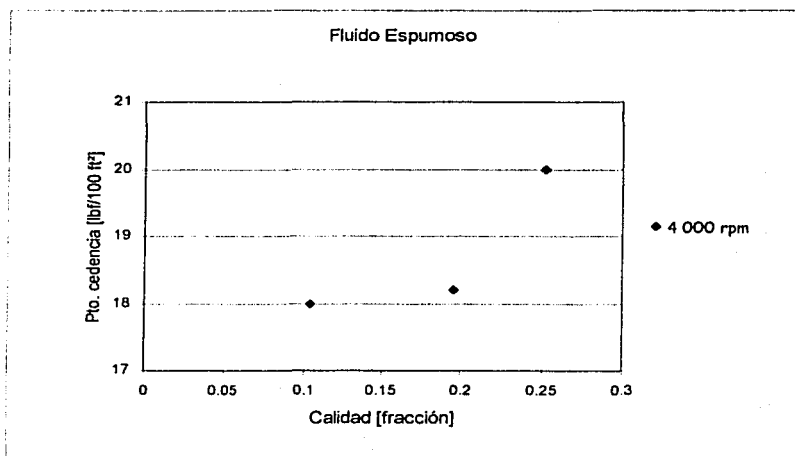
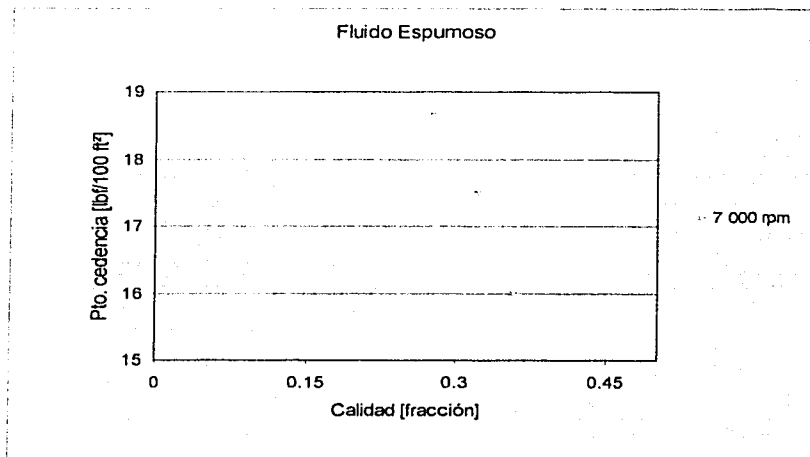


Fig. 11 Gráfica de punto de cedencia contra calidad para 4 000 rpm.

Como se observa en el reograma de la figura 11, para la velocidad de agitación de 4 000 rpm, el punto de cedencia se incrementa conforme la calidad aumenta este comportamiento se debe principalmente a que las fuerzas de atracción electroquímicas aumentan; es decir, la atracción entre las partículas sólidas y las burbujas es mayor porque la dispersión es menor entre ellas a menor velocidad de agitación, aún cuando la concentración de las burbujas se incrementa sistema, a estas condiciones el sistema se encuentra estable, no presenta efecto por la fracción de gas incorporado.

Cuando la velocidad de agitación aumenta la dispersión es mayor afectando a las fuerzas de atracción que actúan en el fluido y la cantidad de aire incorporado aumenta, dificultando que la burbuja pueda unirse con la partícula sólida, causando una disminución en el valor del punto de cedencia como se observa en la figura 12.

La fracción de aire se incrementa en el sistema por la relación directa que existe entre la calidad y la velocidad de agitación: es decir, a mayor velocidad de agitación, mayor es la cantidad de aire incorporado al sistema espumoso.



El análisis de las propiedades reológicas del sistema espumoso con respecto a la temperatura de añejamiento se expone a continuación:

Fluido estabilizado a 65 °C

1. Cuando aumenta la velocidad de agitación la viscosidad aparente se incrementa, reduciendo el filtrado.
2. Los parámetros reológicos como son el índice de comportamiento n y el índice de consistencia k se mantienen en 0.5392 y 7.01 respectivamente, para la velocidad de agitación de 7 000 rpm. Para éstas condiciones el fluido se comporta estable y se concluye que la temperatura de 65° C es la más adecuada para estabilizar al fluido.
3. El punto de cedencia mantiene su relación de correspondencia con el índice de consistencia.

Fluido añejado a 120°C

1. Para estas condiciones se mantiene la reducción del filtrado, en este caso la viscosidad aparente aumenta, aún cuando se incrementa la velocidad de agitación.
2. El índice de comportamiento disminuye, pero se mantiene en 0.5541, el índice de consistencia pierde su propiedad de sustentación, se pierde un 38.43 % de sustentación para 7000 rpm y un 57.84% para la velocidad de agitación a 10 000 rpm.
3. La relación entre el punto de cedencia y el índice de consistencia se pierde, se observa que el punto de cedencia disminuye y el índice de consistencia aumenta.

Fluido añejado a 150°C

Como se observa para la temperatura de 150 ° C, el sistema espumoso se rompe, debido a que la temperatura degrada la estructura molecular de los polímeros empleados como reductor de filtrado y como viscosificante.

- La estabilidad se mantiene para la temperatura de 65° y 120° C, en el caso de 150° C la desintegración de la espuma es rápida y por lo tanto la separación de fases es inmediata.

Del análisis anterior, se concluye que el fluido diseñado cumple con las características que son importantes para su aplicación en operaciones de campo, es un fluido de baja densidad, reduce el daño a la formación, reduce la pérdida de circulación, alta capacidad de acarreo y altas velocidades de penetración. Es muy importante considerar un inhibidor de corrosión para evitar problemas por desgaste de la tubería, así como riesgo de explosión en el fondo del pozo, debido a que se reduce la presencia de oxígeno disponible en la reacción, durante las operaciones de campo cuidar que no se presente una posible combustión.

Este sistema puede ser aplicado en la industria como un fluido de terminación y/o reparación de pozos, en zonas con pérdida de circulación.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla que muestra las propiedades analizadas y discutidas para esta formulación del fluido espumoso.

VELOCIDAD DE AGITACIÓN [rpm]	PARÁMETROS	TEMPERATURA		
		Estabilizado a 65° C	Añejado a 120° C	Añejado a 150° C
4 000	n	0.5354	0.5885	0.2405
	$K [lb_f \cdot s^n / 100 ft^2]$	6.7987	2.2436	1.6029
	$Pc [lb_f / 100 ft^2]$	18.0	18.2	20.0
	$Va [cP]$ a 511 s ⁻¹	198.946	82.972	6.998
	Calidad %	10.46	27.35	74.3
	R ²	0.9987	0.9997	0.9037
7000	n	0.5292	0.5541	0.2375
	$K [lb_f \cdot s^n / 100 ft^2]$	7.0159	2.4838	1.5586
	$Pc [lb_f / 100 ft^2]$	18.7	17.5	16.0
	$Va [cP]$ a 511 s ⁻¹	203.943	88.975	8.997
	Calidad %	19.5	32.38	76.0
	R ²	0.9984	0.9988	0.7859
10 000	n	0.5270	0.4687	0.2273
	$K [lb_f \cdot s^n / 100 ft^2]$	7.7069	4.1133	1.5078
	$Pc [lb_f / 100 ft^2]$	2.2	2.0	1.4
	$Va [cP]$ a 511 s ⁻¹	208.942	94.973	9.997
	Calidad %	25.2	36.1	77.2
	R ²	0.9954	0.9972	0.8642

Tabla IV.1 Calidad y Parámetros del Modelo de Herschel-Buckley (n, k y Pc) del fluido espumoso.

En la literatura se reportan los resultados de la investigación experimental sobre la reología de los fluidos espumosos para una temperatura de 65° C, los sistemas fueron preparados usando agua, la goma Guar se utilizó como viscosificante y el surfactante aniónico como el agente espumante. La tabla IV.2 presenta los resultados:

PARÁMETROS	TEMPERATURA 65° C				
	0.6	0.6	0.6	0.6	--
n	0.6	0.6	0.6	0.6	--
K [Ib _r .s ⁿ / ft ²]	0.0072	0.0092	0.0126	0.0179	--
Pc [Ibf/ft ²]	0.003	0.009	0.025	0.065	--
Calidad %	10	30	40	60	--
R ²	1.0	0.99	0.99	0.97	--

Tabla IV.2. Parámetros del Modelo de Herschel-Bulkley a 65° C.

La finalidad de presentar y comparar los resultados de la tabla IV.2 con los obtenidos en este trabajo experimental es fundamentar que el rango de calidad obtenido, está dentro de lo esperado cuando se experimenta este tipo de fluidos. Como se observa para una calidad mayor al 60 %, no se obtuvieron valores debido a la ruptura del sistema. Con lo anterior se puede concluir que rango de calidad es el más apropiado para evaluar las propiedades reológicas del fluido.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas de esta investigación experimental son las siguientes:

- ✦ La reología de los fluidos espumosos puede ser caracterizada adecuadamente por el modelo de Herschel – Bulkley. (ley de potencia con punto de cedencia)
- ✦ La calidad es la fracción de volumen de gas contenido dentro del sistema espumoso, se emplea como un parámetro de evaluación de como varían las propiedades reológicas del fluido.
- ✦ En esta formulación, si la calidad se encuentra en un rango del 10 al 36 %, las propiedades reológicas y tixotrópicas son óptimas para utilizarlo como un fluido de control.
- ✦ La calidad más recomendable es aquella que se encuentra en el rango del 19% al 32%, lo anterior se refleja cuando se toman las lecturas durante el proceso experimental. Como el sistema se deteriora a la temperatura de 150° C, no se recomienda manejar una calidad mayor al 70 %.
- ✦ El efecto que provoca la fracción de gas en la viscosidad es el siguiente: cuando aumenta la fracción de gas en el sistema se incrementa la viscosidad, esto se explica por el incremento de las burbujas, lo que origina una mayor interacción entre unas con otras, esto provoca un aumento en la viscosidad. Al afectarse la viscosidad se modifican la óptima potencia hidráulica en la

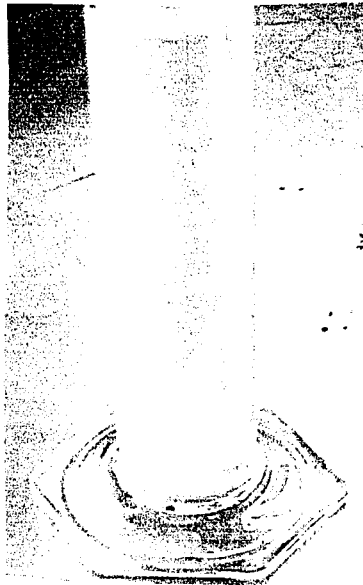
barrena, la viscosidad efectiva en el espacio anular para mantener limpio el agujero y la gelatinosidad para mantener los recortes en suspensión.

- El índice de comportamiento disminuye cuando aumenta la calidad, esto significa que se aleja del comportamiento Newtoniano, debido a la presencia de biopolímeros, por el incremento en la concentración de las burbujas provocando que la distancia entre las partículas disminuye. El índice de consistencia se incrementa cuando aumenta la calidad, lo que significa que es función de la viscosidad de la fase líquida, así como por la influencia del tamaño y concentración de las burbujas y de las partículas sólidas. Estos parámetros son importantes para predecir las pérdidas de presión por fricción en el sistema, el perfil de velocidad, así como la viscosidad efectiva.
- El punto de cedencia decrece cuando la calidad aumenta, esto se explica porque disminuyen las fuerzas de atracción electroquímicas entre las partículas sólidas y las burbujas, debido a cambios eléctricos en las superficies de las mismas, y a la presencia de electrólitos. Este valor es una propiedad del fluido de control que debe ser controlada entre un rango exacto y específico de acuerdo a las condiciones del pozo y es el factor dominante que afecta las pérdidas de presión en el sistema circulatorio, la densidad de circulación y la capacidad de acarreo del fluido.
- La formulación evaluada mediante pruebas de laboratorio cumplió con la finalidad de diseñar un fluido espumoso base agua de mar para zonas con pérdida total de circulación.
- Esta formulación puede ser aplicada en la industria petrolera como un fluido de terminación y/o reparación de pozos.

- ♣ Las ventajas más importantes que se obtienen cuando se emplean los fluidos espumosos son: minimización de los costos por concepto de pérdida de circulación durante la perforación, reducción de daño a la formación, incremento de la velocidad de penetración de la barrena, reducción de pegadura de tubería por presión diferencial y eficiente capacidad de acarreo de los recortes.

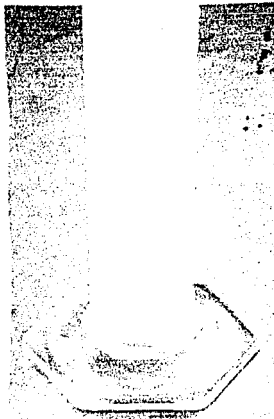
APÉNDICE

Fotos de fluido espumoso rolado a diferentes temperaturas de añejamiento.

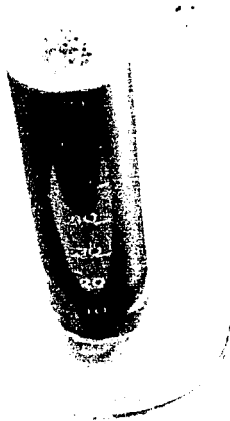


Fluido Rolado a 65 °C

**TESIS CON
FALLA DE ORDEN**



Fluido rolado a 120° C



Fluido rolado a 150° C

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

1. "FLUIDOS DE CONTROL", Cien Años de la Perforación en México, Tomo III.
2. "APUNTES DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN", Facultad de Ingeniería, UNAM, 1985.
3. "CLASSIFICATIONS OF FLUID SYSTEMS", World Oil's Fluids, 2000.
4. Bennett, "PRACTICAL EMULSIONS", Chemical Publishing Co. N: Y: Tomos I y II.
5. Becher, Paul. "EMULSIONS: Theory and Practice", 1972.
6. Bikerman J. J. "FOAMS", Reinhold, 1953.
7. Chitour C. "PHYSICO-CHIMIE DES SURFACES", O.P.U, 1979.
8. Attwood D. "SURFACTANT SYSTEMS", Champanand Hall, 1983.
9. Abu M. Sani. "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF XANTHAN FOAM RHEOLOGY", SPE 67263, 2001.
10. Gray, George R. "COMPOSITION AND PROPERTIES OF DRILLING AND COMPLETION FLUIDS", 1988.

11. Teichrob, R. R. "UNDERBALANCE DRILLING WITH FOAMED NITROGEN/WATER APPLICATION AND LIMITATIONS", CADE/CAODC SPRING DRILLING CONFERENCE, 1997.
12. Kuru, E. "NEW DIRECTIONS IN FOAM AND AERATED MUD RESEARCH AND DEVELOPMENT", SPE 59963, 1999.
13. Bonilla, Luis "EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE REOLOGY OF DE FOAMS", SPE 59752, 2000.
14. Chlingarian, George V. " DRILLING AND DRILLING FLUIDS", 1981.
15. Smith, Van Ness. "INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA EN INGENIERÍA QUÍMICA", 1998.
16. Schramm, L. "FOAMS: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry", Advances in Chemistry Series, 1994.
17. Mitchell, J. Billy, "VISCOSITY OF FOAM", TESIS, Universidad de Oklahoma, 1969.
18. Scott, S. L " AIR FOAM IMPROVES EFFICIENCY OF COMPLETION AND WORKOVER OPERATIONS IN LOW-PRESSURE GAS WELL", SPE 27922, 1995.