

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE ESTRUCTURA DE GEL Y SU COMPORTAMIENTO AL AGREGAR ADITIVOS INERTES Y NO INERTES EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA

Trabajo Especial de Grado presentado ante
la ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Por el Br. Carlos César Cruces Cedeño.

Caracas, Noviembre del 2002.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE ESTRUCTURA DE GEL Y SU COMPORTAMIENTO AL AGREGAR ADITIVOS INERTES Y NO INERTES EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA

Tutor Académico: Prof. Griselda Zorrilla de Mora

Trabajo Especial de Grado presentado ante
la ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Por el Br. Carlos César Cruces Cedeño.

Caracas, Noviembre del 2002.

Caracas, Noviembre de 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Carlos César Cruces Cedeño:

**DESARROLLO DE ESTRUCTURA DE GEL Y SU COMPORTAMIENTO AL
AGREGAR ADITIVOS INERTES Y NO INERTES EN FLUIDOS DE
PERFORACION BASE AGUA**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Pedro Vaca

Jurado

Prof. Victor Escalona

Jurado

Prof. Griselda Zorrilla de Mora

Tutor

*DEDICO ESTE TRABAJO A LAS PERSONAS
QUE MAS QUIERO EN EL MUNDO, QUE
ME ENSEÑARON EL CAMINO A SEGUIR,
Y QUE DIA A DIA ESTUVIERON A MI
LADO APOYANDOME: CARLOS,
MIGDALIA Y DELVIA*

GRACIAS...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme el don de vivir, y poder disfrutar y compartir mi vida con mis seres queridos.

A la Virgen del Valle, por estar conmigo y ayudarme en el momento que más la necesite, un millón de gracias.

A ti Mamá y Papá, mil gracias por estar siempre conmigo apoyándome y aguantándome todo, y por inculcarme que nada en esta vida es gratis, hay que luchar, y que no hay nada mejor que ganarse las cosas por si mismo, los amo mucho.

A ti querida hermana, no tengo palabras para agradecerte todo lo que haces y seguirás haciendo por mí, eres mi segunda madre, simplemente te quiero mucho...

A mi novia Mariana, por estar siempre a mi lado, y hacer de esto un reto para los dos, por guiarme, aunque tu digas que no, siempre hice caso de tus consejos, ahora es que falta camino por recorrer, recuerda lo que te dije una vez. Te Quiero Mucho.

A Leonardo, por abrirme las puertas de tu casa, y permitir que la parte final de este trabajo fuese realidad, siempre lo tendré presente, Gracias pana.

A la Universidad Central de Venezuela, por permitirme ser parte de sus aulas y por brindarme los conocimientos necesarios para ponerlos en práctica a lo largo de mi carrera.

A la profesora Griselda, mil gracias por confiar en mi y permitir ser parte de sus “muchachos”, y por compartir sus conocimientos conmigo, nunca lo olvidare.

A Jorge, por estar allí cuando surgía alguna pregunta, y siempre le encontrabas respuesta, gracias por aguantarnos.

A Melbis Zapata mi padrino, primo y compadre, y a su familia, gracias por su generosidad y por darme su amistad más allá del nexo familiar que nos une; espero siempre contar contigo así como tu cuentas conmigo.

A mi otra familia, Berenice y su combo, los quiero mucho, recuerda que eres como mi hermana y tus hijos son más que primos para mí.

A Jonathan, pana gracias por compartir este triunfo conmigo y ser un amigo con el que sé que puedo contar siempre, espero ver pronto tu triunfo.

Mis amigos UCV: David, José, Francisco, Franklig, Darwin, Carlos R., Claudio, Arturo, Francisco C., Elio, Maldonado, Cansin, Jhon, Gustavo M., Carlitro, César, Verónica, Diego, Reo, Orangel, y muchos más que no puedo escribir porque se acaba la hoja, les digo gracias por hacer que esta etapa sea inolvidable, y sin “darnos mala vida viejo”.

Cruces C. Carlos C.

**DESARROLLO DE ESTRUCTURA DE GEL Y SU
COMPORTAMIENTO AL AGREGAR ADITIVOS INERTES Y NO
INERTES EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA**

**Tutor Académico: Prof. Griselda Zorrilla de Mora. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2002, 154 pag.**

Palabras Claves: Aditivos, Coloide, Gel, Inerte

El trabajo realizado tiene como objetivo principal y fundamental, estudiar el desarrollo de la estructura de gel y la influencia que en esa propiedad tienen los aditivos inertes y no inertes, en los diferentes fluidos de perforación base agua. Los fluidos de perforación base agua utilizados y evaluados, fueron los sistemas agua – gel, lignosulfonato y polimérico, que son utilizados actualmente en perforaciones de pozos.

Para lograr el objetivo planteado, se procedió a añadir aditivos sólidos inertes y no inertes tales como: arenisca 99% cuarzo tamaño arena (mayor a 74 micrones) y tamaño arcilla – limo (menor a 74 micrones), y una lutita simulada a nivel de laboratorio con 70% bentonita la cual posee más de 40% de montmorilonita (arcilla reactiva) más 30% de la arenisca en tamaño arcilla – limo. En algunas pruebas especiales se usó una lutita proveniente del Estado Falcón. La cantidad añadida en cada fluido fue de 5%, 8% y 10% respecto al peso total de cada fluido de perforación formulado.

Luego del proceso de adición de estos aditivos sólidos, se comprobó que los fluidos base agua poliméricos, son los fluidos más tolerantes a la adición de estos sólidos, por lo cual fue el fluido al que se le observó mejor desarrollo de la estructura de gel y por el cual se pudo hacer un estudio más a fondo debido a su capacidad encapsulante de sólidos, la cual evita valores excesivos de esta propiedad. Sin embargo el lodo base agua que menos tolera la adición de estos sólidos es el lodo agua-gel o de iniciación, ya que en su formulación no presenta aditivos que puedan evitar que los sólidos afecten el sistema. Se comprobó también que las partículas que más influyen en el desarrollo de estas estructuras son las no inertes en tamaño coloidal, aunque las no inertes también influyen en menor magnitud.

INDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEORICO.....	3
2.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	3
2.1.1 Definición.....	3
2.1.2 Funciones Básicas.....	3
2.1.3 Composición.....	6
2.1.4 Clasificación.....	10
2.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	13
2.2.1 Densidad.....	13
2.2.2 Contenido de Sólidos.....	14
2.2.3 Pérdida de Filtrado.....	14
2.2.3.1 Tipos de Filtración.....	15
2.2.4 Factor pH.....	16
2.2.5 Reología.....	17
2.2.5.1 Factores que afectan la Reología.....	17
2.3 PROPIEDADES REOLOGICAS DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	18
2.3.1 Esfuerzos de Corte y Velocidad de Corte.....	19
2.3.2 Viscosidad.....	20
2.3.2.1 Viscosidad de Embudo.....	21
2.3.2.2 Viscosidad Plástica.....	21
2.3.2.3 Viscosidad Aparente.....	23
2.3.3 Punto Cedente.....	23
2.3.4 Gel y Resistencia de Gel.....	25

2.3.4.1 Coloides.....	28
2.3.4.1.1 Definición.....	28
2.3.4.1.2 Tipos de Coloides.....	29
2.3.4.2 Tipos de Gel.....	31
2.4 MODELOS REOLOGICOS.....	34
2.4.1 Tipos de Fluidos.....	34
2.4.1.1 Fluidos Newtonianos.....	34
2.4.1.2 Fluidos no Newtonianos.....	35
2.4.2 Modelo Plástico de Bingham.....	38
2.4.3 Modelo de la Ley Exponencial.....	39
2.4.4 Modelo de la Ley Exponencial Modificada.....	40
2.5 CONTAMINACION DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	
BASE AGUA.....	41
2.5.1 Contaminación con Sólidos de Perforación.....	43
2.5.1.1 Efectos de los Sólidos de Perforación en la Tasa de Penetración.....	45
2.5.1.2 Efectos de los Sólidos de Perforación en la Filtración del Lodo.....	45
2.5.1.3 Efectos de los Sólidos de Perforación en la Viscosidad Plástica.....	46
2.5.1.4 Efectos de los Sólidos de Perforación en el Punto Cedente y la Fuerza de Gel.....	47
2.5.2 Métodos para Combatir la Contaminación por Sólidos.....	48
2.5.2.1 Floculación Selectiva.....	49
2.5.2.2 Remoción Mecánica de Sólidos.....	49
2.5.2.3 Dilución.....	58
2.6 TAMAÑO DE PARTICULAS.....	60
2.7 SISTEMAS COMERCIALES.....	62
2.7.1 Sistema Polimérico Flo-pro™.....	62
2.7.2 Sistema Lignosulfonato.....	63
2.7.3 Sistema Agua – Gel.....	65

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	66
3.1 FUNDAMENTOS GENERALES DEL TRABAJO.....	66
3.2 ADITIVOS AÑADIDOS AL SISTEMA.....	68
3.3 FORMULACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	71
3.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES Y EQUIPOS.....	72
3.4.1 Densidad del Fluido.....	72
3.4.2 Porcentaje de Sólidos.....	74
3.4.3 Nivel de pH.....	76
3.4.4 Pérdida de Filtrado API.....	78
3.4.5 Reología.....	79
3.4.6 Envejecimiento Dinámico.....	82
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	86
4.1 SISTEMA BENTONITICO O AGUA-GEL.....	86
4.1.1 Formulación del Fluido.....	86
4.1.2 Resultados de las pruebas.....	87
4.1.2.1 Comportamiento de la Densidad.....	88
4.1.2.2 Comportamiento del pH.....	89
4.1.2.3 Comportamiento de la Viscosidad Aparente.....	90
4.1.2.4 Comportamiento de la Viscosidad Plástica.....	92
4.1.2.5 Comportamiento de la Pérdida de Filtrado.....	93
4.1.2.6 Comportamiento del Punto Cedente.....	95
4.1.2.7 Comportamiento de la Estructura de Gel.....	97
4.2 SISTEMA LIGNOSULFONATO.....	101
4.2.1 Formulación del Fluido.....	101
4.2.2 Resultados de las pruebas.....	102
4.2.2.1 Comportamiento de la Densidad.....	103
4.2.2.2 Comportamiento del pH.....	104
4.2.2.3 Comportamiento de la Viscosidad Aparente y Plástica.....	105
4.2.2.4 Comportamiento de la Pérdida de Filtrado.....	107
4.2.2.5 Comportamiento del Punto Cedente.....	109

4.2.2.6 Comportamiento de la Fuerza de Gel.....	111
4.3 SISTEMAPOLIMERICO FLO-PRO™.....	117
4.3.1 Formulaci3n del Fluido.....	117
4.3.2 Resultados de las pruebas.....	118
4.3.2.1 Comportamiento de la Densidad.....	120
4.3.2.2 Comportamiento del pH.....	121
4.3.2.3 Comportamiento de la Viscosidad Aparente y Pl3stica.....	122
4.3.2.4 Comportamiento de la P3rdida de Filtrado.....	124
4.3.2.5 Comportamiento del Punto Cedente.....	126
4.3.2.6 Comportamiento de la Fuerza de Gel.....	129
4.3.3 Resultados de las pruebas del Lodo Envejecido.....	135
4.3.3.1 Comportamiento del Punto Cedente despu3s de Envejecer.....	136
4.3.3.2 Comportamiento de la Fuerza de Gel despu3s de Envejecer.....	138
5. CONCLUSIONES.....	143
6. RECOMENDACIONES.....	144
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	145
8. APENDICES.....	147
8.1 APENDICE A.1 Difracci3n de Rayos X (Arenisca formaci3n Misoa).....	148
8.2 APENDICE A.2 Difracci3n de Rayos X (Bentonita Comercial).....	149
8.3 APENDICE A.3 Difracci3n de Rayos X (Lutita, Edo. Falc3n).....	150
8.4 CALCULOS TIPO.....	151

LISTA DE TABLAS

Tabla # 2.1	Clasificación de la fase líquida dentro de los fluidos de perforación.....	7
Tabla # 2.2	Clasificación de la fase sólida dentro de los fluidos de perforación.....	9
Tabla # 2.3	Materiales densificantes usados en los fluidos de perforación.....	9
Tabla # 2.4	Clasificación del tamaño de partículas para rocas sedimentareas.....	61
Tabla # 2.5	Clasificación del tamaño de partículas sólidas.....	61
Tabla # 3.1	Granulometría de la Arenisca usada como contaminante.....	69
Tabla # 4.1	Formulación del Sistema Agua – gel.....	86
Tabla # 4.2	Resultados de las pruebas al lodo Bentonítico antes y después de añadir los aditivos sólidos.....	87
Tabla # 4.3	Formulación del Sistema Lignosulfonato.....	101
Tabla # 4.4	Resultados de las pruebas al lodo lignosulfonato antes y después de añadir los aditivos sólidos.....	102
Tabla # 4.5	Formulación del Sistema Polimérico Flo - pro TM	117
Tabla # 4.6	Resultados de las pruebas al lodo Polimérico antes y después de añadir los aditivos sólidos.....	118
Tabla # 4.7	Resultados de las pruebas al lodo Polimérico antes y después de añadir lutita del Edo. Falcón.....	119
Tabla # 4.8	Resultados de las pruebas antes y después de añadir los aditivos sólidos al lodo Polimérico envejecido.....	135
Tabla # 8.1	Formulación del lodo polimérico con su Gravedad Específica.....	151
Tabla # 8.2	Cantidad de sólidos añadidos por cada porcentaje en masa.....	152
Tabla # 8.3	Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al lodo polimérico original.....	153

LISTA DE FIGURAS

Figura # 2.1 Clasificación de los fluidos de perforación.....	11
Figura # 2.2 Representación de flujo laminar dentro de una tubería.....	19
Figura # 2.3 Embudo Marsh.....	21
Figura # 2.4 Estructura casa de naipes de la arcilla montmorilonita.....	26
Figura # 2.5 Formación de estructura de gel y su rompimiento a causa del movimiento.....	27
Figura # 2.6 Tamaños de partículas coloidales.....	29
Figura # 2.7 Micela o coloide de asociación.....	30
Figura # 2.8 Tipos de geles.....	32
Figura # 2.9 Tipos de fluidos No Newtonianos.....	37
Figura # 2.10 Modelos reológicos.....	41
Figura # 2.11 Partículas presentes en el lodo a la entrada y salida de los ESS.....	49
Figura # 2.12 Zaranda vibratoria.....	51
Figura # 2.13 Comportamiento del fluido dentro del hidrociclón.....	52
Figura # 2.14 Desarenador.....	53
Figura # 2.15 Deslimador.....	54
Figura # 2.16 Limpia lodos.....	55
Figura # 2.17 Tres en uno.....	56
Figura # 2.18 Centrífuga.....	57
Figura # 2.19 Esquema de cálculo de dilución y descarte.....	59
Figura # 2.20 Tamaños de partículas con su respectivo equipo que las elimina.....	62
Figura # 3.1 Esquema de trabajo.....	68
Figura # 3.2 Histograma de frecuencia granulométrica de la arenisca usada como contaminante inerte.....	69
Figura # 3.3 Balanza de lodos.....	73
Figura # 3.4 Retorta.....	75
Figura # 3.5 Peachimetro.....	77
Figura # 3.6 Filtro prensa.....	78
Figura # 3.7 Viscosimetro Fann.....	81

Figura # 3.8 Celda de envejecimiento dinámico.....	84
Figura # 3.9 Horno de envejecimiento dinámico.....	84
Figura # 4.1 Comportamiento de la densidad en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos.....	88
Figura # 4.2 Comportamiento del pH en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos.....	89
Figura # 4.3 Comportamiento de la viscosidad aparente lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos.....	90
Figura # 4.4 Comportamiento de la viscosidad plástica lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos.....	92
Figura # 4.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arena.....	93
Figura # 4.6 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arcilla.....	93
Figura # 4.7 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir lutita.....	94
Figura # 4.8 Comportamiento del punto cedente del sistema agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos.....	95
Figura # 4.9 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del sistema agua – gel.....	96
Figura # 4.10 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arena.....	97
Figura # 4.11 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arcilla.....	97
Figura # 4.12 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena lutita.....	98
Figura # 4.13 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en sistema agua – gel.....	99
Figura # 4.14 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en sistema agua – gel.....	99

Figura # 4.15 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en sistema agua – gel.....	100
Figura # 4.16 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en sistema agua – gel caso comparativo 5%.....	100
Figura # 4.17 Comportamiento de la densidad en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos.....	103
Figura # 4.18 Comportamiento del pH en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos.....	104
Figura # 4.19 Comportamiento de la viscosidad aparente en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos.....	105
Figura # 4.20 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos.....	106
Figura # 4.21 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir arena tamaño arena.....	107
Figura # 4.22 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir arena tamaño arcilla.....	107
Figura # 4.23 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir lutita.....	108
Figura # 4.24 Comportamiento del punto cedente del lodo lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos.....	109
Figura # 4.25 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del lodo lignosulfonato.....	110
Figura # 4.26 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir arena tamaño arena.....	111
Figura # 4.27 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir arena tamaño arcilla.....	111
Figura # 4.28 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir lutita.....	112
Figura # 4.29 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo lignosulfonato.....	113

Figura # 4.30 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo lignosulfonato.....	113
Figura # 4.31 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo lignosulfonato.....	114
Figura # 4.32 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 5%.....	115
Figura # 4.33 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 8%.....	115
Figura # 4.34 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 10%.....	116
Figura # 4.35 Comportamiento de la densidad en lodos Polimérico antes y después de añadir aditivos sólidos.....	120
Figura # 4.36 Comportamiento del pH en lodos Polimérico antes y después de añadir aditivos sólidos.....	121
Figura # 4.37 Comportamiento de la viscosidad aparente en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos.....	122
Figura # 4.38 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos.....	122
Figura # 4.39 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arena.....	124
Figura # 4.40 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arcilla – limo.....	124
Figura # 4.41 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita simulada.....	125
Figura # 4.42 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita Estado Falcón.....	125
Figura # 4.43 Comportamiento del punto cedente en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos.....	126
Figura # 4.44 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del lodo Polimérico.....	128

Figura # 4.45 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arena.....	129
Figura # 4.46 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arcilla - limo.....	129
Figura # 4.47 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita simulada.....	130
Figura # 4.48 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita del Estado Falcón.....	130
Figura # 4.49 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo Polimérico.....	131
Figura # 4.50 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo Polimérico.....	132
Figura # 4.51 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo Polimérico.....	132
Figura # 4.52 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 5%.....	133
Figura # 4.53 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 8%.....	134
Figura # 4.54 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 10%.....	134
Figura # 4.55 Comportamiento del punto cedente al envejecer el lodo polimérico y al añadir aditivos sólidos.....	136
Figura # 4.56 Influencia del tamaño de partículas utilizando arena, sobre el punto cedente en lodo Polimérico envejecido.....	137
Figura # 4.57 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir arena tamaño arena.....	138
Figura # 4.58 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir arena tamaño arcilla – limo.....	138
Figura # 4.59 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir lutita simulada.....	139

Figura # 4.60 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 5%.....	140
Figura # 4.61 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 8%.....	140
Figura # 4.62 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 10%.....	141
Figura # 4.63 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo Polimérico envejecido.....	141
Figura # 4.64 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo Polimérico envejecido.....	142
Figura # 4.65 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo Polimérico envejecido.....	142

1. INTRODUCCIÓN

En el día a día de una perforación de un pozo, se deben tener en cuenta diversos parámetros, y dentro de estos, se encuentra el fluido de perforación. Este es de vital importancia ya que representa entre el 10% y 15% del costo total del pozo a perforar, y si su funcionamiento no es eficiente puede ocasionar múltiples problemas, que podrían ocasionar la pérdida del pozo.

Para evitar esos problemas, al fluido de perforación se le debe hacer un seguimiento diario y exhaustivo de todas sus propiedades, para garantizar un funcionamiento eficiente, y así mantener las propiedades dentro del rango aceptable para las características específicas del campo a perforar.

Dentro de todas estas propiedades se encuentra la formación de una estructura rígida denominada gel, la cual se forma a condiciones estáticas y que mide la capacidad de suspensión de los ripios mientras no se está circulando lodo, o también llamada fuerza de gelatinización. Si esta propiedad no se encuentra en un rango aceptable podría ocasionar excesiva presión de las bombas para iniciar de nuevo el bombeo de lodo hacia la formación para cumplir con sus funciones, esto conllevaría a problemas tales como atascamiento de tubería y desgaste de las bombas entre otras.

Los excesivos valores de fuerza de gel están íntimamente ligados con la inclusión de sólidos al lodo, por eso hay que tener cuidado ya que dentro de las funciones del lodo se encuentra transportar los ripios a la superficie, que en pocas palabras, es la inclusión de estos sólidos; aunque estos sólidos deben ser separados por los distintos mecanismos de remoción, siempre existirá la presencia de ellos, porque esos equipos y técnicas no son 100 por ciento efectivos. Se debe aprender a vivir y a perforar los pozos teniendo en cuenta la presencia de estas partículas, que mientras más pequeñas son en tamaño más difíciles son de eliminar, y más influyentes son en la formación de estas estructuras.

También es muy importante tener en cuenta que dependiendo del tipo de carga que presente la partícula, se tendrá mayor o menor influencia en la formación de las estructuras de gel.

El trabajo que a continuación se presenta tratará de conocer y demostrar la influencia que tienen las partículas en sus diversos tamaños y formas en la formación de geles, y de que manera entonces influiría en su formación también la presencia de partículas inertes y no inertes en el lodo. Es importante mencionar que dentro de este trabajo solamente se utilizarán los fluidos de perforación base agua.

Hay que mencionar que este trabajo está estructurado de la siguiente manera: una primera parte de revisión bibliográfica donde se explican diversos temas de importancia relevante para este trabajo; una segunda parte que explica la metodología experimental seguida para cumplir los objetivos planteados en la investigación y luego la parte de discusión de resultados de las pruebas realizadas para luego poder concluir y recomendar según los alcances y limitaciones del mismo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

2.1.1 Definición

El fluido de perforación es un fluido de características físicas y químicas apropiadas, que puede ser aire o gas, agua, aceite y combinaciones de agua y aceite con diferentes contenidos de sólidos, cuyo propósito fundamental es hacer segura la perforación y cumplir con algunas funciones. No debe ser tóxico al medio ambiente aunque con frecuencia lo es, ni corrosivo ni inflamable, pero lo que si debe ser es estable a altas temperaturas y mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones de perforación ⁽¹⁰⁾.

2.1.2 Funciones Básicas.

- 1. Transportar los recortes de perforación y los derrumbes de las paredes del hoyo a la superficie.**

Los ripios son más pesados que el fluido de perforación, por lo que al mismo tiempo que son levantados por el fluido que circula por el espacio anular, están sujetos a la fuerza de gravedad y por lo tanto, tienden a caer al fondo del pozo. La velocidad a la cual estas partículas caen a través del fluido depende principalmente de la densidad y viscosidad del fluido, así como también del tamaño, forma y densidad de las partículas ⁽¹¹⁾.

La habilidad del fluido para transportar los ripios hacia la superficie, depende en gran parte de la velocidad con la que el mismo viaja a través del espacio anular, y para que los ripios asciendan a la superficie, la velocidad del fluido en el anular debe ser mayor que la velocidad de asentamiento de los ripios. Si el hoyo no se limpia adecuadamente el material sólido del fluido y los ripios se acumularán en el espacio anular incrementando la torsión y la presión hidrostática ⁽¹¹⁾, trayendo como consecuencias una tubería aprisionada, pérdida de circulación del fluido de perforación y una velocidad de penetración reducida.

2. Enfriar y lubricar la mecha y la sarta de perforación.

La fricción originada por el contacto entre la mecha de perforación con la formación genera calor. Este calor es en parte removido por el lodo y expulsado a medida que el fluido retorna a la superficie ⁽¹⁰⁾, luego de haber sido circulado por el espacio anular del pozo.

El fluido de perforación también ejerce un efecto lubricante para la mecha, para la sarta y para el revestimiento durante el proceso de perforación ⁽¹¹⁾. Entre los beneficios que se obtienen de esta propiedad del lodo de perforación, se encuentran mayor tiempo de vida útil de la mecha, reducción en el desgaste por fricción entre la sarta de perforación y la tubería de revestimiento y la disminución en los esfuerzos de torsión y tensión en la tubería de perforación.

3. Suspensión de los ripios y el material densificante.

Cuando el fluido no está circulando se elimina la fuerza de levantamiento del mismo a causa de que el bombeo de fluido hacia el pozo es detenido por consiguiente su velocidad de desplazamiento es cero. La propiedad tixotrópica del lodo que no es más nada que la capacidad de formar una estructura del tipo gel cuando no se está circulando fluido permite mantener en suspensión esas partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación para luego ser llevadas a la superficie cuando esta se reinicia. El lodo debe, por supuesto, recuperar su fluidez cuando se reinicia la circulación ⁽¹¹⁾.

4. Transmitir potencia hidráulica sobre la formación a través de la mecha.

Potencia hidráulica se refiere a la función dependiente de la tasa de circulación del lodo, su presión de bombeo y el diámetro de las boquillas de la mecha, con lo que se realiza el limpiado óptimo del hoyo. Durante la perforación, el lodo es expulsado a través de las boquillas de la mecha a gran velocidad. Esta fuerza hidráulica hace que la superficie por debajo de la mecha esté libre de ripios, pero cuando no son removidos eficientemente, la mecha sigue perforando sobre los recortes viejos reduciendo así la tasa de penetración. Esta

remoción eficiente de los ripsos o recortes que se forman en la superficie de la mecha, depende de las propiedades físicas del lodo (densidad y viscosidad) y de su velocidad al salir de las boquillas ⁽¹⁰⁾.

5. Controlar las presiones de las formaciones.

El agua, el gas y el petróleo que se encuentran en el subsuelo están bajo gran presión. Esta presión debe evitar un flujo incontrolado de esos fluidos de formación en el interior del pozo, éste control se logra manteniendo una presión hidrostática suficientemente adecuada en el espacio anular ⁽¹⁰⁾. Esta presión puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$Ph = 0,052 * D * h \qquad \text{Ecuación \# 2.1}$$

Donde:

Ph: Presión hidrostática en lpc.

D: Densidad del lodo en lb/gal.

h: Altura de la columna del fluido de perforación en pies.

0,052: Constante de conversión usada para expresar la presión hidrostática en lpc.

6. Protección y estabilización de las paredes del pozo.

El soporte lateral de las paredes del pozo se realiza por medio del fluido de perforación hasta que sea colocada la tubería de revestimiento, de otro modo las paredes se derrumbarían, esto se lleva a cabo mediante la formación de un revoque liso, delgado, flexible e impermeable, minimizando los problemas de derrumbes y atascamiento de la tubería ⁽¹¹⁾.

7. Suspensión de la sarta y del revestimiento.

El peso de la sarta de perforación y de la tubería de revestimiento es muy grande, estos enormes pesos son un gran esfuerzo para los equipos de perforación ⁽¹¹⁾, sin embargo

sumergidas en el lodo presentan una disminución a causa del factor de flotabilidad. El factor de flotación (Ff) se puede expresar de la siguiente forma:

$$Ff = 1 - (D / 65.6) \quad \text{Ecuación \# 2.2}$$

Donde:

Ff: Factor de Flotación adimensional.

D: Densidad del Lodo en lb/gal.

65.6: Densidad promedio de la tubería de perforación expresada en lbs/gal.

8. Facilitar la máxima obtención de información deseada acerca de las formaciones perforadas.

A partir del estudio de los recortes de formación que son separados por los equipos de control de sólidos del lodo de perforación, se pueden obtener innumerables parámetros informativos tales como: que tipo de formación estamos perforando, si puede existir o no hidrocarburo etc...⁽¹¹⁾

9. Proveer un medio adecuado para el perfilaje de cable.

Si bien el lodo perturba las características originales de la formación, su presencia es necesaria para llevar a cabo los perfiles de cable que son empleados para la evaluación de las formaciones penetradas. La utilización de esos perfiles requiere que el lodo sea buen conductor de electricidad y que presente propiedades eléctricas diferentes a las que poseen los fluidos de la formación⁽¹¹⁾.

2.1.3 Composición.

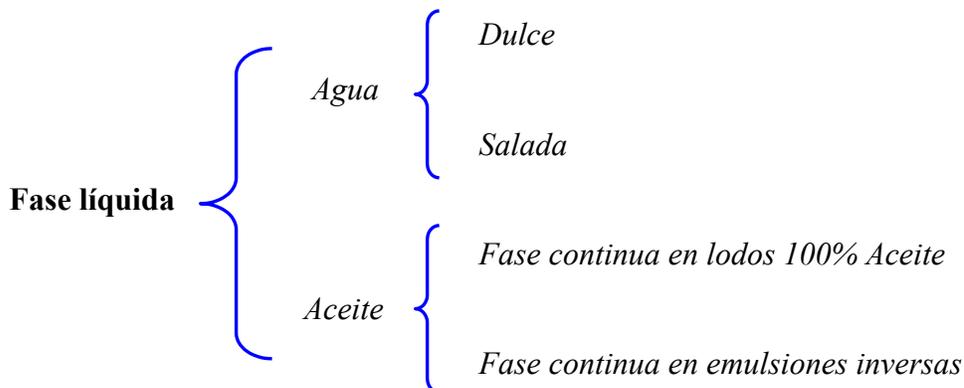
Los fluidos de perforación, bien sea, base agua o base aceite están compuestos por dos fases: una sólida y una líquida⁽¹⁰⁾. También existen algunos fluidos de perforación que son llamados especiales, los cuales están compuestos por aire y gas los cuales reciben el

nombre de fluidos neumáticos de perforación ⁽¹¹⁾ y que son usados en casos excepcionales donde su requerimiento es indispensable y bajo condiciones específicas.

1. Fase líquida:

La fase líquida de un fluido de perforación se tiende a relacionar con la fase continua del lodo, es decir, puede ser agua o aceite según el tipo de lodo. En un lodo base agua, la fase continua es agua y en un lodo base aceite la fase continua es aceite. El filtrado del lodo proviene en su mayor parte de la fase continua mientras que el revoque se forma a partir de la fase dispersa. La clasificación de la fase líquida puede ser visualizada en la tabla 2.1.

Tabla # 2.1 Clasificación de la fase líquida dentro de los fluidos de perforación⁽¹⁰⁾



- **Agua dulce:**

El agua dulce es la fase líquida de mayor uso en los diferentes tipos de fluidos de perforación existentes, esta debe ser usada en zonas donde no haya presencia de arcilla hidratables ⁽¹⁰⁾ y con presiones de formación no muy altas.

- **Agua de mar:**

El agua de mar tiene uso específico, es usado más comúnmente cuando se perfora costa afuera o en plataforma debido a la presencia de agua salada ⁽¹¹⁾, y también algunas veces en presencia de arcillas hidratables.

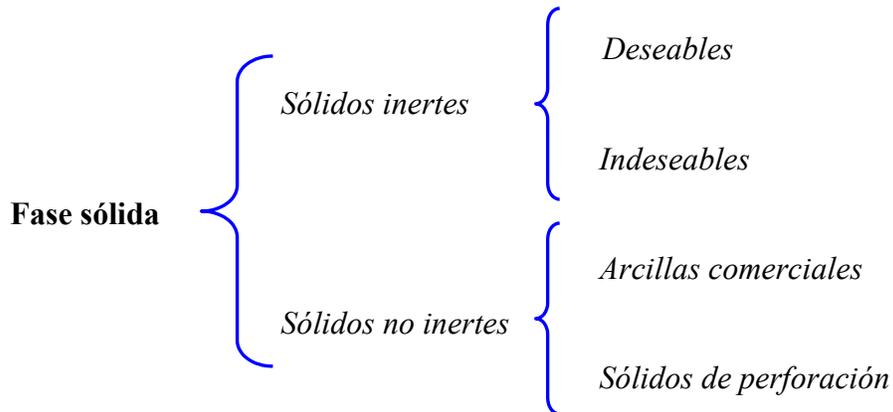
- **Aceite:**

El aceite es usado como una fase continua en los fluidos de perforación ya que este tipo de lodos es mucho menos sensible a la contaminación, a la temperatura, ayudan a mantener las arcillas hidratables inhibidas, también ayudan a mantener la estabilidad del hoyo y a mantener una buena lubricidad disminuyendo el atascamiento de la tubería, pueden perforar zonas productoras que serían afectadas por el agua debido a la filtración; su único inconveniente es el incremento en los costos del barril de lodo ⁽¹¹⁾.

2. Fase sólida:

La fase sólida de un fluido de perforación como su nombre lo indica, esta compuesta por todos los aditivos sólidos que están presentes en el lodo y que juegan un papel importante en el acondicionamiento y mantenimientos de los lodos de perforación, estos se pueden dividir en sólidos inertes (deseables e indeseables) y sólidos no inertes (arcillas comerciales y sólidos de perforación), todo esto puede ser visualizado mejor por medio de la tabla 2.2.

Tabla # 2.2 Clasificación de la fase sólida dentro de los fluidos de perforación⁽¹⁰⁾



- **Sólidos inertes deseables**

Estos tipos de sólidos están compuestos por los aditivos agregados al lodo, pero muy especialmente por los que ayudan a proveer peso al lodo; estos son los sólidos de alta gravedad específica como el sulfato de bario (BaSO_4) o el carbonato de calcio (CaCO_3). La siguiente tabla 2.3 muestra sólidos usados como material densificante.

Tabla # 2.3 Materiales densificantes usados en los fluidos de perforación⁽¹¹⁾

Densificante	Gravedad específica
Galena (SPb)	7.5
Hematita (Fe_2O_3)	5.1
Magnetita (Fe_3O_4)	5.1
Barita (BaSO_4)	4.2
Calcita (CaCO_3)	2.7

- **Sólidos inertes indeseables:**

En este grupo de los sólidos inertes se encuentran todos los sólidos de perforación o ripios, provenientes de arenas, calizas, dolomitas, etc. Estos tipos de sólidos son generalmente

abrasivos ⁽¹¹⁾, y si son mantenidos en el lodo pueden causar severos daños a los pistones y cilindros de las bombas pertenecientes al sistema de circulación del lodo.

En este trabajo se demostrará que este tipo de sólidos también poseen una gran influencia en el comportamiento del lodo, y muy especialmente en parámetros tales como fuerza de gel y punto cedente.

- **Sólidos no inertes:**

Son principalmente sólidos arcillosos que poseen cargas eléctricas, estos pueden ser incorporados al lodo durante la perforación o ser agregados ⁽¹¹⁾ para obtener una propiedad deseada. Entre los principales tenemos: sólidos arcillosos comerciales y los sólidos arcillosos de formación o más comúnmente llamados lutitas. Estas partículas hacen que el lodo tenga una variación en sus propiedades especialmente en las reológicas, por eso se debe proveer de unos buenos equipos de separación de sólidos para evitar esos cambios bruscos y no dañar el lodo y mucho menos la formación.

2.1.4 Clasificación.

Cuando nos referimos a fluidos de perforación en general, incluimos a los líquidos y a los gases; cuando un fluido de perforación es líquido se le denomina lodo o fluido de perforación, pero cuando hablamos de gases y espumas se les denominan fluidos neumáticos de perforación⁽¹¹⁾. En la siguiente figura observaremos más fácilmente la clasificación de los diversos fluidos de perforación.

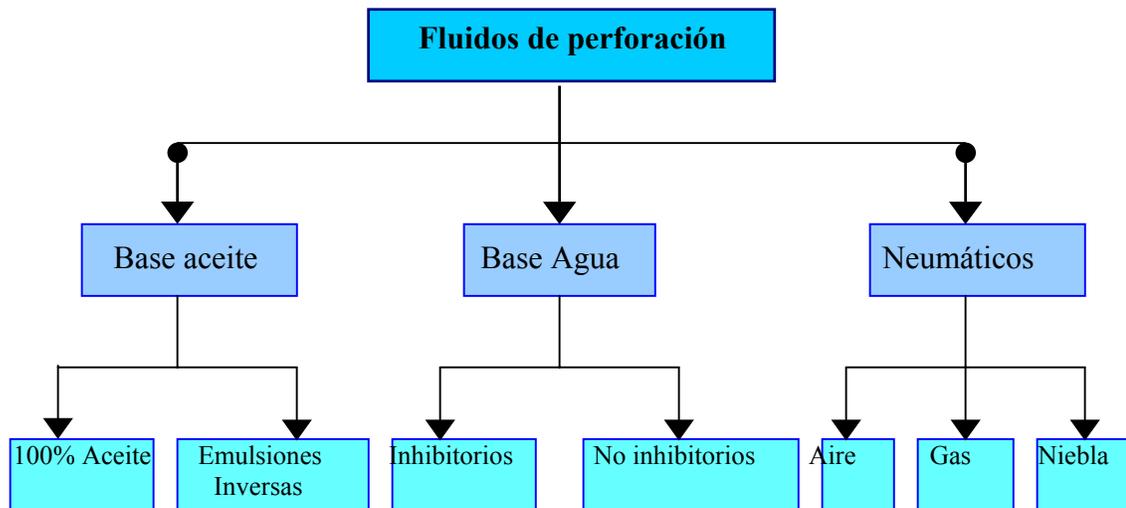


Figura # 2.1 Clasificación de los fluidos de perforación⁽¹¹⁾

La fase continua de una emulsión es la parte líquida donde se encuentran suspendidos los sólidos y además otro líquido en forma de glóbulos muy pequeños. El líquido suspendido es la fase dispersa y el líquido dentro del cual esa fase dispersa está suspendida es la fase continua. En una emulsión normal aceite en agua la fase continua es el agua, mientras que en un lodo base aceite la fase continua es el aceite y la dispersa es el agua. La fase continua en un lodo siempre es líquida, mientras que en la fase dispersa puede ser sólida, líquida y gaseosa; esto nos lleva a tener en cuenta mucho más que la fase líquida se relaciona mucho con la fase continua y en algunos casos significan lo mismo.

Se pueden clasificar los fluidos de perforación como fluidos base agua, fluidos base aceite y fluidos aireados o neumáticos. El agua, el aceite o ambos, son necesarios para formar el volumen de lodo y se añade desde la superficie. Los aditivos que se emplean para modificar las características del lodo son agentes densificantes (barita, carbonato de calcio y sales solubles entre otros), arcillas viscosificantes, polímeros y agentes emulsionantes, los cuales hacen que los lodos se viscosifiquen aumentando así, su capacidad para transportar y suspender los recortes y los materiales sólidos densificantes.

- **Lodos base agua:**

Como su nombre lo indica su fase continua es agua o la emulsión es aceite en agua. También de acuerdo al efecto ejercido en el lodo por los sólidos de perforación y las arcillas comerciales, este tipo de fluidos se puede clasificar en dispersos y no dispersos y esto a su vez en inhibidos y no inhibidos ⁽¹⁰⁾.

Un fluido disperso es aquel donde en su composición existe la presencia de aditivos que, ayudan a aumentar su viscosidad, fuerza de gel, así como otras propiedades, para obtener las condiciones requeridas. Cuando no son agregados ningún tipo de aditivos se habla de un fluido no disperso, pero se corre el riesgo que si ocurre una contaminación no pueda el lodo contrarrestar ese efecto ⁽¹⁰⁾.

El término inhibido y no inhibido se refiere a los fluidos de perforación que evitan la hidratación de las arcilla y su subsiguiente dispersión en el fluido.

En el mercado hoy en día existen diversos sistemas de fluidos de perforación comerciales probados en campo para diversas condiciones, como por ejemplo: polimérico (flopro, poliplus), lignosulfonato, bentonítico etc. Más adelante serán explicados un poco estos sistemas y sus aplicaciones.

- **Lodos base aceite:**

Su fase continua es aceite, que puede ser mineral, vegetal y sintético, y la fase dispersa es agua ⁽¹⁰⁾. Pueden ser 100% aceite, emulsiones de agua en aceite llamadas emulsiones inversas. Se utilizan especialmente para perforar estratos reactivos al agua, como por ejemplo lutitas, también en pozos profundos con alta presión y temperatura, en formaciones sujetas a pegas por presiones diferenciales. Las Emulsiones inversas son poco estables, por consiguiente requieren de grandes cantidades de emulsionantes para asegurar la estabilidad de la emulsión, tienen tolerancia a contaminaciones por sólidos y agua, pero poseen un elevado costo de mantenimiento.

Los lodos 100% aceite, no contienen agua, son utilizados para recuperar efectivamente núcleos y perforar arcillas de formación que pueden ser hidratables. Tienen como desventaja la baja tolerancia a la contaminación con agua, la pérdida de volúmenes de aceite en superficie por la adherencia entre el lodo y el ripio de formación y su elevado costo para el tratamiento de los mismos ⁽¹⁰⁾.

- **Fluidos neumáticos:**

Este tipo de fluidos poseen como fase continua un gas al cual, se le agrega poca cantidad de agua para formar fluidos denominados neblinas, o una mayor cantidad de agua para formar las llamadas espumas. El gas puede ser natural, aire o nitrógeno.

La perforación con aire o niebla es usado en zonas donde las formaciones contienen una cantidad relativamente pequeña de fluidos de formación ⁽¹⁰⁾, y son muy útiles en áreas donde la pérdida de circulación puede ocurrir y convertirse en un inmenso problema ⁽¹¹⁾.

2.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Entre las propiedades de un fluido de perforación, tienen importancia la densidad, las propiedades reológicas, la pérdida de filtrado, contenido de sólidos para poder caracterizar y clasificar el fluido de perforación.

2.2.1 Densidad ^(11y 12)

Esta es una de las principales propiedades de un fluido de perforación, cuya función primordial es mantener los fluidos contenidos dentro del hoyo en el yacimiento durante la perforación. También mantiene las paredes del hoyo al transmitir la presión requerida por las mismas.

Para prevenir la entrada de fluidos desde la formación al hoyo, el lodo debe proveer una presión mayor a la presión de poros encontrada en los estratos a ser perforados.

La densidad máxima del lodo que se requiere en la perforación de un pozo esta determinada por el gradiente de presión; pero un exceso en la densidad del fluido puede ocasionar la fractura de la formación.

La densidad del lodo se expresa en unidades de libras por galón (lb/gal), libras por pies cúbico (lb/pies³), kilogramos por metro cúbico (Kg/m³), o es comparada al peso del agua, en términos de la gravedad específica (GE).

Una gran cantidad de materiales fueron utilizados como agentes densificantes para el lodo, tales como: barita, oxido de hierro, carbonato de calcio y arcillas nativas. De todos estos materiales, en la actualidad la barita es la más utilizada debido a su bajo costo, a su alta gravedad específica y muy importante por ser inerte.

2.2.2 Contenido de sólidos ⁽¹²⁾.

En un fluido de perforación existen sólidos, estos pueden ser deseables como la arcilla y la barita; e indeseables como ripios y arena, los cuales deben ser eliminados del sistema a través de los equipos de separación de sólidos y otros métodos tales como dilución.

El elevado contenido de sólidos indeseables en el lodo, trae como consecuencia un aumento en la viscosidad plástica del lodo, reflejándose esto, en un aumento de la presión de funcionamiento de las bombas para mantener el caudal requerido de lodo, lo cual produce una alta contrapresión capaz de ocasionar pérdidas de circulación.

2.2.3 Perdida de filtrado ^(7 y 8).

La perdida de fluido es una de las propiedades del lodo con importancia fundamental en las operaciones de perforación y completación de pozos. Todo lodo debe poseer la capacidad de formar un revoque en la pared del hoyo ⁽¹²⁾. El revoque es el resultado del forzamiento por diferencial de presión en una formación permeable, de los sólidos del lodo contra la pared del hoyo. Los factores que gobiernan la invasión de filtrado dentro de una formación

arenosa son: la distribución del tamaño de partículas de los sólidos del lodo, tamaño del poro de la arena, una formación permeable que tenga la capacidad de permitir que el flujo pase a través de ella; la permeabilidad está relacionada con el tamaño y la configuración de los canales interconectados en la roca.

El objetivo de un control adecuado de esta propiedad, es formar un revoque delgado, resistente sobre la superficie de las formaciones permeables e impedir pérdidas elevadas de filtrado. Además, muy importante el filtrado debe ser compatible con la formación y con los fluidos presentes en la misma.

Mediante el control apropiado de las pérdidas de filtrado se puede obtener beneficio como menor riesgo de aprisionamiento de tuberías en formaciones permeables, mayor producción a la formación productora, mejor interpretación de los perfiles eléctricos y efectos beneficiosos para la estabilidad del pozo.

En si el proceso de filtración se define como todo proceso de separación de sólidos suspendidos en su líquido al forzar su paso a través de un medio poroso por efecto de un diferencial de presión. También es definida como la pérdida de la fase líquida del fluido durante la perforación hacia una formación permeable, esto ocurre cuando la permeabilidad de la formación es tal, que permite el paso de fluido a través del espacio poroso.

En la actualidad se están realizando trabajos investigativos, sobre conocer que tan rentable es o no, el remover el revoque formado en la pared de la arena productora a la hora de poner a producir el pozo; esto es a causa de que existen teorías de que el revoque en algunos casos puede ayudar al proceso de producción; aunque la tendencia es de disminuir la permeabilidad ya que una de las propiedades del revoque es ser impermeable de adentro hacia fuera y por consiguiente de afuera hacia adentro.

2.2.3.1 Tipos de filtración ^(7 y 8).

Básicamente existen dos tipos de filtración:

- Estática
- Dinámica

Filtración estática.

Este tipo de filtración ocurre cuando el fluido no está en movimiento, el revoque aumenta de espesor (engruesándose) a medida que aumenta el tiempo y la velocidad o tasa de filtración disminuye, por lo que el control de este tipo de filtración se basa en prevenir la formación de revoques muy gruesos.

Filtración dinámica.

Este tipo de filtración ocurre cuando el lodo fluye a lo largo de la superficie filtrante, se diferencia de la estática en que a medida que el flujo de lodo pasa por la pared del pozo tiene a raspar el revoque, a la vez que este se va formando, hasta que espesor se estabiliza con el tiempo y la velocidad de filtración se vuelve constante. El control de este tipo de filtración se basa en prevenir una pérdida excesiva de filtrado a la formación.

2.2.4 Factor pH ^(4 y 5)

El nivel de acidez y alcalinidad del lodo es expresado en términos de pH. Alrededor de 7 como un valor de pH se dice que la solución es neutra como el agua pura.

El control óptimo de algunos sistemas de lodo está basado en el nivel de pH, aunque también es usado para la detección y tratamiento de contaminantes. Como ejemplo un lodo base agua con bentonita tiene un pH entre 8 y 9, y una contaminación con cemento puede elevar el pH a valores entre 10 y 11, y luego un tratamiento puede llevarlo de nuevo a valores entre 8 y 9 respectivamente.

Otra de las razones por la cual es importante controlar el pH, es porque niveles menores a 7 se presentan un escenario ácido por medio del cual ocasionaría corrosión de las tuberías. Además un buen control del pH llevaría a un buen desempeño de los adelgazantes.

2.2.5 Reología

La reología se define como la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia que describe el comportamiento de los fluidos de perforación en el espacio anular ⁽¹⁰⁾, tales fluidos deben poseer una resistencia al flujo que no sea descrita por la ecuación que rige a los fluidos newtonianos; estos fluidos son no newtonianos y la diferencia mecánica entre ellos, consiste en el esfuerzo de corte a vencer al momento de iniciar el flujo ^(11 y 12).

También puede ser definida como la ciencia que estudia la relación existente entre la velocidad de corte y los esfuerzos de corte de un fluido de perforación, ya que todas las propiedades de flujo de un lodo de perforación dependen de esa relación. La medición de las propiedades reológicas de un lodo son importantes para calcular las pérdidas de presión en el sistema de circulación, y determinar la capacidad del fluido para elevar los ripios y desprendimientos de las paredes del hoyo hasta la superficie, también sirve para analizar el comportamiento del lodo de perforación frente a contaminantes sólidos ⁽¹²⁾.

2.2.5.1 Factores que afectan la reología ⁽¹²⁾.

En el campo no existe la posibilidad de determinar las propiedades reológicas de un lodo de perforación a condiciones reales del pozo, es decir, presión, temperatura tiempo. Sin embargo, es de vital importancia tomar en cuenta el efecto que estas variables pueden tener sobre la reología del fluido, efecto que en algunos casos pueden llevar a daños de gran magnitud. A continuación se muestran algunos de los efectos que causan estas variables en la reología:

Presión:

Este parámetro ejerce poco efecto sobre la reología de los lodos base agua, pero afecta significativamente la reología en los lodos base aceite ya que puede afectar la emulsión.

Temperatura:

Generalmente la viscosidad decrece a medida que aumenta la temperatura, hay excepciones en casos de altas temperaturas o en lodos de calcio, en los cuales a unos 300°F comienza a producirse la gelificación y en algunos casos cementación.

Tiempo:

La reología de un lodo depende del tiempo, es como si el lodo de perforación recordara las velocidades de corte que ha experimentado en el pasado y permitiera que su esfuerzo de corte a la velocidad de corte actual, sea influenciada parcialmente por esa memoria. Así, el orden de las lecturas en el viscosímetro Fann deben tomarse en el orden correcto, primero a 600 y luego a 300 rpm, ya que al invertirse pudiese ocasionar errores. La resistencia de gel es otra manifestación de la dependencia del tiempo, ya que sólo se desarrolla después de un periodo de tiempo durante el cual, el lodo de perforación ha sido sometido a una velocidad de corte igual a cero, o mejor dicho a condiciones estáticas.

2.3 PROPIEDADES REOLOGICAS DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Como fue definido anteriormente la reología juega un papel importante dentro de la caracterización de un fluido de perforación, por eso, se debe tener un control completo de estas propiedades; estas deben ser controladas si se pretende que el fluido se comporte adecuadamente y así cumplir sus funciones con eficiencia.

2.3.1 Esfuerzos de corte y velocidad de corte

Estos dos parámetros son propiedades físicas abstractas que están íntimamente relacionadas con la deformación de la materia ⁽¹¹⁾.

Para poder entender estas propiedades, considere el comportamiento de un fluido dentro de una tubería, si la velocidad del fluido no es elevada y garantizamos un flujo laminar, es decir, las partículas tienden a moverse en líneas rectas paralelas a la dirección del flujo; las partículas que están más cerca de la pared de la tubería se moverán más lentamente que las que están más alejadas. Imaginemos que el líquido se está moviendo en forma de placas paralelas representada por las flechas tal y como se observa en la figura 2.2.

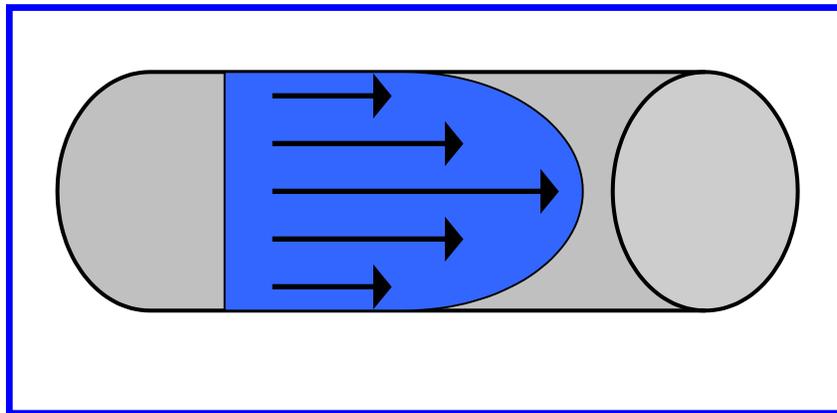


Figura # 2.2 Representación de flujo laminar dentro de una tubería ⁽¹¹⁾

Las partículas pertenecientes a una misma capa de fluido se mueven a igual velocidad, sin embargo, las diferentes capas se mueven a velocidades diferentes. La velocidad relativa con que una capa individual se mueve con respecto a otra capa vecina se denomina velocidad de corte ⁽¹¹⁾, También es importante saber que, el fluido tiende a oponerse al hecho de que las capas se muevan a velocidades diferentes, entonces la magnitud de la fuerza de resistencia que una capa individual ofrece al desplazamiento de las capas vecinas se denomina tensión de corte ⁽¹¹⁾.

A velocidades altas, el lodo de perforación no sigue un comportamiento de flujo laminar, es decir, las partículas tienden a seguir un movimiento errante, lo que se conoce como flujo turbulento ⁽¹¹⁾; los conceptos de velocidad de corte y esfuerzo de corte no pueden ser aplicados directamente al flujo turbulento, porque como fue dicho anteriormente, las partículas describen un movimiento errante; y como se puede observar estos dos parámetros están muy relacionados el uno con otro, ya que una velocidad de corte alta produce una tensión de corte alta. Dentro del sistema de circulación de un equipo de perforación la velocidad de corte depende de la velocidad promedio del lodo en la sección en la que se está atravesando en ese momento a través del hoyo. Se debe garantizar velocidades de corte altas en las boquillas de la mecha, y luego debe existir una disminución de la misma en el espacio anular, esto para evitar el régimen de flujo turbulento que puede ayudar a socavar la formación ⁽¹¹⁾. El esfuerzo de corte en el sistema circulatorio está relacionado o se ve reflejado con la presión de la bomba.

2.3.2 Viscosidad

En general, viscosidad es un término usado para definir la fricción interna generada por un fluido cuando se es aplicada una fuerza para ocasionar movimiento o flujo del fluido ⁽⁵⁾.

También se dice que la viscosidad es la resistencia que ofrece un fluido para desplazarse y la relación existente entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte define la viscosidad de un fluido, como se muestra en la siguiente ecuación ⁽¹⁰⁾.

$$V = \frac{EC}{VC} \quad \text{Ecuación \# 2.3}$$

Donde:

EC: Esfuerzo de corte

V: Viscosidad

VC: Velocidad de corte

2.3.2.1 Viscosidad de embudo

En el campo la viscosidad se determina con el embudo Marsh, aunque la información más importante y exacta se logra mediante el empleo de viscosímetros de lectura directa, como el Fann de seis velocidades ⁽¹⁰⁾.

El embudo Marsh carece de base científica, pero permite comparar la viscosidad del lodo de perforación con respecto al agua, esto es una medida usada en campo ya que es un indicador de las condiciones del lodo que el personal del campo en general comprende. En esta forma se puede tener idea de que tan viscoso se encuentra el lodo; la manera de usarlo es añadir $\frac{1}{4}$ de galón en el embudo y se mide el tiempo que tarda en salir todo el lodo, con ese tiempo comparamos con respecto al tiempo del agua, por consiguiente se sabrá que tan viscoso esta. La medida de viscosidad obtenida es influenciada por el grado de gelatinización y por la densidad, la cual varia la columna hidrostática de fluido dentro del embudo. A continuación se presenta la foto de un embudo Marsh.



Figura # 2.3 Embudo Marsh

2.3.2.2 Viscosidad plástica

La viscosidad plástica se define como la parte de la resistencia a fluir causada por la fricción mecánica generada por los sólidos presentes en el fluido de perforación ⁽¹¹⁾.

Otra manera de definir viscosidad plástica puede ser como aquella porción de la resistencia a fluir causada por la fricción mecánica entre las partículas sólidas del lodo de perforación y la viscosidad de la fase líquida ⁽¹⁰⁾. Esa fricción mecánica puede ser causada por la interacción de: sólidos con sólidos, sólidos con líquidos.

Esa propiedad puede ser afectada directamente por varios factores que son de vital importancia para el buen rendimiento de un fluido de perforación los cuales son: concentración de sólidos, tamaño y forma de las partículas sólidas, viscosidad de la fase líquida presente en el lodo.

La viscosidad plástica aumenta al incrementarse el contenido de partículas sólidas dentro del lodo, debido a un aumento en la fricción de partículas sólidas a causa de la presencia de mayor número de ellas.

Mientras tanto la viscosidad de la fase líquida del lodo por si sola permanece igual, este tipo de viscosidad se ve afectada por la temperatura y no por la cantidad ni tipo de sólidos. Por consiguiente la combinación de ambas viscosidades da como resultado la viscosidad plástica de un fluido ⁽¹⁰⁾.

La fase sólida que está presente en los fluidos de perforación es la principal preocupación para los especialistas. Un incremento en la viscosidad plástica, se ve reflejado en un aumento en la cantidad de sólidos, una reducción en el tamaño de las partículas sólidas, un cambio en la forma de las mismas o por medio de una combinación de estos factores descritos anteriormente.

La viscosidad plástica es expresada en centipoises y es medida por medio de un viscosímetro Fann de seis velocidades, las cuales son: 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm, para calcular la viscosidad plástica se usa la siguiente ecuación:

$$V_p \text{ (cp)} = \text{Lectura 600 rpm} - \text{Lectura 300 rpm}$$

Ecuación # 2.4

2.3.2.3 Viscosidad aparente

Se define como la medición en centipoises que un fluido Newtoniano debe tener en un viscosímetro rotacional, a una velocidad de corte previamente establecida, y que denota efectos simultáneos de todas las propiedades de flujo ^(10 y 11). Este tipo de fluidos está caracterizado por poseer una curva de flujo que pasa por el origen, y con solo conocer la medida del esfuerzo de corte a una sola velocidad de corte es suficiente, y por consiguiente se concluye que la viscosidad aparente es igual a la viscosidad plástica.

Para los fluidos plásticos tales como los lodos de perforación, este parámetro es de valor limitado, ya que la pendiente de la curva de flujo no puede definirse midiendo la velocidad del esfuerzo de corte a una sola velocidad ⁽¹¹⁾. La viscosidad aparente puede ser calculada por medio de la siguiente ecuación ⁽¹⁰⁾.

$$V_a \text{ (cp)} = \frac{\text{(Lectura 600 rpm)}}{2} \quad \text{Ecuación \# 2.5}$$

2.3.3 Punto cedente

Es la parte de la resistencia a fluir causada por las fuerzas de atracción electroquímicas en las partículas sólidas ⁽¹¹⁾. Estas fuerzas de atracción son el resultado de las cargas eléctricas, bien sea positivas o negativas, presentes sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase líquida ⁽¹⁰⁾.

El punto cedente es una propiedad que puede ser medida solo a condiciones dinámicas, y la magnitud de este parámetro es dependiente de ⁽¹¹⁾:

- La cantidad de sólidos.
- El tipo de sólidos y la carga eléctrica asociada a ella.
- El tipo de iones presentes en la fase líquida del lodo de perforación.

El punto de cedencia está íntimamente relacionado con la capacidad de limpieza que posee el lodo de perforación, es decir, la capacidad que tiene de transportar los ripios a la superficie ⁽⁶⁾. Un punto de cedencia excesivamente alto, no conlleva directamente a una alta limpieza del hoyo, sino a problemas dentro del proceso de perforación de un pozo, tales como: socavamiento excesivo de la formación, atascamiento de la tubería, alta presión en las bombas, etc; y puede ser ocasionado por: la presencia de contaminantes, la agregación excesiva de un viscosificante comercial que puede llevar a la floculación del lodo.

De un lodo con alta viscosidad se espera que levante los ripios de perforación mucho más eficientemente, pero la evidencia práctica contradice esta teoría, por eso se relaciona directamente con la velocidad de asentamiento de los ripios, que es un parámetro característico para cada tipo de sólido de perforación, dependiendo de su forma y tamaño ⁽⁶⁾. Por medio de este parámetro se puede que cuando el punto cedente aumenta la velocidad de asentamiento disminuye, pero llega un momento donde la variación del punto cedente no contribuye a disminuir el asentamiento de los ripios y es allí donde no se puede incrementar la cedencia porque ocasionaría los problemas explicados anteriormente.

A nivel de laboratorio el punto cedente es calculado por medio de la siguiente ecuación ⁽¹¹⁾:

$$Y_p (\text{lb}/100\text{pies}^2) = \text{Lectura } 300 \text{ rpm} - V_p \quad \text{Ecuación \# 2.6}$$

La práctica recomienda valores de viscosidad plástica y viscosidad aparente parecidos y un valor de punto cedente igual o mayor a la densidad en lb/gal, esto para mejorar la capacidad de suspensión de los ripios por parte del lodo ⁽¹⁰⁾, lo dicho anteriormente sería el fluido de perforación ideal.

Actualmente se están realizando trabajos investigativos para demostrar que, las partículas inertes tienen influencia en la variación del punto cedente, aunque no en la misma magnitud que las no inertes.

2.3.4 Gel y resistencia de gel

Para iniciar debemos definir lo que es un gel, que no es más que una dispersión en la cual las interacciones atractivas entre los elementos de la fase dispersa son tan fuertes que todo el sistema desarrolla una estructura rígida, y bajo pequeñas fuerzas se pueden comportar elásticamente ⁽²⁾, la estructura rígida se define como gel. Los geles se producen cuando las partículas coloidales poseen gran afinidad con el medio dispersante. Un gel se dice que es un coloide, ya que este no es más que una dispersión de partículas dentro de un medio dispersante y que posee la capacidad de formar una estructura rígida en reposo, más adelante se dedica un capítulo a definir mucho mejor lo que son coloides.

Existen diversas fuerzas que ayudan a la formación de un gel, estas son: las electrostáticas, que son las principales; las interacciones de Van der Waals que son de carácter físico y molecular y que dependen de la naturaleza y forma de la partícula; y las que se forman por el enlace químico ⁽¹⁶⁾.

La fase dispersa puede estar constituida por partículas sólidas como la arcilla, o macromoléculas como la gelatina. En algunos casos las estructuras rígidas o geles pueden fluir en forma plástica, es decir, que su viscosidad disminuya a medida que se aumenta la velocidad, si se les emplea una fuerza que no sobrepase la velocidad de corte que las rompa, también se les dice que son fluidos que poseen un límite de fluidez ^(2 y 16). Cuando las fuerzas aplicadas son suficientes para vencer las fuerzas de unión de la estructura rígida, se dice que se sobrepasa el límite de fluidez y la estructura se desmorona y se rompe ⁽¹⁶⁾.

Un ejemplo puede ser las plaquetas de arcilla como la montmorillonita que forman una estructura comúnmente descrita como casa de naipes, controlada principalmente por las fuerzas electrostáticas; las placas llevan una carga en la superficie del cristal, pero a bajo pH una carga contraria en el borde da como resultado la atracción y la formación de este tipo de gel. A continuación se presenta una figura representativa de esta estructura rígida ⁽²⁾

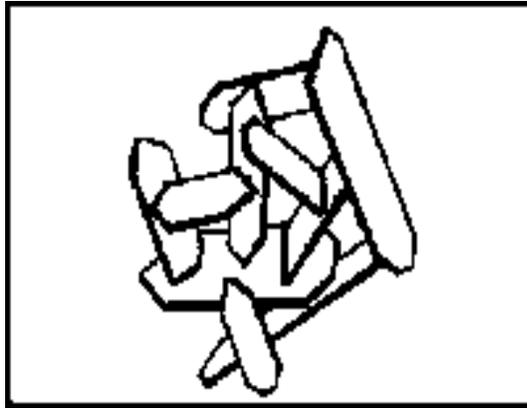


Figura # 2.4 Estructura casa de naipes de la arcilla montmorilonita ⁽²⁾

Todo lo mencionado anteriormente define lo que es un gel, pero la resistencia de gel no es más que la resistencia que pone la estructura a ser rota, es decir, es una medida del esfuerzo de ruptura o la resistencia de la consistencia del gel formado, después de un periodo estático.

La fuerza de gel es una medida de las fuerzas de atracción eléctricas dentro de un fluido de perforación a condiciones estáticas y son medidos a 10 segundos y a 10 minutos bajo condiciones específicas según las normas API - RP - 13B ^(4 y 5) y últimamente se mide a 30 minutos. La medida a 10 segundos simula conexión de tuberías, a 10 minutos haciendo viajes de tuberías y la de 30 minutos ayuda a definir mejor el tipo de gel que se forma.

La resistencia de gel está muy relacionada con la capacidad de limpieza que tiene un fluido de perforación para mantener los cortes de perforación en suspensión en condiciones estáticas, se expresa en $\text{lb}/100\text{pies}^2$; tiende a relacionarse con punto cedente que es a condiciones dinámicas ⁽¹⁰⁾.

El viscosímetro Fann, el cual posee seis diferentes velocidades de corte (3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm), permite calcular de manera directa los valores de la fuerza de gel.

Para un período de reposo de 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos se aplica una velocidad de corte de 3 rpm y se lee directamente del dial del viscosímetro la elongación del esfuerzo de corte. Estos valores se reportan como fuerza de gel en $\text{lb}/100\text{pies}^2$ ^(11 y 12).

Esta propiedad de los lodos hace que se forme una estructura rígida o semirígida en reposo, pero que se convierte en fluido por agitación mecánica o movimiento del fluido, este cambio es reversible.

A continuación se presenta una figura que esquematiza la reversibilidad del proceso de formación de este tipo de estructuras rígidas a condiciones estáticas.

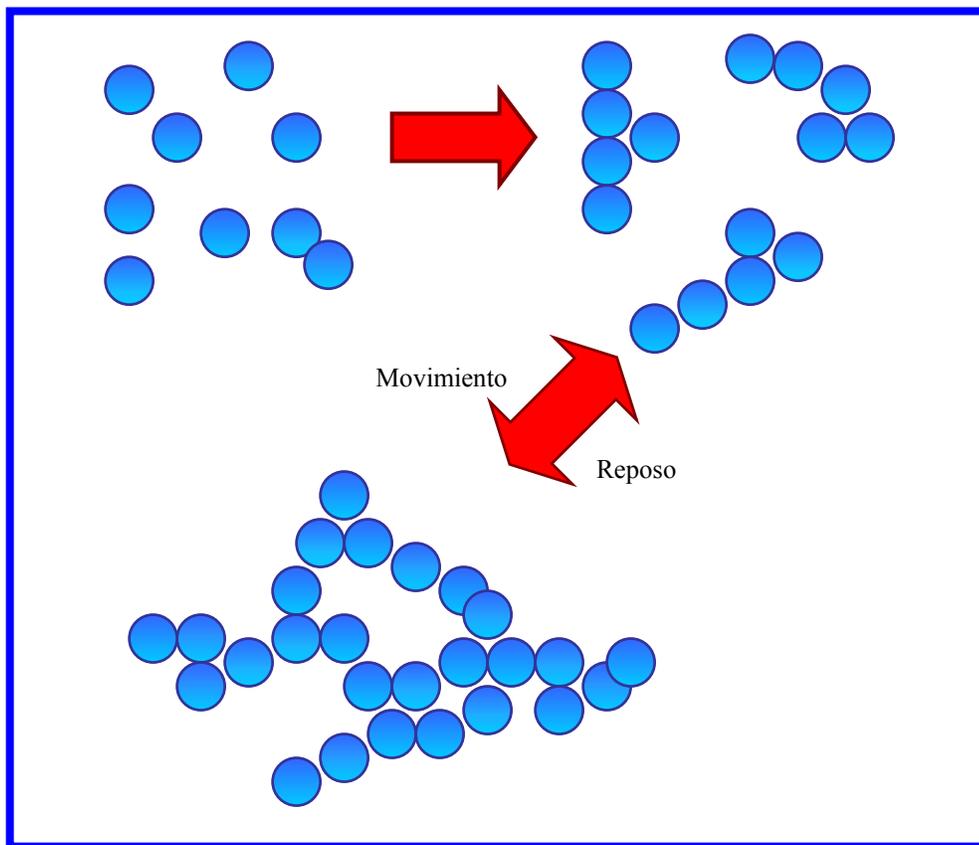


Figura # 2.5 Formación de estructura de gel y su rompimiento a causa del movimiento⁽¹⁰⁾

También debemos definir lo que es tixotropía, que no es más que la capacidad que tiene un fluido a desarrollar estructuras rígidas en condiciones estáticas, es decir, si el fluido es tixotrópico va a formar geles, que es precisamente la que permite al lodo mantener en suspensión los ripios al momento en que se detiene la circulación en el pozo ⁽¹⁰⁾. Este

término lleva a definir gelatinización que es una medida de las propiedades tixotrópicas de un fluido y denota la floculación bajo condiciones estáticas.

Lo contrario a tixotropía es reopectancia, es decir, se forma la estructura de gel a medida que aumenta el tiempo, a cierta velocidad de corte, por ejemplo el yeso en agua, el cual tarda 40 minutos en fraguar si se le deja en reposo, pero si se agita continuamente tarda solamente 20 minutos ^(10 y 11).

Para ayudar un poco más a entender lo que es un gel, debemos definir que es un coloide; ya que un gel está muy relacionado con lo que es un coloide y una sustancia coloidal. Debido a que este tipo de sustancias y el tipo de partículas presentes en ella, nos permiten en la mayoría de los casos a la formación de una estructura rígida denominada como estructura de gel.

2.3.4.1 COLOIDES

2.3.4.1.1 Definición:

La palabra coloide se refiere al conjunto que forma un medio dispersante y un medio dispersado. Se descubrió que las “cosas” dispersadas en un coloide eran mucho más grande que las moléculas, particularmente por su coeficiente de difusión. Como consecuencia los coloides no se comportan como las soluciones moleculares ^(2 y 16).

Por otra parte los coloides no se separan por sedimentación (o tal vez muy poco). Esto significa que la agitación producida por el movimiento Browniano; que no es más que movimiento desordenado de las partículas; es suficiente para compensar las fuerzas de gravedad. Como definición más amplia se puede decir que un coloide es una dispersión de partículas tal que ⁽¹⁶⁾:

- Las partículas son demasiado grandes para que el coloide se comporte como una solución molecular.

- Las partículas son demasiado pequeñas para que el coloide se separe rápida y permanentemente en un campo de gravedad.

Esto puede ser entendido y visualizado por medio de la siguiente figura:

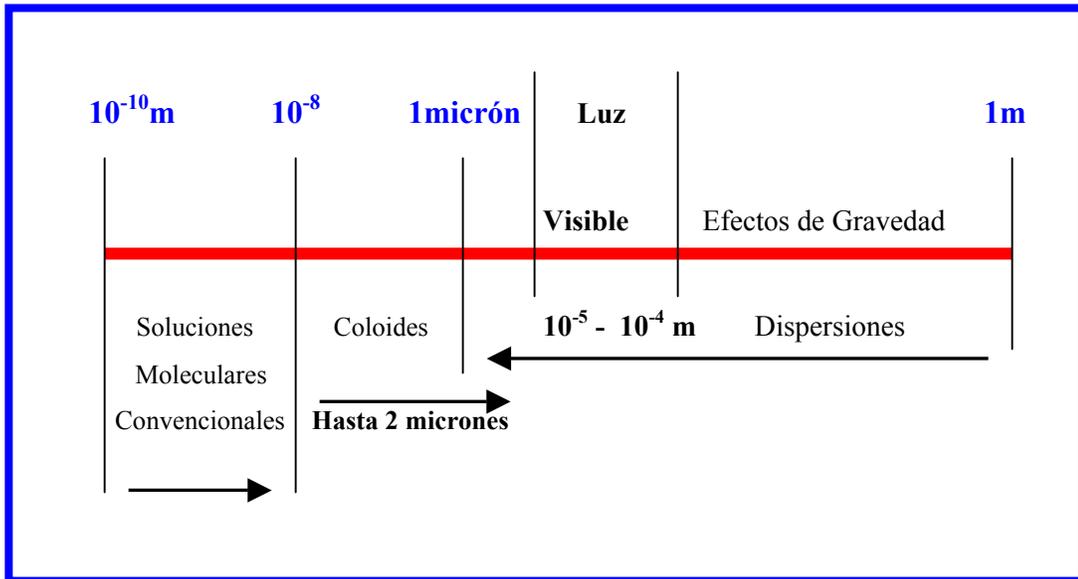


Figura # 2.6 Tamaños de partículas coloidales ⁽¹⁶⁾

2.3.4.1.2 Tipos de coloides ^(2 y 16):

Sean las partículas sólidas o líquidas y que las mismas tengan o no afinidad para con el medio dispersante se tendrá un tipo u otro de coloide. Por ejemplo:

- Se usa la palabra “sol” para un coloide con partículas sólidas sin afinidad para con el medio dispersante.
- Si se trata de un gas se hablara de “aerosoles” como en el caso de las nieblas y humos.

- Si se trata de partículas líquidas se hablara de miniemulsiones, siempre y cuando el tamaño de las gotas sea suficientemente pequeño para que no se separen.

Lo mismo ocurre con los coloides de asociación, en los cuales las partículas están formadas por agrupaciones de moléculas; tales agrupaciones se producen en formas de micelas esféricas, alargadas o cilíndricas, esto se ve en la siguiente figura:

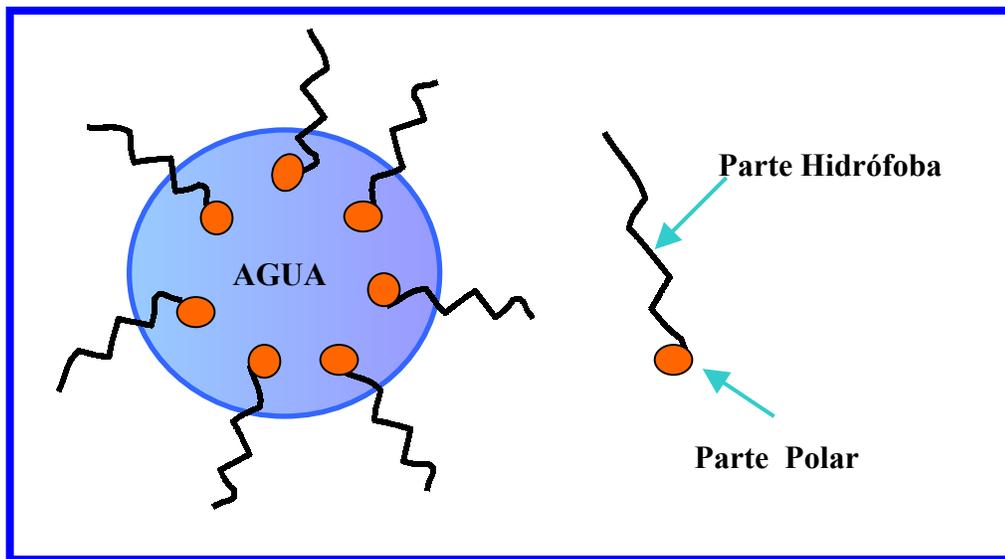


Figura # 2.7 Micela o coloide de asociación ^(2 y 16)

Los lodos de perforación y las pinturas contienen una mezcla de dos líquidos, de varios sólidos y de surfactantes que producen micelas u otras estructuras, pero también son sistemas extremadamente complejos, cuyas propiedades pseudoplásticas y tixotrópicas se deben a su naturaleza coloidal. Deben ser muy fluidos cuando se bombean o se pasan por la brocha, pero luego deben gelificarse y no fluir cuando se dejan en reposo.

También se habla de coloides liofílicos, que son los coloides que tienen afinidad con el solvente, y los liofóbicos que presentan una repulsión para con el solvente. Se puede decir que en un coloide liofílico, las partículas son “solubles” en el solvente, pero difieren de las sustancias moleculares clásicas en el tamaño de las partículas. Los coloides liofílicos más simples son las macromoléculas naturales como los biopolímeros (proteínas).

La segunda clase de coloides liofílicos es la que corresponde a los coloides de asociación en los cuales las partículas están formadas por moléculas asociadas no mediante enlaces químicos sino mediante enlaces físicos del tipo Van der Waals. Como ejemplo los detergentes, jabones y surfactantes, que en general son susceptibles a formar micelas, estas son características de una sustancia anfífila, es decir, con doble afinidad polar – apolar. En un medio solvente polar, como el agua, las moléculas se agrupan para formar micelas con la parte polar hacia el solvente y los grupos apolares interactuando entre sí. En medio no acuoso la agrupación se hace al revés, es decir, con la parte polar hacia el centro y la parte apolar hacia el solvente.

En cuanto a los coloides liofóbicos, se puede decir que corresponden a partículas insolubles en el solvente, estas se preparan mediante dos métodos esencialmente:

- Reducción del tamaño de las partículas hasta llegar al campo coloidal, es decir por cizallamiento.
- El otro método es por el camino inverso, en lugar de disminuir el tamaño de partículas gruesas, se fabrican partículas coloidales a partir de moléculas, mediante un proceso de aglomeración.

2.3.4.2 Tipos de gel

Es de vital importancia destacar, que en la mayoría de los casos no es tan imprescindible trabajar con un tipo u otro gel, ya que es mucho más importante tener un gel dentro de los valores razonables, que permitan prevenir el asentamiento de los sólidos de formación cuando se detiene la circulación del lodo, ya que si esto no ocurre, pueden decantar los rípios ocasionando una disminución en la tasa de penetración y un excesivo trabajo del sistema de perforación, que se ve reflejada en el aumento de los costos.

La fuerza de gel es cualitativamente clasificada dentro de varios tipos, basándose en el valor de las medidas a 10 segundos y 10 minutos, y la diferencia existente entre esos dos valores ^(4y5). Por consiguiente se pueden observar los siguientes tipos de geles:

- Geles frágiles poseen valores extremadamente bajos, donde los geles a los 10 segundos y a los 10 minutos son casi idénticos, por ejemplo 1/1, 2/2 y 2/3 lb/100pie².
- Geles favorables son aquellos que tienen valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos, por ejemplo 2/4, 3/6 y 4/8 lb/100pie² etc.
- Geles progresivos tienen valores intermedios a los 10 segundos, luego se incrementan rápidamente hasta valores muy elevados a los 10 minutos por ejemplo 3/20, 6/35, 8/50 lb/100pie².
- Los geles invariables o instantáneos tienen valores casi idénticos a los 10 segundos y a los 10 minutos, sin embargo estos valores, en algunos casos pueden ser muy elevados, por ejemplo 20/21, 30/32 lb/100pie².

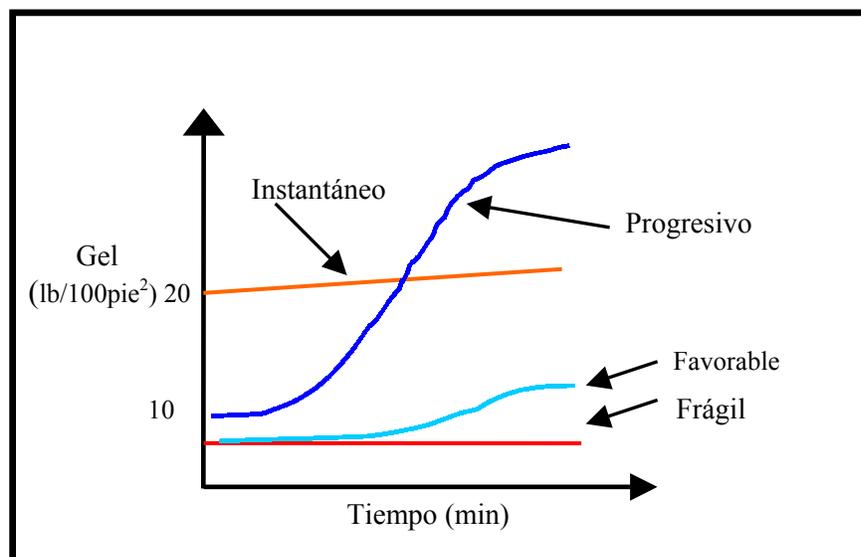


Figura # 2.8 Tipos de geles ⁽⁵⁾

Otros autores solamente definen a los geles progresivos como cuando existe una amplia diferencia entre los valores de geles a los 10 segundos y a los 10 minutos, y puede indicar según los valores que se obtengan, la acumulación de sólidos en el sistema; y si los valores a los 10 segundos y a los 10 minutos presentan una mínima diferencia aunque pueden ser elevados se habla de geles instantáneos, y dependiendo del valor que se obtenga se puede decir que el lodo está flocculado ⁽¹⁰⁾.

Los valores de fuerza de gel de un fluido de perforación deben mantenerse en el rango de valores favorables por las siguientes razones ⁽⁵⁾:

- Si la fuerza de gel es muy baja, el lodo de perforación no podrá mantener eficientemente los cortes de perforación durante las conexiones y viajes de tuberías.
- Si la fuerza de gel es muy alta, la presión requerida para circular el fluido, puede fracturar la formación y favorecer las condiciones de una arremetida.
- Altas presiones de suaveo y surgencia producto del movimiento de la tubería dentro del fluido con alto valor de fuerza de gel, puede causar efectos de presión cíclica, que no es más que la variación de la presión hidrostática, trayendo como consecuencia el intercambio en el tipo de perforación realizada, es decir, perforación sobrebalance o bajobalance.
- Si es muy alta puede ocasionar retención de aire o gas en el lodo.
- Valores altos pueden llevar a reducir la velocidad con la que se sedimentan las arenas y los recortes en la pileta de sedimentación, lo que se convierte en una acumulación de sólidos.
- La imposibilidad de hacer llegar las herramientas de perfilaje hasta el fondo es causada por altos valores de fuerza de gel.

Por todo esto, es recomendable llevar un control muy exhaustivo de esta propiedad, ya que el no hacerlo se transformaría en una innumerable cantidad de problemas ya explicados anteriormente; por esto y mucho más se debe dotar de buenos equipos de separación de sólidos los taladros de perforación y aplicar buenos métodos de tratamiento de lodos de perforación.

2.4 MODELOS REOLÓGICOS

Las propiedades físicas y químicas de un fluido de perforación deben ser estudiadas con mucha determinación, para así poder garantizar un buen desempeño durante las operaciones de perforación. La graficación de la relación de esfuerzo de corte contra velocidad de corte se llama reograma. Para poder explicar los modelos reológicos, debemos definir primero los tipos de fluidos que existen ⁽¹¹⁾.

2.4.1 Tipos de fluidos

Existen dos tipos de fluidos:

- Newtonianos
- No newtonianos

2.4.1.1 Fluidos Newtonianos:

Es un fluido básico, donde el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Estos fluidos empiezan a moverse inmediatamente después que se les aplica una presión mayor a cero, por ejemplo: el agua, la gasolina, el aceite, la leche, aceite mineral⁽¹⁰⁾.

Otra manera más sencilla de definir este tipo de fluidos es, que la viscosidad es constante para cualquier valor de esfuerzo de corte ⁽¹⁴⁾. Algunas características que ayudan a diferenciar un fluido Newtoniano de otro son las siguientes ⁽¹⁰⁾:

- Fluido incompresible
- La relación punto cedente Vs viscosidad plástica es cero, ya que no poseen punto de cedencia
- La viscosidad es independiente del esfuerzo de corte, y disminuye con la temperatura.
- El perfil de velocidades se asemeja a una parábola y siempre es constante
- El índice de comportamiento de flujo es uno ($N = 1$)

Cabe destacar que la incorporación de sólidos al sistema, cambia el comportamiento reológico de un fluido, de Newtoniano a no Newtoniano. Los fluidos Newtonianos rigen su comportamiento por medio de la siguiente ecuación ⁽¹¹⁾.

$$EC = V*VC$$

Ecuación # 2.7

Donde

EC: Esfuerzo de corte

VC: Velocidad de corte

V: Viscosidad del fluido en cp.

2.4.1.2 Fluidos no Newtonianos:

Este tipo de fluidos se caracteriza porque su viscosidad depende de las condiciones de flujo, o mejor dicho la relación esfuerzo de corte frente a velocidad de corte depende de las condiciones de flujo ^(10 y 11).

Los fluidos de perforación son fluidos no newtonianos, y no existe ecuación matemática que describa precisamente la reología de ellos, por consiguiente se ha propuesto varias ecuaciones que se aproximan en cierto grado a la realidad existente en la relación velocidad de corte frente a esfuerzo de corte, esto es lo que se define como modelos reológicos.

En los fluidos no newtonianos la temperatura tiene una enorme importancia ya que a menudo pequeñas variaciones de esta, pueden modificar notablemente el comportamiento

reológico. Estos fluidos se clasifican en si su comportamiento es o no función del tiempo, de acuerdo con esto se tiene ^(10 y 14):

Fluidos no Newtoniano cuyo comportamiento es independiente del tiempo:

- Plásticos
- Pseudoplásticos
- Dilatantes

Fluidos no Newtonianos cuyo comportamiento es función del tiempo:

- Tixotrópico
- Reopéctico

Fluidos Plásticos:

La mayor parte de los fluidos de perforación son fluidos plásticos o verdaderos como también son llamados. Estos fluidos requieren una presión mínima o de umbral igual al punto cedente, para poder iniciar su movimiento, como por ejemplo: grasa, arcilla de moldear etc. El comportamiento reológico de los fluidos plásticos es expresado por medio de la ecuación de Bingham, más adelante será explicado el origen de esta ecuación.

Fluidos Pseudoplásticos:

Al igual que los fluidos plásticos, los fluidos pseudoplásticos requieren una presión por encima de cero para empezar a moverse. Pero se diferencian de los plásticos porque no poseen tixotropía y la viscosidad aparente disminuye instantáneamente con un aumento en la velocidad de corte, hasta que en un punto la viscosidad se hace constante, como por ejemplo: resinas, pinturas, mantequilla; estos fluidos son también llamados reofluidizantes. El valor real del punto cedente de los fluidos pseudoplásticos es cero. El comportamiento reológico de estos fluidos es descrito por la ecuación de la ley de exponencial, más adelante será explicado el origen de esta ecuación.

Fluidos dilatantes:

Los fluidos dilatantes están formados por una alta concentración de sólidos bien dispersos. La viscosidad aparente aumenta instantáneamente al aumentar la velocidad de corte, también son llamados fluidos reoespesantes. El punto cedente determinado con el viscosímetro de lectura directa es negativo; sin embargo, el verdadero punto cedente es cero. El comportamiento reológico de estos fluidos también está descrito por la ley exponencial, a pesar de ser diferentes a los fluidos pseudoplásticos.

Para entender un poco mejor los tipos de fluidos, a continuación se presenta la siguiente figura:

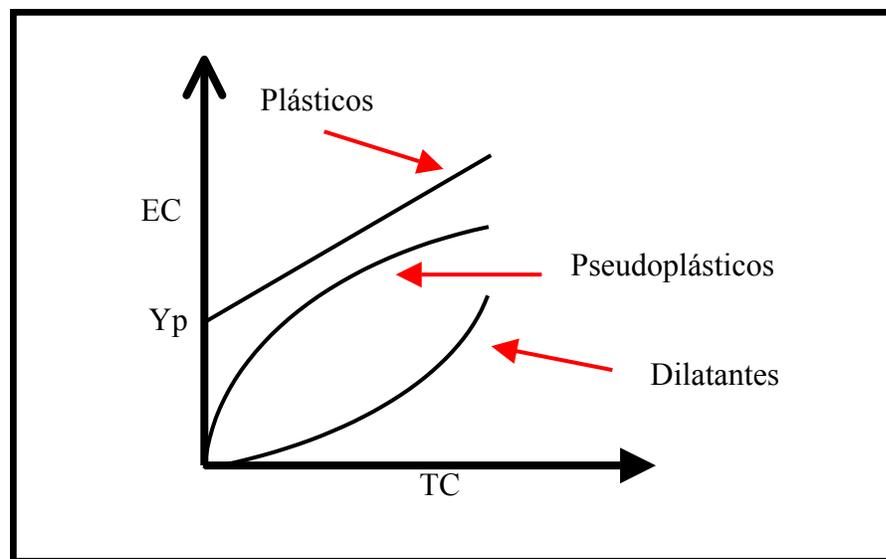


Figura # 2.9 Tipos de fluidos No Newtonianos ⁽¹¹⁾

Fluidos tixotrópicos:

Como fue definida anteriormente la tixotropía es la capacidad que tienen los fluidos de desarrollar con el tiempo una estructura gelatinosa si se deja en reposo, pero que al agitarse nuevamente, regresa a su estado original, cabe destacar que este cambio es reversible; por

eso los fluidos tixotrópicos son los fluidos que tienen la capacidad de formar estas estructuras a través del tiempo y en reposo. En este tipo de fluidos el esfuerzo de corte no sigue una relación proporcional con respecto al aumento o disminución de la velocidad de corte, como por ejemplo: los lodos de perforación base agua y aceite, las tintas las pinturas, etc.

Fluidos reopéticos:

Son aquellos que desarrollan una estructura en función del tiempo, a cierta tasa de corte, es decir, a condiciones dinámicas son capaces de desarrollar estructuras rígidas, caso contrario a los fluidos tixotrópicos. Un ejemplo de ese tipo de fluidos es el yeso el cual tarda 40 minutos en fraguar si se le deja en reposo, pero si se agita continuamente tarda solamente 20 minutos.

2.4.2 Modelo plástico de Bingham ^(10 y 12)

Este modelo reológico es el que más se emplea en el campo, es el más simple para fluidos no newtonianos y, a pesar de ello, provee habitualmente una base excelente para el tratamiento del lodo.

Este modelo se apoya en datos suministrados por un viscosímetro Fann a 600 y a 300 rpm, luego se grafican en papel de coordenadas cartesianas y se unen mediante una línea recta que pasa por los dos puntos. Esta línea recta está determinada por su pendiente y por el valor de la ordenada en el origen.

Los dos parámetros en este modelo son la viscosidad plástica y el punto de cedencia, estos valores se pueden determinar fácilmente de las lecturas del dial y las ecuaciones explicadas anteriormente.

Este modelo se rige por la siguiente ecuación:

$$EC = Y_p + \frac{V_p}{300} * VC \quad \text{Ecuación \# 2.8}$$

Donde:

EC: Esfuerzo de corte

Yp: Punto cedente

VC: Velocidad de corte

En esta ecuación Yp representa el corte de la recta con el eje vertical y la Vp representa la pendiente de dicha recta.

2.4.3 Modelo de la ley exponencial ^(10 y 12)

A pesar del hecho de que la viscosidad plástica y el punto cedente han demostrado ser parámetros eficaces sobre los cuales puede basarse el tratamiento del lodo, el modelo plástico de Bingham presenta algunos defectos, A bajas velocidades de corte los esfuerzos de corte, exceden a veces considerablemente los verdaderas esfuerzos de corte verificados en los lodos, es por eso que se creo este modelo.

Este modelo solventa estos inconvenientes al proponer, en lugar de graficar en papel de coordenadas cartesianas los datos de las lecturas a 300 y 600 rpm del viscosímetro, graficarlos en papel log-log para de esta manera obtener una línea recta que pasa muy cerca de los restantes puntos lo cual ayuda a representar mejor la realidad.

A partir de esto, se crea una línea recta en papel log-log que se denomina una curva exponencial y corresponde a una ecuación algebraica de la siguiente forma:

$$EC = K * VC^n \quad \text{Ecuación \# 2.9}$$

Donde:

EC: Esfuerzo de corte

VC: Velocidad de corte

K: Factor de consistencia e flujo laminar

n: Índice de comportamiento de flujo laminar

El parámetro K, es el factor de consistencia de flujo laminar, se le considera como similar a la viscosidad plástica, dado que un aumento de K indica generalmente un aumento en la concentración de sólidos o una disminución en el tamaño de las partículas; los mejores métodos para hacer bajar K son el eficiente control mecánico de sólidos y la dilución.

El parámetro n es el índice de comportamiento de flujo laminar. Para un fluido newtoniano $n = 1$; para los fluidos de peroración es siempre inferior a 1. Para lodos no dispersos este parámetro esta usualmente entre 0,4 y 0,7; para lodos altamente dispersos n esta generalmente entre 0,7 y 0,9, por consiguiente cuanto más bajo es el valor de n menos newtoniano es el lodo.

2.4.4. Modelo de la ley exponencial modificada ^(10 y 12)

El modelo de la ley exponencial posee un defecto, no toma en consideración el esfuerzo de cedencia. De hecho, la mayor parte de los lodos presentan en la realidad esfuerzo de cedencia, es decir, un cierto grado de resistencia interna debe ser vencida para que el lodo empiece a fluir. La ley exponencial modificada es similar a la ley exponencial, excepto que tiene en cuenta un esfuerzo de cedencia positiva, denotado G_0 .

Si se dispone de un viscosímetro Fann de seis velocidades, G_0 debe tomarse como la lectura estable a 3 rpm; esta ley exponencial modificada esta dada por la siguiente ecuación:

$$EC = G_0 + K * VC^n \qquad \text{Ecuación \# 2.10}$$

Donde:

EC: Esfuerzo de corte

G_0 : Esfuerzo de cedencia mínima

VC: Velocidad de corte

K: Factor de consistencia e flujo laminar

n: Índice de comportamiento de flujo laminar

Tal y como ocurre en la ley exponencial, es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad por corte y K es una medida de los sólidos, sin embargo, estos valores serán usualmente diferentes para las dos leyes.

La ley exponencial modificada es un modelo literalmente más complicado que los otros dos modelos. Sin embargo, se aproxima más estrechamente al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los lodos de perforación. Por medio de la siguiente figura se podrá visualizar mucho mejor las diferencias existentes entre estos tres modelos:

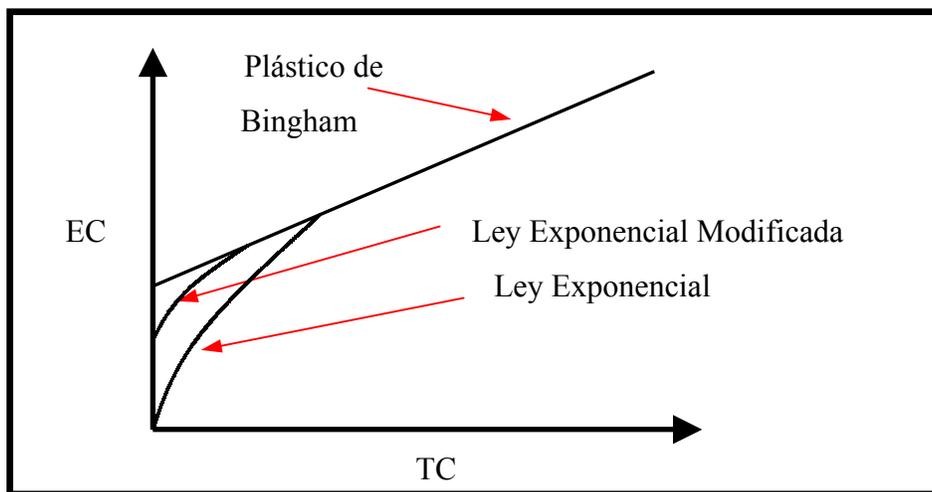


Figura # 2.10 Modelos reológicos ⁽¹¹⁾

2.5 CONTAMINACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA

La composición de los fluidos de perforación depende principalmente de los materiales encontrados o añadidos intencionalmente durante las operaciones de perforación; cuando un material causa cambios indeseables, y en algunos casos irreparables, en las propiedades del lodo se le denomina contaminante; así que cualquiera de estos materiales, bajo ciertas circunstancias puede ser considerado contaminante ^(10 y 11).

El fluido de perforación debe ser capaz de soportar la contaminación causada por factores provenientes desde la formación tales como: sólidos de perforación, gases y líquidos, y además de los añadidos en la superficie en operaciones de rutina. Cabe destacar que los lodos de perforación base agua son menos sensibles a la contaminación, con respecto a los lodos base aceite.

Cuando hablamos acerca de contaminaciones causadas por componentes añadidos podemos citar como ejemplo: la bentonita añadida en exceso y la barita pueden conducir a altas propiedades reológicas y por consiguiente una amplia disminución en la tasa de penetración⁽¹¹⁾. Esto puede ser causado en presencia de mucha agua o en exceso en el tratamiento químico, que conllevaría a cambios drásticos en las propiedades del lodo y provocar luego adiciones innecesarias de bentonita.

Los contaminantes más indeseables son los que requieren tratamiento químico; los tratamientos para remover estos contaminantes en algunos casos son posibles, pero en otros se transforman en imposibles. La regla importante es que el tratamiento debe contrarrestar el contaminante y su efecto sobre el lodo.

Existen maneras de predecir la presencia de algunos contaminantes y por lo tanto, pretratarlos, como es el caso de: cemento, agua mala para la mezcla de lodo, sal y gases como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono. Estos contaminantes pueden ser removidos en algunos casos antes de que ellos tengan la oportunidad de atacar a la arcilla y a los defloculantes orgánicos⁽¹¹⁾.

El pretratamiento tiene sus ventajas, siempre y cuando éste no sea excesivo y no afecte adversamente las propiedades del lodo.

Otros contratiempos no son predecibles, ni esperados, tal como los que resultan de pequeñas entradas o de un crecimiento gradual del contaminante. Eventualmente una manera de darse cuenta del efecto o la presencia de un contaminante, es por medio de la variación de las propiedades del sistema. Este cambio ocurre cuando el fluido de

perforación es más susceptible, tal como cuando los defloculantes están agotados, o después de un viaje largo y el fluido se mantuvo estático y sujeto a temperaturas e fondo altas o después que un contaminante entra al sistema. Por eso siempre es necesario mantener un registro completo y exacto de las propiedades del lodo de perforación para observar el comportamiento gradual de una contaminación e impedir el deterioro del sistema.

Es de suma importancia para el desarrollo de este trabajo especial de grado, el efecto ejercido por la inclusión de sólidos de perforación como aditivos o contaminantes en los distintos sistemas de fluidos de perforación base agua.

2.5.1 Contaminación con sólidos de perforación ^(10 y 12)

El volumen de sólidos de formación removido por la mecha durante la perforación de un pozo puede llegar a cantidades sumamente altas ⁽⁶⁾. A menudo deben ser transportados por el lodo miles de kilogramos de sólidos provenientes de la perforación, y a causa de esto las propiedades reológicas y la velocidad de penetración son afectadas por la cantidad, tamaño y composición de esos sólidos. El control de esos sólidos es importante para que un sistema de lodo tenga éxito y una larga vida útil, ya que estos sólidos contribuyen al desgaste de las tuberías y del equipo, causan daños a las formaciones productoras y como resultado tienen mucha influencia en el costo general del pozo. Existen diversas maneras de reducir la presencia de sólidos de perforación, estas son:

- Floculación selectiva
- Remoción mecánica de sólidos
- Dilución

La contaminación que resulta de la alta concentración de sólidos se presta, frecuentemente a confusiones, se recomiendan tratamientos costosos, pero estos no corrigen el problema.

Como se puede notar, la contaminación o inclusión de sólidos no tiene efecto sobre las propiedades químicas del lodo, pero proporciona signos iniciales como: cambio en el peso del lodo, viscosidad plástica, resistencia de gel, porcentaje de volumen, y un ligero aumento del MBT (prueba de azul de metileno), es decir, la prueba que describe la presencia de arcillas reactivas. En algunos casos, si la contaminación es causada por partículas finas, es decir, tamaño limo y arcilla, el sistema no presentara un aumento en el porcentaje de sólidos.

El contaminante más importante de un fluido de perforación, es el sólido de perforación, especialmente si se trata de partículas de pequeño tamaño o si estas reaccionan químicamente con los otros componentes del lodo. No todos los sólidos de formación incorporados al lodo durante los trabajos de perforación de un pozo afectan de igual manera las propiedades del fluido. Su efecto depende, sobre todo del tipo de carga eléctrica asociada con cada partícula, es por esta razón que la arena que es inerte, no actúa sobre las propiedades del lodo de igual forma que las arcillas que si presentan cargas eléctricas asociadas con ellas. Este aspecto es de vital importancia en el desarrollo de este trabajo de grado donde se demostrará la influencia de los diferentes tipos de partículas sobre las propiedades reológicas del lodo, y muy especialmente en la formación de la estructura de gel.

Para asegurar un tratamiento apropiado del problema, es muy recomendable que se verifique la cantidad de sólidos asentados en los tanques de lodo, por consiguiente, un crecimiento de los sólidos en el fondo de los tanques, permitirá que más sólidos permanezcan en el sistema de circulación, complicando más el problema.

Un aspecto muy importante para la solución del problema de sólidos de perforación es la remoción mecánica. Esto, por consiguiente incluirá, una zaranda vibradora (de alta velocidad si se usa un sistema de floculación en la línea de flujo), desarenadores, deslimadores y centrifugas (usadas en la mayoría de los casos para lodos pesados).

El tratamiento para controlar sólidos con dilución resulta generalmente costoso, ya que por cada barril de agua adicionado se tiene que agregar la concentración de los aditivos en libras por barril, de tal forma que se mantenga la concentración del volumen total del lodo, para poder mantener las propiedades del lodo en el rango deseado.

2.5.1.1 Efecto de los sólidos de perforación en la tasa de penetración

Para mantener por si solo las propiedades del lodo dentro de un rango aceptable, se deben obtener valores de bajo contenido de sólidos. Esto es muy bueno ya que no solamente se consiguen las mejores tasas de penetración, sino que las bombas de lodos operan más eficientemente, y en las paredes del pozo se forma un revoque de menor espesor ⁽⁶⁾.

Al no haber presencia de sólidos contaminantes en el lodo, la bomba puede desplazar el fluido a un caudal dado con un menor aumento de presión, reduciendo así las presiones en el espacio anular y reduciendo al mínimo la posibilidad de pérdida de circulación, lo que se traduce en ahorro sustancial del tiempo en la perforación. Un mayor caballaje hidráulico, es transmitido a las boquillas de la mecha, ya que los recortes que no son removidos se consumen el caballaje al ser recirculados y dispersados en la fase líquida del lodo causando una disminución en la tasa de penetración.

2.5.1.2 Efectos de los sólidos de perforación en la filtración del lodo

A medida que la filtración ocurre, los sólidos del lodo (aditivos o incorporados) se depositan en la cara de la formación y forman el revoque. El filtrado proveniente del lodo penetra la formación a través del espacio poroso. Los factores que afectan la filtración son: presión, partículas sólidas, temperatura y tiempo ⁽⁶⁾. De estos cuatro factores los dos primeros tienen relación directa con los sólidos presentes en el lodo.

El diferencial de presión tiene un efecto leve sobre el filtrado. El efecto que realmente ejerce el diferencial de presión aplicado al pozo, se hace sobre el revoque ⁽¹⁷⁾. En referencia

a esta condición se plantean dos escenarios, en relación con las partículas sólidas que puedan estar conformando el revoque.

- Si los sólidos presentes en el lodo son compresibles, el aumento de presión causará que estas partículas se unan cada vez más, y esto traería como consecuencia la disminución de la permeabilidad del revoque; y al disminuir la permeabilidad, disminuirá el paso de filtrado de lodo hacia la formación ⁽¹⁷⁾.
- Si los sólidos presentes no son compresibles, el aumento de presión no ocasionará una disminución de la permeabilidad del revoque, por consiguiente el paso de filtrado de lodo hacia la formación aumentará.

Con respecto a las partículas sólidas se puede decir que la filtración de lodo está influenciada notablemente por el tipo, cantidad, forma y tamaño del sólido de perforación presente; por eso, es preferible tener una cantidad mínima de sólidos con tamaños uniformes o mejor dicho, bien escogidos, para lograr así revoque con una baja permeabilidad para provocar una menor filtración o pérdida de filtrado del lodo de perforación.

2.5.1.3 Efecto de los sólidos de perforación en la viscosidad plástica

Un hecho importante que se debe tener siempre en cuenta es que los sólidos aumentan la viscosidad plástica del lodo y además, la cantidad, el tamaño y forma de esas partículas también juega un papel importante dentro de la variación de este parámetro.

Un aumento en la viscosidad plástica, generalmente significa un aumento en la cantidad de sólidos dentro del sistema. Un aumento en la superficie expuesta de los sólidos generará una viscosidad plástica mayor, esto es causado por lo siguiente: si una partícula sólida se parte, se tendrán dos porciones, trayendo como consecuencia que las superficies expuestas serán mayores con respecto a la original. Una partícula plana tiene mayor superficie total expuesta que una esférica del mismo volumen.

La mayoría de las veces un aumento en la viscosidad plástica de un lodo de perforación es consecuencia del aumento del porcentaje de sólidos dentro del sistema, y como la viscosidad plástica es la porción de la resistencia a fluir causada por fricción mecánica entre las partículas del lodo, a mayor sólidos mayor fricción. Esto guarda una gran relación con lo referente a la perforación, ya que los sólidos perforados, se van incorporando al lodo, aumentando la cantidad de sólidos. Si estos sólidos no son removidos del fluido, y continúan rompiéndose en sólidos de menor tamaño y además se siguen recirculando dentro del sistema, ocasionaran incrementos considerables en la viscosidad plástica.

2.5.1.4 Efectos de los sólidos de perforación en el punto cedente y la fuerza de gel

El punto cedente del lodo es definido como, la medida de la fuerza de atracción entre las partículas a condiciones dinámicas de flujo, y la fuerza de gel también es una medida de la fuerza de atracción pero a condiciones estáticas, estas propiedades están muy relacionadas con la capacidad de limpieza que posee el lodo. Esta fuerza se puede decir que es una consecuencia de las cargas eléctricas sobre las superficies de las partículas sólidas dispersas en la fase líquida, cuya magnitud es función del tipo de sólidos y la cantidad de sólidos.

La acción trituradora de la mecha de perforación, rompe los sólidos dejando expuestas una mayor cantidad de partículas eléctricamente cargadas en la superficie del lodo. Como consecuencia de esto a mayor cantidad de sólidos, aumenta el número de cargas en la superficie, disminuye la distancia entre ellas, contribuyendo así a un posible aumento del punto cedente y fuerza de gel en el sistema.

Cabe destacar que actualmente se están realizando trabajos investigativos para demostrar que el punto cedente y la fuerza de gel, además de estar relacionados con las partículas sólidas cargadas eléctricamente, también dependen aunque no en la misma magnitud de las partículas inertes o mejor dicho las no cargadas eléctricamente.

2.5.2 Métodos para combatir la contaminación por sólidos

El control de sólidos es el proceso mediante el cual la acumulación de sólidos indeseables en un sistema de lodo es controlada, ya que los mismos tienen efectos perjudiciales sobre las propiedades del fluido y sobre el proceso de perforación.

Las propiedades reológicas y de filtración pueden hacerse difíciles de controlar cuando la concentración de sólidos pertenecientes a la formación perforada (sólidos de baja gravedad específica) se vuelve excesiva, provocando un aumento de las propiedades reológicas y en el volumen de filtrado a las formaciones permeables, así como la disminución de productividad de las formaciones productoras, atascamiento de la tubería, disminución en la tasa de perforación y reducción de la vida útil de las mechas, ocasionando, de esta forma, la aparición de problemas operacionales y de productividad en los pozos.

Mediante la utilización de un sistema de control de sólidos adecuado se pueden extraer estos sólidos indeseables.

El objetivo de tener un sistema de control de sólidos en los taladros de perforación, es para extraer los sólidos de la formación, cortados durante la perforación de los hoyos.

Por esa razón, para lograr una buena eficiencia de remoción de sólidos, será necesario realizar un buen mantenimiento y seguimiento del funcionamiento de los equipos, a través de un personal adiestrado que este pendiente que el sistema trabaje eficientemente para lograr ventajas económicas.

Como hemos dicho anteriormente existen básicamente tres métodos para combatir la contaminación por sólidos de perforación, los cuales son floculación selectiva, remoción mecánica de sólidos y el más cuestionado de todos la dilución.

2.5.2.1 Floculación selectiva

Este proceso consiste en agregar sustancias químicas "floculantes" o coagulantes para promover la formación de agregados de las partículas de mayor tamaño que precipitarán y/o serán separadas más fácilmente. Este proceso consiste, como su nombre lo indica, en que al lodo que se encuentra contaminado se le añade algún aditivo para provocar la floculación de las partículas sólidas suspendidas en él, esto es con el propósito de formar partículas más grandes que luego deben ser separadas.

2.5.2.2 Remoción mecánica de sólidos ^(6, 10, 11 y 12)

Este método consiste en el empleo de aparatos para remover los sólidos presentes en el lodo, estos aparatos están diseñados según sea el requerimiento del pozo que se está perforando, la cantidad y tamaño de sólidos removidos de la formación.

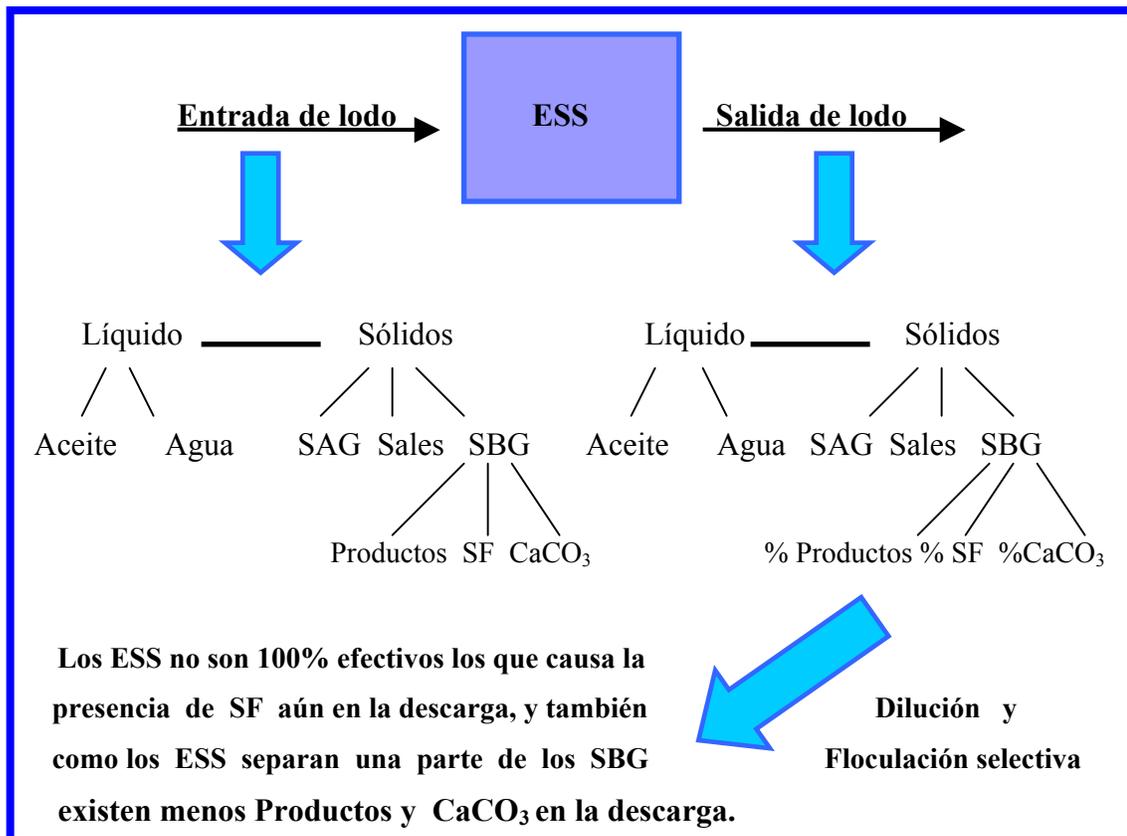


Figura # 2.11 Partículas presentes en el lodo a la entrada y salida de los ESS

La figura 2.11, es una figura esquematizante del papel de los equipos de remoción de sólidos (ESS), dentro de la perforación de un pozo, donde:

SBG: Sólidos de baja gravedad

SAG: Sólidos de alta gravedad

SF: Sólidos de formación

Productos: Aditivos añadidos al lodo intencionalmente para su preparación

El método de remoción de sólidos esta conformado por los siguientes equipos:

- **Zarandas vibratorias:**

El primer y más importante dispositivo para el control mecánico de sólidos es la zaranda vibratoria. Este equipo es un separador constituido por tamices que se emplean para remover los recortes grandes incluidos en el lodo debido a los trabajos de perforación. Existen zarandas simples, doble y de triple malla, para de esta manera remover recortes de menor tamaño a tasas de flujo mayores.

La selección del tamaño de la malla de los tamices depende de las condiciones de trabajo del lodo a través de la perforación que se este realizando.

La zaranda vibratoria es la primera línea de defensa contra el aumento de sólidos en el lodo. Con un poco de cuidado, observación y ajuste para alcanzar las capacidades máximas de procesamiento y de eficiencia de remoción en esta etapa, pueden evitarse muchos problemas. Este dispositivo elimina del lodo de perforación los sólidos mas grandes, es decir, desde tamaño arena en adelante.

A continuación se presenta una figura de una zaranda simple usada en los trabajos de perforación:



Figura # 2.12 Zaranda vibratoria

- **Hidrociclones:**

Son recipientes de forma cónica en los cuales la energía es transformada en fuerza centrífuga.

El lodo se alimenta por medio de una bomba centrífuga, a través de una entrada que lo envía a la cámara de alimentación. Una tubería corta llamada tubo vértice se extiende hacia abajo en el cuerpo del cono y fuerza a la corriente en forma de remolino a dirigirse hacia abajo en dirección del vértice, es decir, hacia el extremo delgado del cono.

Los hidrociclones se utilizan para separar los sólidos de tamaño arena fina y limo del sistema de lodo de perforación.

No pueden separar sólidos coloidales así sean de alta o baja gravedad, por lo que la proporción de estos en el flujo inferior y superior va a ser la misma que en la alimentación.

Los tamaños de los conos y la presión de la bomba determinan el tamaño de partícula que se separa. Menores presiones dan por resultado una separación más gruesa y una capacidad reducida.

La siguiente figura muestra el esquema de trabajo de un hidrociclón:

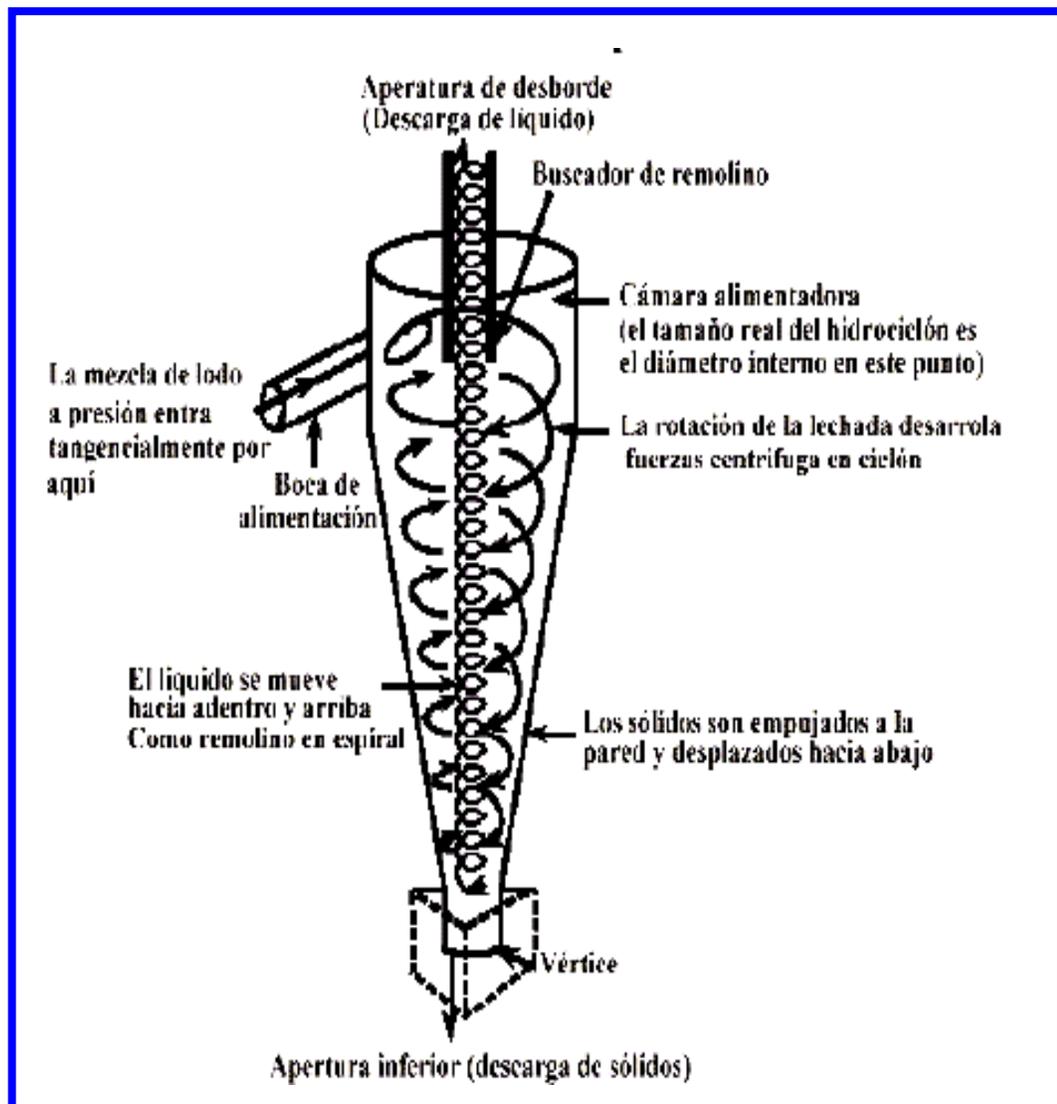


Figura # 2.13 Comportamiento del fluido dentro del hidrociclón

- **Desarenadores:**

Con el propósito de separar la arena se elige generalmente un cono de 6 pulgadas o más de diámetro interno. Los conos desarenadores tienen la ventaja de manipular volúmenes más grandes de lodo por cada cono, pero poseen la desventaja de seleccionar tamaños más grandes de partículas. Para obtener resultados eficientes, un desarenador debe ser instalado adecuadamente, este equipo es necesario fundamentalmente para evitar la sobrecarga de los deslimadores. El proceso de separación es similar al observado por el hidrociclón dentro de su cono. La siguiente figura presenta un desarenador:



Figura # 2.14 Desarenador

- **Deslimadores:**

Como su nombre lo indica es usado para eliminar las partículas tipo limo y se usa generalmente un cono de 4 pulgadas, el número de conos varía respecto al volumen de lodo que se hace circular. El tamaño de partículas separadas es de 15 a 20 micrones, dado que la

barita está en el mismo rango de tamaño de partícula que el limo, también se separará del lodo.

Normalmente, los lodos densificados poseen gran cantidad de sólidos (porcentaje por volumen), para poder permitir la separación eficiente del limo por medio de hidrociclones. Por consiguiente los deslimadores se usan raramente para el tratamiento de lodos densificados por arriba de 12,5 lpg. Toda aplicación de deslimadores en lodos densificados requiere un cuidado extremo en su empleo de manera de no reducir la densidad del lodo en un nivel que pueda ser antieconómico. A continuación se presenta una figura representativa de un deslimador:

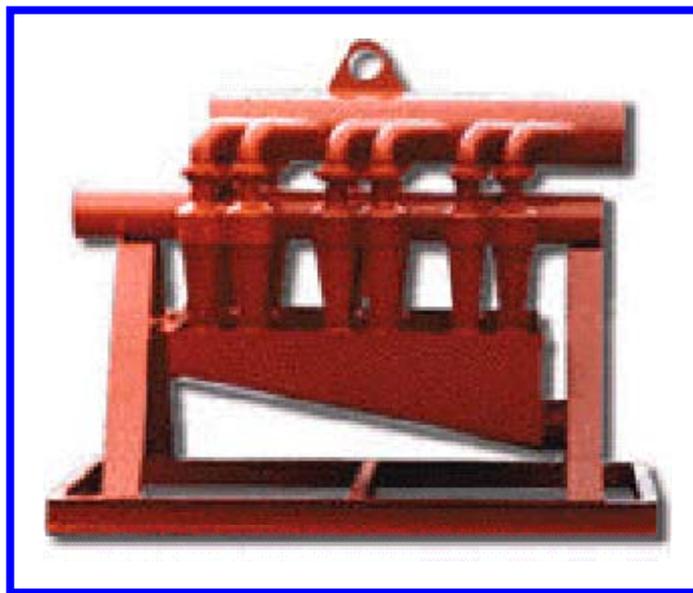


Figura # 2.15 Deslimador

- **Limpia lodos:**

El limpia lodos constituye uno de los equipos más recientes que ha entrado en uso para la remoción de sólidos. Este equipo consiste en una serie de conos deslimadores (generalmente de 8 a 12 conos de 4 pulgadas), colocados por encima de un tamiz de malla fina de alta vibración. El proceso remueve los sólidos perforados de tamaño arena aplicando primero el proceso del hidrociclón al lodo, y luego hace caer la descarga de los

hidrociclones sobre el tamiz vibratorio de malla fina. El lodo y los sólidos que atraviesan el tamiz (tamaño de partícula dependiente del tamaño de la malla) son recuperados y los sólidos retenidos sobre el tamiz se descartan.

Dado que el 97 por ciento de la barita es, de acuerdo con las especificaciones API, de un tamaño inferior a 74 micrones o de tamaño limo, una gran parte d ellas es descargada por los hidrociclones. La barita traviesa luego el tamiz y vuelve a introducirse al sistema. En fin el limpia lodos es, en la práctica, un equipo desarenador de un lodo densificado. La figura siguiente muestra un equipo limpia lodos:

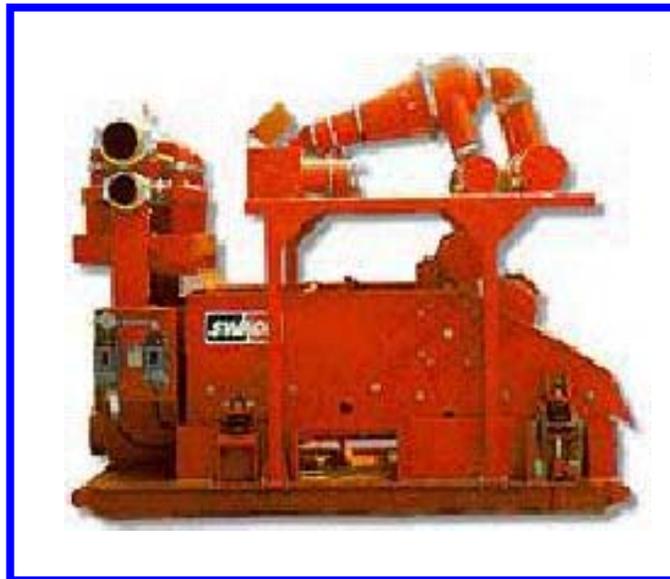


Figura # 2.16 Limpia lodos

- **Tres en uno:**

Este equipo consiste en una serie de ciclones desarenadores, deslimadores y una zaranda, evita descargar líquido, y los ripios salen más secos. El Tres en uno procesa el líquido descargado por las zarandas, y su descarga líquida es tratada por la centrífuga, en general toda la descarga de los Tres en uno requiere ser centrifugada.

El uso de este equipo debe ser limitado en situaciones donde hay un alto contenido de arena, en ese caso se debe usar un tamaño de malla suficientemente grande para separar la arena y el fluido recuperado debe ser tratado por una centrífuga. En la perforación de hoyos superficiales se recomienda utilizar desarenadores. En los hoyos intermedios y productores se debe utilizar cuando las zarandas tanto primarias como secundarias no sean suficientes para remover los sólidos generados en la perforación.

El número de conos a ser usados se selecciona de acuerdo a las condiciones de perforación. Como regla general, se debe usar las mallas más finas como sea posible y usar conos con la mayor tasa de flujo permisible. A continuación se presenta un equipo tres en uno:



Figura # 2.17 Tres en uno

- **Centrifugas:**

Está compuesta por un tazón cónico de acero horizontal que gira a una gran velocidad, con un tornillo transportador helicoidal en su interior. Este tornillo gira en la misma dirección que el tazón exterior, pero a una velocidad ligeramente más baja. El lodo es bombeado dentro del hueco del tornillo transportador, donde es expulsado hacia fuera, formando un anillo de lodo llamado “estanque”, donde el nivel de dicho estanque será determinado por la altura de los orificios de descarga de líquido en el gran extremo embridado del tazón.

Luego la lechada fluye hasta los orificios, a través de dos canales formados por las aletas del tornillo, ya que los sólidos se acumulan contra la pared interior del tazón. A medida que la alta velocidad rotacional ocasiona la acumulación de los sólidos contra la pared interior del tazón, el tornillo transportador los empuja hacia el extremo del tazón, a través del área cónica seca (la playa), donde son separados todos los líquidos libres y son descargados los sólidos.

El uso de la centrífuga causa la eliminación de sólidos coloidales y algunos aditivos del lodo beneficiosos sólidos tales como la bentonita y los lignitos, por lo que es de suma importancia tener en cuenta esta pérdida de las propiedades del lodo, para así no tener problemas de perforación. Entonces, al utilizar la centrífuga, se procede a aumentar el tratamiento con bentonita y otros aditivos para mantener en buen estado las propiedades del lodo de perforación. También será necesario la dilución y otros tipos de tratamientos, ya que el sistema de control de sólidos no es 100 por ciento eficiente, pero estos tratamientos serán en menor proporción si es utilizada la centrífuga. La siguiente figura muestra una centrífuga:

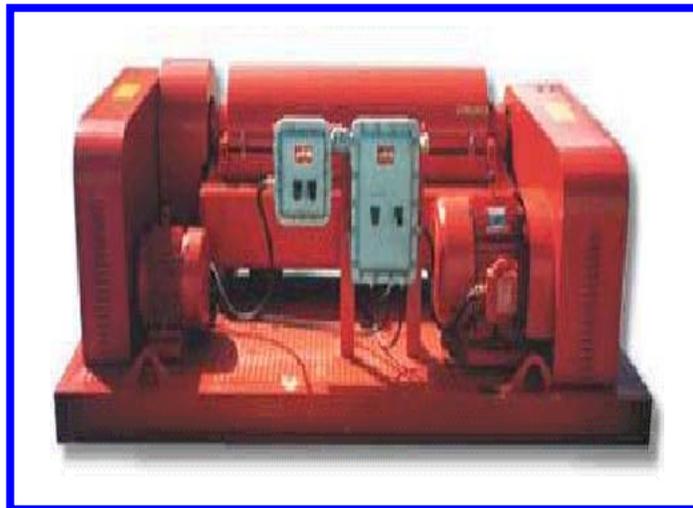


Figura # 2.18 Centrífuga

2.5.2.3 Dilución ^(3 y 15)

Consiste en agregar agua o lodo líquido necesario para mantener el contenido de sólidos (% en volumen) y por ende la densidad del sistema de lodo a medida que se va perforando. Entre las principales funciones de la dilución se encuentran:

- Reducir la concentración de sólidos dejados por un equipo mecánico de remoción de sólidos.
- Reemplazar los líquidos perdidos cuando se han usado equipos mecánicos de control de sólidos.

La necesidad de agregar fluido al sistema para mantener sus propiedades indica el incremento del contenido de sólidos. Esto puede traer como consecuencia la generación de volúmenes excesivos y entonces los costos de descarte y limpieza podrán ser muy grandes.

Actualmente en campo esta es una de las técnicas que más se usa, hasta que se llega un momento donde este método ya no es rentable, Leonel Robinson desarrolló un programa por medio del cual predice y calcula la cantidad de lodo a ser añadido para cumplir con los requerimientos necesarios en el pozo que se está perforando, y también dice en que punto ya no es rentable realizar esta dilución, es decir, predice el costo por barril de lodo a ser diluido, dependiendo de la cantidad de sólidos de perforación presentes y la cantidad de sólidos a ser añadidos de nuevo al sistema.

A continuación se presenta una figura que esquematiza el cálculo de la dilución y descarte de un fluido donde los equipos de separación de sólidos tienen una eficiencia de 90 por ciento y asumiendo un 35 por ciento de sólidos desechados.

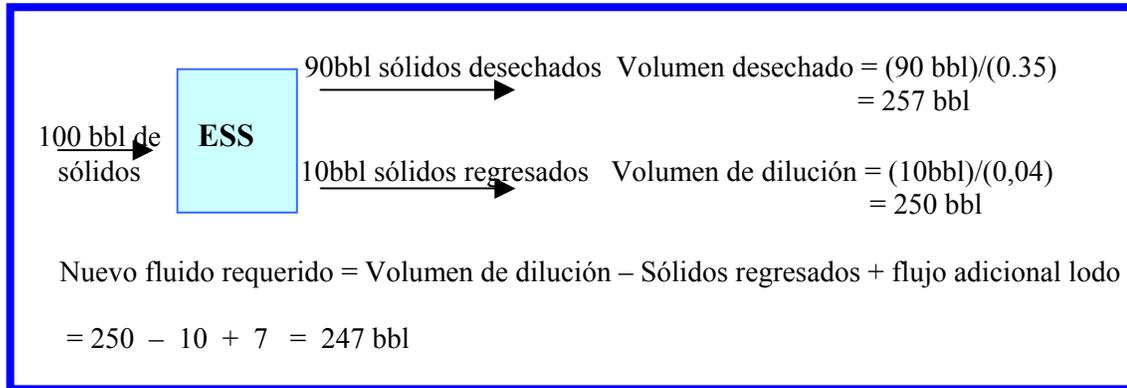


Figura # 2.19 Esquema de cálculo de dilución y descarte ⁽¹⁵⁾

El costo de dilución en comparación con las otras técnicas de control de contenido de sólidos es alto por lo que es importante contar con un medidor de flujo de líquido para poder analizar y optimizar el comportamiento del sistema.

Es de importancia destacar que los costos de dilución se incrementan para lodos de mayor densidad y menor tolerancia en cuanto al porcentaje de sólidos de baja gravedad; y que en lodos densificados se diluye primero para disminuir el porcentaje de sólidos de baja gravedad y luego se densifica.

El factor de dilución se refiere a la relación entre la cantidad de fluido a ser añadido para dilución y cantidad de fluido actual en el sistema para obtener la densidad deseada.

Existe dentro de este método otro, que consiste en descarte y dilución el cual es definido igual que la dilución común y corriente pero se descarta una cantidad de lodo, a continuación se enumeran los pasos a seguir:

- Botar primero el lodo usado igual al volumen de lodo nuevo a ser añadido, entonces luego añada el lodo nuevo.
- Diluya el lodo al nivel de porcentaje de sólidos de baja gravedad deseado, en un solo paso en vez de muchos pequeños pasos frecuentes.

- Mantenga el volumen total de lodo en el mínimo requerido.
- El programa de dilución debe ser planificado en lugar de dejarlo a la suerte.

2.6 TAMAÑO DE PARTICULAS:

Si las partículas que integran un sedimento fueran todas esferas perfectas, no existiría dificultad para definir o determinar sus tamaños, y por consiguiente la especificación de sus diámetros sería suficiente para poder clasificarlas ⁽⁹⁾.

En la práctica el significado del término diámetro varía considerablemente según la forma como se haya efectuado la medición, pero todos estos métodos se basan en que las partículas componentes de una roca son esferas o que sus medidas puedan ser expresadas como diámetro de esferas equivalentes; sin esa condición las medidas que se toman serán imprecisas ⁽⁹⁾.

El tamaño de las partículas juega un papel muy importante en el área superficial, ya que la misma aumenta a medida que la partícula se degrada, provocando cambios en las propiedades del lodo y problemas durante la perforación. Por esa razón, los sólidos menores a $2\ \mu$ (coloidales) deben ser extraídos. Si un sólido tiene un tamaño de por ejemplo 40 micrones y se degrada a varias partículas de 1 micrón se tendrá mayor área superficial, y aumentará la viscosidad del lodo, ya que habrá más líquido humectando a la nueva distribución de partículas.

La norma granulométrica aceptada en América por sedimentólogos proviene del trabajo de Udden en el año 1914, quien ideó una escala granulométrica de clases de tamaños de partículas componentes de un sedimento. En 1922 se modificaron las definiciones de Udden, y en la próxima tabla se muestran los límites granulométricos aceptadas actualmente por sedimentólogos de toda América:

Tabla # 2.4 Clasificación del tamaño de partículas para rocas sedimentarias

Tamaño (mm)	Fragmento	Agregado	Tipo de roca
>256	Bloque	Aglomerado	Conglomerado
256-64	Guijón	Grava de guijones	Grauvaca
64-4	Canto rodado	Grava de guijarros	Grauvaca
4-2	Gránulo	Grava de gránulos	Grauvaca
2-1/16	Arena	Arena	Arenisca
1/16-1/256	Limo	Limo	Limolita
<1/256	Arcilla	Arcilla	Lutita

Existe otra manera de clasificar los tamaños de partículas para los sólidos de perforación amparados por una clasificación de la API, la tabla siguiente expresa esa clasificación:

Tabla # 2.5 Clasificación del tamaño de partículas sólidas

Categoría	Tamaño (micrones)	Ejemplo
Coloidal	< 2	Bentonita, arcilla, sólidos de perforación muy finos, barita fina
Limo	2-74 < malla 200	Barita, limo, partículas de lutitas, carbonatos finos, polvo de cemento y arenas finas
Arena	74 – 2000 (malla 200-10)	Arenas medianas y gruesas, Lutitas, carbonatos, recortes y barita gruesa

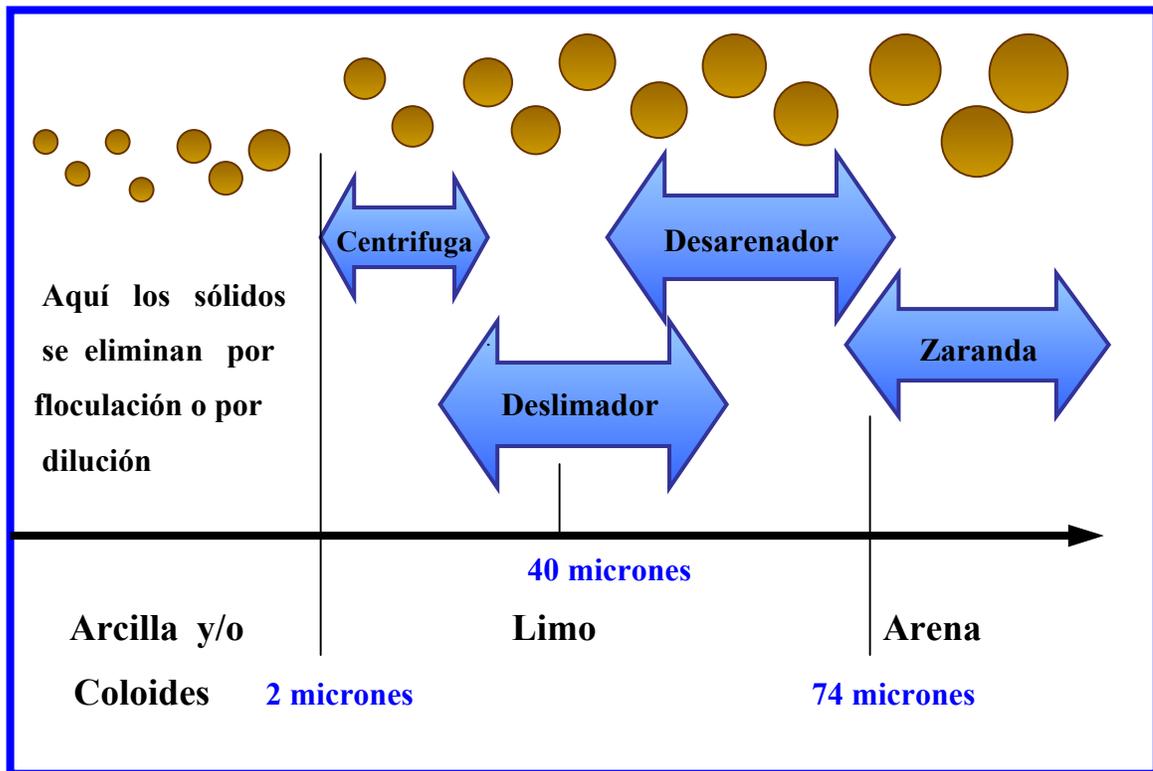


Figura # 2.20 Tamaños de partículas con su respectivo equipo que las elimina

2.7 SISTEMAS COMERCIALES

2.7.1 Sistema polimérico Flopro™ (12):

El sistema polimérico Flo-Pro™ es un fluido de perforación "Drill-In", que no es más que un fluido que previene el daño a la formación por disminución del volumen de invasión del filtrado, por una menor existencia de los sólidos en el sistema, ya que hay una mejor escogencia, provocando una mínima penetración de sólidos.

También se dice que están reológicamente diseñado para la perforación de pozos horizontales y altamente inclinados, es decir, para una elevada necesidad de limpieza del hoyo de perforación. Con el se logra una excelente operación de perforación y un hoyo

optimo para ejecutar las operaciones de completación y así lograr un máximo de productividad.

El sistema Flo-Pro convencional/ inhibitorio esta constituido por:

- Flo-VisTM: Goma xántica clarificada con reología única dando viscosidad a muy bajas tasas de corte, es decir, un agente viscosificante.
- Flo-TrolTM: Controlador y reductor de filtrado, derivado especial de almidón, produciendo un revoque fino, flexible y fácil de remover, es estable hasta los 200 F de temperatura, es decir, controlador de filtrado de lodo.
- Lo- WateTM: Es el carbonato de calcio, y actúa como un agente sellante, además de ofrecer control en la pérdida de filtrado y ayuda a proveer peso en los lodos, es decir, agente densificante.
- NaCl / KCl, KOH/MgO: Usados para la inhibición de las arcillas y para ayudar al carbonato de calcio a proveer de peso al fluido, es principalmente un inhibidor de arcillas hidratables).

Este sistema también es usado en pozos de crudos pesados, zonas muy permeables o incompatibles con ácido, perforación con tubería continua, fluidos limpios para pozos horizontales, operaciones de desvío, pozos con alto ángulos.

Uno de los principales problemas que tal vez pueda presentar este sistema es, la temperatura que puede soportar antes de degradarse el polímero.

2.7.2 Sistema lignosulfonato ⁽¹²⁾:

Este tipo de lodo adquiere propiedades inhibitorias al agregar el lignosulfonato hasta grandes concentraciones, se dice que una de las razones de su uso es su estabilidad a la

temperatura, hasta llegar a los 300°F, su buen control en lo referente a la pérdida de filtrado, donde posee valores muy bajos.

Es un lodo adelgazado y, como desventajas se pueden decir que tiene problemas con espuma y se debe tener cuidado con el control pH, porque éste parámetro regula el funcionamiento del lignosulfonato, debe estar en un medio básico y su valor se encontraría entre 9 y 11.

Aunque como punto en contra, este sistema no debe ser usado cuando se está perforando la arena productora, ya que es muy contaminante por la presencia de lignosulfonatos.

El sistema lignosulfonato convencional está constituido por:

- MI – GelTM: Es la llamada bentonita, que no es más que una arcilla hidratable; es usado como agente viscosificante.
- Pac – UITM: Es usado como controlador de filtrado, ya que este lodo posee esa característica primordial.
- Spersene CFTM: Es un lignosulfonato usado como defloculante dentro de este sistema.
- TannathinTM: Es usado como controlador reológico y ayuda a controlar el filtrado del lodo. Ayuda a estabilizar las propiedades reológicas en presencia de cemento y a altas temperaturas.
- NaOH: Como este lodo es sensible a bajos valores de pH, se le añade este controlador de pH, para mantener sus valores entre 9 y 11.
- CaCO₃: Es el carbonato de calcio, y actúa como un agente sellante, además de ofrecer control en la pérdida de filtrado (agente puenteante), pero principalmente provee peso en los lodos, es decir, agente densificante.

2.7.3 Sistema Agua-Gel ⁽¹²⁾:

Es el llamado lodo de iniciación, obteniéndose de mezclar agua y bentonita, generalmente es una lechada espesa de bentonita y cal, se requiere mantener buena dilución con agua y control de sólido.

Es un lodo ligeramente tratado, a medida que se avanza en la perforación, se hace necesario agregar bentonita prehidratada para suspender la barita, y aumentar la capacidad de transporte y controlar la pérdida de agua. Su uso es dificultoso para formaciones que requieran pesos mayores a 12 lb/gal, con contaminaciones severas y altas temperaturas. Por usar bentonita y barita solamente, su uso se hace dificultoso para lodos de alta densidad, por ser muy poco manejable.

Este sistema esta conformado por:

- MI – Gel: Es la llamada bentonita, que no es más que una arcilla hidratable; es usado como agente viscosificante.
- Barita: Por su alta gravedad específica es usado como agente densificante, sustituye en algunos casos al carbonato de calcio.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 FUNDAMENTOS GENERALES DEL TRABAJO

Para la realización de este trabajo, previamente se efectuó un estudio con el fin de comprobar que tipo de aditivos es comúnmente incluido al sistema, y cual puede alterar de mejor manera las propiedades con fines académicos; nos dimos cuenta que son los sólidos de perforación y que a su vez pueden ser inertes o no inertes. Es importante señalar que en este trabajo cuando se indica lo de la inclusión de aditivos, bien sea inertes y no inertes, se le denomina contaminación, ya que contaminante es cualquier aditivo extra que ingresa al sistema y que pueda alterar las propiedades del mismo.

En las operaciones diarias de perforación de pozos, tanto a nivel mundial como a nivel nacional, el fluido de perforación, se encuentra sometido a diversos agentes externos, los cuales en la mayoría de los casos pueden provocar la alteración de sus propiedades físicas, reológicas y de filtrado; estos agentes o aditivos son definidos como contaminantes. La alteración de estas propiedades puede en un futuro causar daños irreparables en algunos casos de los pozos perforados; aunque con anterioridad se debió haber preparado un programa de perforación donde debería haberse tomado en cuenta el tipo de lodo con sus respectivas propiedades y el tipo de formación a perforar.

La inclusión de estos contaminantes dentro del lodo, esta directamente relacionado con el tipo de formación a la que se esta perforando, y como el principal contaminante del lodo es el sólido de perforación, es necesario hacer un buen seguimiento al lodo para saber cuan tolerable es; con el propósito de extender su uso al máximo antes de realizar trabajos de acondicionamiento en superficie, los cuales permitirán recuperar sus propiedades iniciales.

Dentro de los lodos de perforación se encuentran los fluidos base agua, y dentro de estos, una gran variedad de sistemas comerciales con características particulares para ser utilizados en distintas zonas a perforar, tomando en consideración las características de la perforación, de la economía y del impacto ambiental.

Por medio de este trabajo experimental, a nivel de laboratorio, se observa el comportamiento de los diferentes sistemas frente a diversos contaminantes, en este caso particular sólidos de perforación, y muy en especial, estudiar el desarrollo de la estructura de gel a causa de la inclusión de partículas inertes y no inertes al sistema, esto conllevaría en síntesis, al estudio de las propiedades reológicas con el objeto de definir hasta que punto es rentable el uso de algún tipo de fluido y donde lo más importante sería un buen tratamiento que permita combatir la contaminación. Pero por sobre todas estas cosas, conocer en parte, la influencia de los sólidos inertes a la formación de la estructura rígida definida como gel.

Cabe destacar que en el momento de la realización de este trabajo fueron estudiadas la variación de otras propiedades, tales como: filtrado de lodo, densidad y pH, muy importantes para ser tomadas en cuenta para definir la influencia de los sólidos de perforación dentro del sistema

La manera de llevar a cabo los experimentos a nivel de laboratorio siguió los siguientes pasos:

- Se procedió a realizar la formulación de los lodos a ser utilizados.
- Se añadieron a los sistemas los diversos contaminantes inertes y no inertes, a distintos porcentajes de masa: 5, 8 y 10% respectivamente.
- Después de conocer cual sistema es menos sensible a la contaminación se procedió a envejecer y realizar todas las medidas, esto permitió observar su comportamiento a las verdaderas condiciones del pozo.

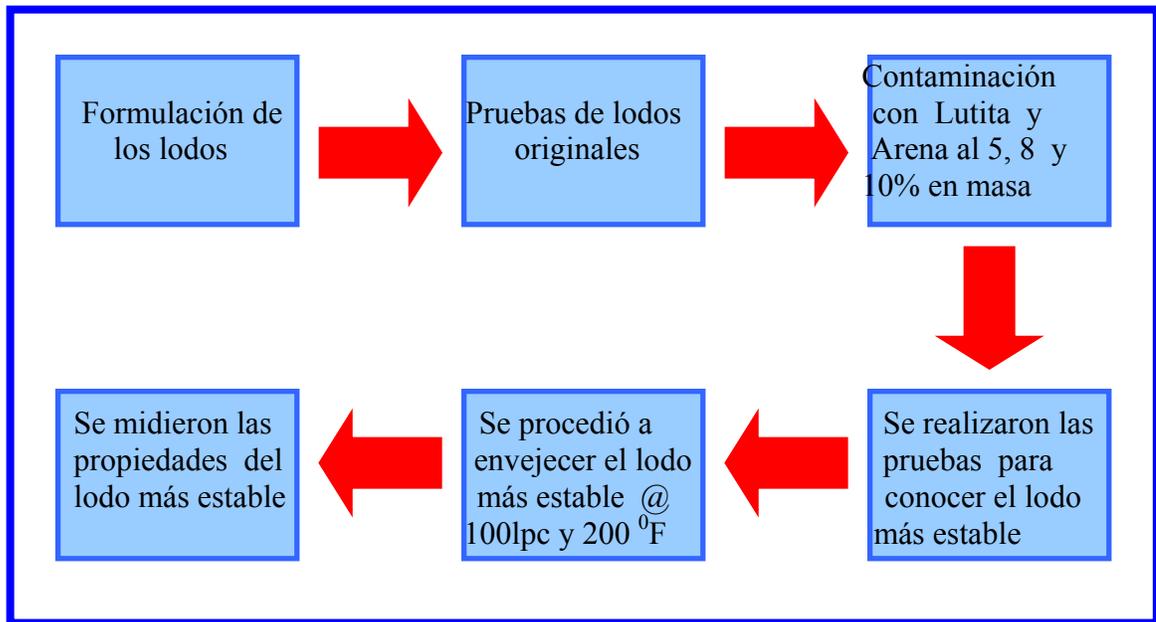


Figura # 3.1 Esquema de trabajo

3.2 ADITIVOS AÑADIDOS AL SISTEMA

Los aditivos contaminantes inertes y no inertes añadidos a los fluidos de perforación preparados experimentalmente, se clasifican en tres tipos de sólidos de perforación, tales como:

- Arenisca proveniente de la formación Misoa, Falla de Valera, cerca de Carora
- Lutita simulada a nivel de laboratorio.
- En algunas pruebas especiales se usó una lutita del Estado Falcón, formación Caujarao, miembro el Muaco.

La muestra de Arenisca fue triturada y llevada a partículas de menor tamaño, para así poder tener un mejor manejo de estas, a condiciones de laboratorio. Luego todos esos recortes obtenidos fueron tamizados para poder determinar la frecuencia granulométrica de los sedimentos con los que se contaminarán los fluidos de perforación. Es de vital importancia notificar que por medio de la distribución granulométrica y la difracción de rayos X (Ver

Apéndice A.1) se determinó exactamente el tipo de sólido de perforación usado como contaminante.

De acuerdo a la clasificación API, se considera arena a cualquier partícula que no pase por un tamiz de 200 Mesh o lo que es igual partículas mayores a los 74 micrones entonces se procedió a realizar la frecuencia granulométrica de la Arenisca. Una vez tamizada esta muestra proveniente de una formación perforada, se obtuvieron los siguientes resultados, presentados en la tabla siguiente:

Tabla # 3.1 Granulometría de la Arenisca usada como contaminante

Tipo de Fragmento	Cantidad (gr)	Porcentaje
Arena	769,2	38,46
Limo	529	26,45
Arcilla	701,8	35,09
Total	2000	100

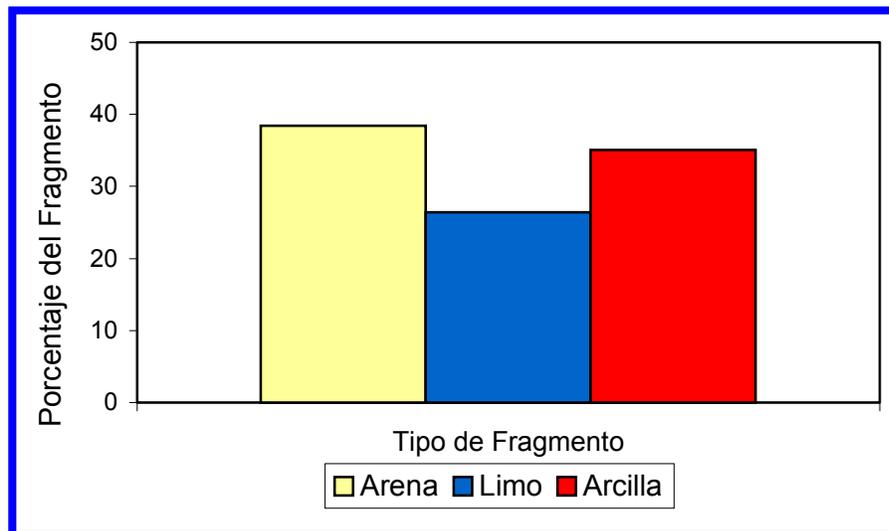


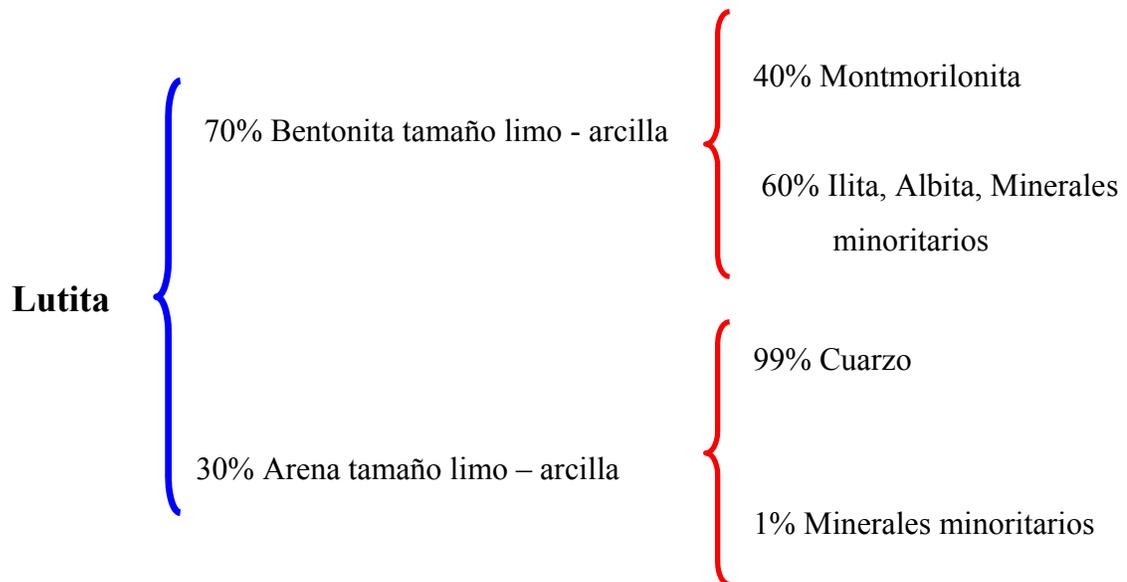
Figura # 3.2 Histograma de frecuencia granulométrica de la arenisca usada como contaminante inerte

Se puede observar en la figura 3.2 que la muestra posee fragmentos de arena, arcilla y limo, siendo el fragmento de arena el más abundante o el principal ⁽⁹⁾, del sólido de perforación o arenisca utilizada como contaminante en los lodos de perforación base agua. Existe también la presencia de 35,09 por ciento de arcilla y cabe destacar que este tipo de fragmento cuando es incorporado al sistema es de mayor influencia dentro de las propiedades reológicas, por su tamaño y su difícil posterior remoción. Para determinar el tipo de mineral presente en esta muestra, se procedió a realizar la prueba de difracción de rayos X (Ver Apéndice A.1), y el análisis arrojado por la prueba demuestra ser una roca totalmente inerte con más de un 99 por ciento de cuarzo.

Con respecto a la lutita simulada en el laboratorio se dispuso de una muestra compuesta de 70 por ciento de bentonita, gracias a la prueba de difracción de rayos X (Ver Apéndice A.2), más de un 40 por ciento de montmorilonita, la cual es un mineral no inerte y un 30 por ciento de la arena usada en la parte anterior, pero usando sólo los fragmentos menores a 74 micrones o tamaño limo y arcilla.

Como condición académica se conoce que las lutitas están formadas por una arcilla reactiva y un porcentaje de filosilicatos (familia de las micas), y gracias a la difracción de rayos X se pudo conocer, que la bentonita usada en el laboratorio para simular esta roca, además de poseer montmorillonita, posee un porcentaje de filosilicatos. Este sólido simulado solamente se preparó usando las partículas de tamaño limo – arcilla.

A continuación se esquematiza la forma como se simuló la lutita en el laboratorio.



Con respecto a la lutita usada solo en las pruebas especiales se puede decir que es un 70% de arcillas reactivas, esto fue descrito gracias a la difracción de rayos X (Apéndice A.3) y es proveniente del Estado Falcón y fue triturada para ser usada en tamaño limo – arcilla.

Es de suma importancia destacar que se le presta gran importancia al tamaño de partículas, ya que las propiedades reológicas a parte de estar influenciadas por el tipo de sólidos, también se influencia por el tamaño y forma de las partículas, por eso se le da mucha importancia a la caracterización de las rocas y al tamaño de los granos, para así poder simular condiciones de campo y obtener los resultados requeridos en esta investigación.

3.3 FORMULACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Para llevar a cabo el trabajo de contaminación de los fluidos de perforación base agua, se consideró formular tres tipos de sistemas comerciales usados actualmente en perforaciones de pozos, según los requerimientos de la misma.

- Sistema Polimérico Flopro™.
- Sistema Lignosulfonato.
- Sistema Agua – Gel.

3.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES Y EQUIPOS ^(1 y 13):

Con el fin de poder analizar los efectos de las partículas sólidas usadas como contaminantes sobre los lodos de perforación, se compararon las propiedades del fluido antes y después de la contaminación, ya que sería la forma más adecuada para demostrar los efectos de las partículas.

Las pruebas realizadas para observar el efecto fueron: densidad del lodo, pH, porcentaje de sólidos, pérdida de filtrado API y reología, esta última es la de mayor importancia para la realización de este trabajo.

Se debe destacar que para observar mucho mejor el efecto de una contaminación, luego de conocer el lodo más estable, se someterá el fluido a un proceso de envejecimiento dinámico, para simular las condiciones reales de pozo, y así poder tener una mejor comparación de las propiedades.

A continuación se enumeran y se describen las diversas pruebas realizadas a los fluidos de perforación con sus respectivos equipos:

3.4.1 Densidad del fluido

Esta prueba permite determinar la densidad inicial y final del fluido, es decir, antes y después de la entrada de sólidos al sistema.

Para este trabajo es muy importante realizar un seguimiento a esta propiedad, ya que cuando son añadidos aditivos contaminantes sólidos, se produce un incremento en la densidad, lo que genera a nivel de pozo un incremento en la presión hidrostática; y esta a su vez hace que la tasa de penetración aumente a causa del aumento de la diferencia entre la presión hidrostática y la presión de la formación.

Por todo lo dicho anteriormente es muy importante el seguimiento al peso del lodo antes y después de la contaminación, para así prevenir la disminución de la tasa de penetración y posible fracturamiento de la formación.

- *Balanza para lodos.*

La balanza para lodos es el instrumento utilizado para determinar la densidad de los fluidos de perforación, posee aplicaciones a nivel de campo y en operaciones de laboratorio. Mide la densidad del fluido en lbs/gal con una precisión de $\pm 0,1$ lbs/gal

Esta constituida por una base de soporte, un recipiente con tapa, un brazo graduado con un caballete móvil y en el punto de apoyo una burbuja de nivel.



Figura # 3.3 Balanza de lodos

El procedimiento a seguir para medir la densidad del fluido por medio de esta balanza esta descrito a continuación:

- ✓ Colocar el estuche que contiene la balanza en una superficie nivelada.
- ✓ Llenar el recipiente de la balanza hasta el tope con el fluido de perforación , asentar la tapa o cubierta con un movimiento firme. Parte del fluido que se encuentra en

exceso saldrá expulsado por el orificio en la cubierta, así se verifica que el recipiente este completamente lleno.

- ✓ Remover el exceso de lodo que esta alrededor del recipiente y probablemente en el brazo, que puedan alterar la medición.
- ✓ Colocar la balanza sobre el soporte, donde el punto de apoyo encaja en la ranura de la base, luego con movimiento del caballete equilibramos el brazo, este estará equilibrado cuando la burbuja nivel se encuentre en el centro.
- ✓ La densidad quedará denotada cuando al lograr el equilibrio, se lea del punto más cercano hasta la base del soporte, en una de las cuatro escalas impresas en el brazo de la balanza, en nuestro caso la lectura se hace en lbs/gal.

Estas balanzas pueden calibrar con agua dulce para asegurar la exactitud de las mediciones, el valor debe ser de 8,33 lbs/gal, en caso de que no sea así, se puede corregir gracias al ajuste del tornillo de la balanza o haciendo juego con los pesos de los plomos encerrados en el receptáculo colocados al final del brazo de la balanza.

3.4.2 Porcentaje de sólidos

Es usada para determinar el volumen en porcentaje de líquidos y sólidos que se encuentran en el sistema. Cuando ocurre una contaminación es de esperarse el incremento en la presencia de sólidos con respecto al líquido dentro del sistema.

Se dice que en forma indirecta esta prueba permite conocer si un lodo después de contaminarse, mantiene la capacidad de suspender los sólidos, ya que de ser así la cantidad en porcentaje de sólidos en el resultado inicial debe ser menor que la medición luego de contaminarse, esto es a nivel de laboratorio, porque si las partículas no están suspendidas decantan por gravedad hasta el fondo del recipiente del lodo.

- *Kit de retorta:*

Esta constituido por una cámara de acero de aproximadamente 10 cc, un condensador de líquido, receptáculo que transmite calor y un cilindro que recibe el líquido evaporado.



Figura # 3.4 Retorta

El procedimiento a seguir para medir el porcentaje de líquido y sólidos en el sistema, esta descrito a continuación:

- ✓ Limpiar y secar la cámara de la retorta antes y después de cada uso. Asegurarse que el interior de la cámara permanezca uniforme.
- ✓ Obtener una muestra del fluido, recientemente agitado.
- ✓ Depositar 10 cc de muestra del lodo en la cámara de la retorta.
- ✓ Colocar la tapa sobre la cámara y limpiar el exceso de lodo que sale a través del orificio.
- ✓ Colocar una laminilla de metal en la parte superior de la retorta y luego acoplar a la unidad de condensación.
- ✓ La cámara de la retorta debe quedar dentro de la unidad de calentamiento.

- ✓ Colocar un cilindro graduado bajo la espiga de la unidad de condensación y conectar la retorta.
- ✓ Dejar que la retorta caliente hasta tanto la condensación cese y luego permitir 10 minutos de calentamiento adicional.
- ✓ Leer el volumen de líquido (aceite y agua) recolectado en el cilindro graduado.
- ✓ El volumen de sólidos presente en el lodo se determina por diferencia.

3.4.3 Nivel de pH

Esta prueba se realiza para conocer el nivel de acidez de un lodo. El control de este parámetro es fundamental y de mucha ayuda en circunstancias tales como: la interacción entre las arcillas, la contaminación con cemento, la eficiencia de algunos aditivos son dependientes del pH, como también sirve para controlar el nivel de corrosión del lodo.

El término pH denota el logaritmo negativo del ión hidrógeno, activo en soluciones acuosas, un pH igual a 7 se dice que es neutro, menor a 7 se está en un medio ácido y mayor a 7 se dice que es un medio básico; lo recomendable en la mayoría de los casos es de 8 a 11.

- *Peachimetro*

El aparato que se encarga de medir este parámetro es el peachimetro que consta de un electrodo de vidrio conectado a la pantalla que muestra el valor directamente, una solución buffer.



Figura # 3.5 Peachimetro

Los pasos a seguir se describen a continuación:

- ✓ Tomar al electrodo de vidrio que se encuentra dentro de un recipiente con la solución buffer y limpiarlo con agua destilada.
- ✓ Encender el aparato.
- ✓ Introducir el electrodo de vidrio dentro del recipiente que contiene al lodo previamente agitado, y haciendo movimientos circulares, esperar 60 segundos a que la lectura se estabilice. Tomar ese valor como el pH.
- ✓ Retirar el electrodo del lodo y apagar el equipo.
- ✓ Lavar el electrodo con agua destilada y luego introducirlo en la solución buffer.

3.4.4. Perdida de filtrado API

La medición del comportamiento del filtrado y la formación del revoque de un lodo, es fundamental para su control y tratamiento.

Es importante realizar esta prueba en nuestro caso ya que las características del revoque y la cantidad de filtrado dependen de la cantidad y tipo de sólidos presentes en el sistema.

- *Filtro prensa:*

Para la realización de esta prueba se usa el filtro prensa que consta de: una celda cilíndrica de 3 pulgadas de diámetro, un cilindro graduado recolector del filtrado, un papel filtro, se usa un gas inerte que proporciona presión, una malla o pantalla que previene el paso de granos de sólidos a la línea de salida del filtrado (su tamaño varía), una empacadura, la tapa de la celda cilíndrica donde se ubica el papel filtro y la pantalla

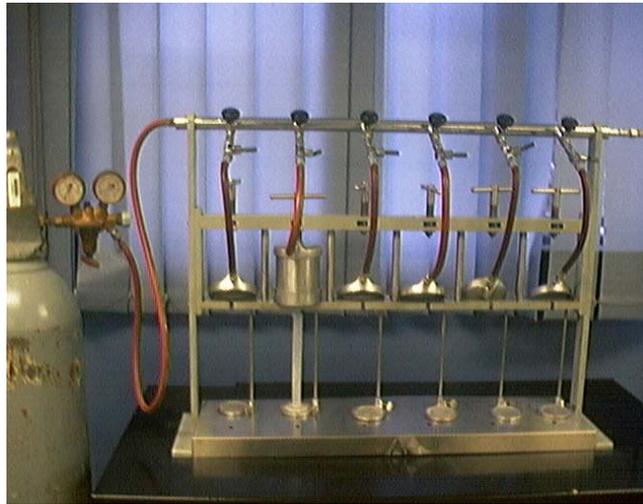


Figura # 3.6 Filtro prensa

Los pasos a seguir para la realización de esta prueba se enumeran a continuación

- ✓ Asegurarse que la celda, su tapa y la pantalla estén limpias y secas.
- ✓ Colocar la pantalla en el fondo de la tapa de la celda, sobre esta coloque el papel filtro, y por encima del papel filtro coloque la empacadura asegurándose que esta no se doble.

- ✓ Tomar la celda cilíndrica y ciérrela con la tapa y todos los componentes. Luego añada el lodo hasta $\frac{1}{2}$ pulgada antes del tope de la celda. Cierre el cilindro fuertemente. Coloque el cilindro graduado debajo de la línea de salida del filtrado.
- ✓ Abrir la bombona de gas inerte y, luego abra la llave de paso de gas hacia la celda cilíndrica, a partir de ahora comienza la prueba. El filtrado API se mide a 7,5 minutos y 30 minutos. Tome nota de esos dos valores
- ✓ Cerrar la llave de paso y la bombona. Libere el gas que se encuentra en las líneas de flujo por medio de su respectiva llave.
- ✓ Retirar la celda cilíndrica y bote el lodo. En la tapa inferior de la celda retire la empacadura y el papel de filtro con su revoque límpielo y mídalo en $\frac{1}{32}$ pulgadas. Retire la pantalla y limpie.

3.4.5 Reología

La viscosidad plástica, el punto cedente y la resistencia de gel, esta muy importante para la realización de este trabajo, son propiedades reológicas de los lodos que están directamente relacionadas con la cantidad de sólidos presentes en el sistema. Es por esta razón que estas propiedades son seguidas con especial atención, ya que ellas proporcionan la mayor información sobre los efectos de los sólidos contaminantes en los lodos de perforación. Valores altos de punto de cedencia, valores altos de viscosidad plástica y valores de resistencia de gel altos indican la presencia de sólidos extras en el sistema. Aquí probaremos que tanto influyen estos sólidos.

Para determinar los valores de viscosidad plástica, punto de cedencia y fuerza de gel de los fluidos, se utiliza un viscosímetro rotacional de 6 velocidades. Con este aparato se nos permite mediante lecturas directas y cálculos sencillos conocer los valores de las propiedades mencionadas.

- *Viscosímetro Fann (rotatorio con cilindros concéntricos):*

Por medio de este aparato, se determinan las propiedades reológicas de los lodos base agua a 120°F. Con las lecturas hechas del dial del aparato a las diferentes velocidades (600, 300, 200, 100,6 y 3 rpm), se proceden a construir los reogramas de los fluidos antes y después de la contaminación.

Este aparato consta de una copa térmica, un termómetro, y el viscosímetro Fann que provee las distintas velocidades de corte con su respectivo dial.

El viscosímetro posee un espacio anular entre dos cilindros que permite determinar las propiedades reológicas del fluido. El funcionamiento proporciona lecturas a velocidades variables, gracias a la potencia aportada por un motor integrado del aparato

El funcionamiento es el siguiente: en el espacio anular entre los dos cilindros concéntricos queda confinada una delgada capa de muestra de lodo, la camisa exterior gira a la velocidad indicada por el dispositivo manual de velocidades, y este movimiento produce cierta torsión sobre el cilindro flotante interno, su movimiento esta restringido por un resorte de torsión y un dial conectado que registra el desplazamiento del flotante del lodo que se encuentra en contacto íntimo dentro de una copa y a un a temperatura de 120°F. El aparato viene con velocidades nominales de: 3, 6, 100, 200, 300 y 600 RPM, seleccionables a voluntad, arrojando lecturas correspondientes a los esfuerzos de corte en unidades de lb/100 pies².

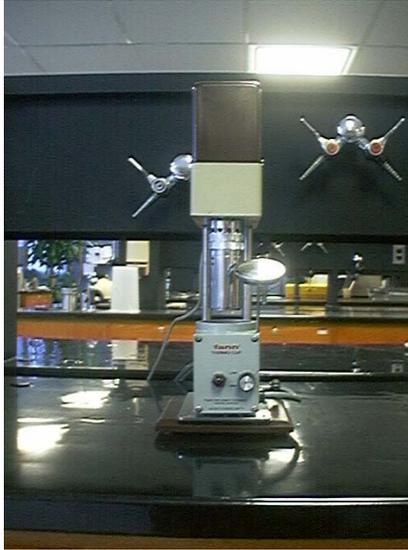


Figura # 3.7 Viscosímetro Fann

Los pasos a seguir para determinar las propiedades reológicas están descritos a continuación:

- ✓ Colocar una muestra de lodo en la copa de calentamiento que llene más de las $\frac{3}{4}$ partes de la misma, y mediante el regulador de temperatura seleccionar un valor de 120 °F, la cual puede ser verificada con la introducción de un termómetro en contacto íntimo con la copa de calentamiento.
- ✓ Sumergir la camisa rotatoria del viscosímetro (cilindro exterior) hasta una marca indicativa en donde debe estar el nivel del lodo.
- ✓ Seleccionar en el control de velocidad del viscosímetro 600 rpm, y con la camisa girando a esta velocidad, esperamos la estabilidad de la lectura y registramos el valor apreciado en el dial.
- ✓ Luego reducimos la velocidad en el control y seleccionamos 300 rpm, una vez estabilizada la lectura, registramos el valor del dial.

- ✓ Análogamente, se repite el procedimiento para 200, 100, 6, 3 rpm, que permitirán en caso de ser necesario la construcción del reograma del fluido.
- ✓ Después de tener todas las medidas se proceden a calcular todas las propiedades reológicas.
- ✓ La viscosidad plástica de cada uno de los lodos formulados será determinada por la resta entre la lectura a 600 con la de 300 rpm.
- ✓ El punto cedente (YP) en libras/100 pies² es igual a la lectura a 300 rpm menos el valor de la viscosidad plástica.
- ✓ La viscosidad aparente se obtendrá dividiendo la lectura de 600 rpm entre dos.
- ✓ Para la medición de las propiedades del gel, se cizalla el lodo a alta velocidad durante unos 15 segundos, luego se permite que se mantenga sin ningún esfuerzo cortante durante 10 segundos. Al finalizar este tiempo se hace girar el rotor seleccionando una velocidad de 3 rpm, e inmediatamente tomamos la medida de la máxima elongación sobre el dial por medio de la aguja; este valor será reportado como gel a los 10 segundos en lbs/100 pies².
- ✓ Para la medición del gel a 10 minutos, el procedimiento es análogo, se somete a fuerzas de cizallamiento a una alta velocidad por 15 segundos, y luego eliminamos el efecto durante 10 minutos. Se selecciona la velocidad de 3 rpm y registramos en el dial como la máxima elongación, la resistencia de gel a 10 minutos en lbs/100 pies².

3.4.6 Envejecimiento dinámico

Esta prueba es usada, para simular el comportamiento de los fluidos de perforación, una vez que este ha sido circulado (simulando condiciones de temperatura y movimiento en el

fondo del pozo). También es usada para determinar si los lodos, son estables o si soportan de verdad la contaminación, por consiguiente ayuda a simular mejor la contaminación del fluido, ya que se usa temperatura y movimiento.

Las muestras de lodo son envejecidas en celdas de acero con temperaturas de 200°F y un tiempo de 16 horas en movimiento para lodos base agua. Una vez concluido el tiempo de la prueba, se observan las condiciones del fluido para determinar si hay o no asentamiento de los sólidos, y se procede a medir todas las propiedades, lo cual permite observar sus variaciones y su estabilidad. Una vez ocurrida la contaminación y el envejecimiento del lodo se determina el nivel de tolerancia de los fluidos de perforación base agua considerando la cantidad de sólidos que entran al sistema.

- *Horno y celda de envejecimiento:*

El horno y la celda de envejecimiento, constituyen el equipo necesario para realizar la prueba de envejecimiento dinámico de los lodos base agua, tal como lo estipula la normativa. Esta prueba es dinámica porque durante el tiempo que dura la misma el lodo esta expuesto a temperatura y a movimiento por medio de un sistema de rodillos.

Este aparato consta de cuatro rodillos horizontales, estos transmiten el movimiento a las celdas gracias al acción de un motor externo activado en su tablero de control, en este se encuentra el interruptor de calentamiento, un regulador que permite seleccionar la temperatura entre 150 °F y 550 °F y una celda de envejecimiento con sus respectivas tapas.



Figura # 3.8 Celda de envejecimiento dinámico



Figura # 3.9 Horno de envejecimiento dinámico

El procedimiento a seguir consta de los siguientes pasos:

- ✓ Abrir la celda de envejecimiento removiendo la tapa exterior y la tapa interior para colocar la cantidad apropiada de muestra en la celda de envejecimiento.

- ✓ Instalar la tapa interior sobre la celda de envejecimiento asegurándose que esté apoyada correctamente (inspeccionar el anillo de teflón y reemplazar en caso de ser

necesario) y luego también coloque la tapa exterior sobre la celda de envejecimiento y ajústela a mano. Después ajuste los tornillos fuertemente con una llave Allen.

- ✓ Insertar el vástago de la válvula dentro del hueco roscado en el centro de la tapa interior y ajústelo con una llave ajustable.
- ✓ Ubicar el regulador de la celda del filtro AP-AT sobre el vástago de la válvula, asegurando el regulador sobre el vástago de la válvula insertando el pasador de retención.
- ✓ Cerrar el tornillo en T sobre el regulador hasta obtener una presión de 100lpc. Abra el vástago hasta la mitad para presurizar la celda y luego cierre el vástago de la válvula cuando la presión requerida haya ingresado a la celda.
- ✓ Abrir el tornillo en T sobre el regulador hasta que gire fácilmente la válvula de alivio de presión. Remover el pasador de retención y el regulador de presión del vástago de la válvula.
- ✓ Prender el horno de envejecimiento a 200°F (no girar los rodillos). Cuando el horno esté tibio, colocar la celda de envejecimiento conteniendo la mezcla presurizada y dentro del mismo (hacer girar los rodillos). Envejezca por un período de 16 horas.
- ✓ Remueva la celda y permita que se enfríe. Coloque una tela u otro material sobre la abertura del vástago de la válvula. Abrir el vástago de la válvula lo suficiente para aliviar toda la presión dentro de la celda, no intentar abrir el vástago de la válvula para aliviar la presión si la temperatura de la celda está por encima de 200 °F.
- ✓ Aflojar lentamente el conjunto de tornillos sobre la tapa de la celda. Remover la tapa exterior y la tapa interior y observar la condición del lodo para proceder a realizar las medidas.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, relacionadas con la inclusión de diversos aditivos contaminantes, ya sean inertes o no inertes en los diferentes fluidos de perforación base agua.

Los sólidos incluidos al sistema se clasifican en: inertes y no inertes y en diferentes tamaños, como fue descrito en el capítulo anterior “Metodología Experimental”, es decir, arena tamaño arena, arena tamaño arcilla-limo y lutita simulada en laboratorio, y en algunas pruebas especiales una lutita proveniente del Estado Falcón.

Cabe destacar que todos los fluidos estudiados, presentaron propiedades reológicas y de filtrado aplicables en campo, antes de añadir los distintos tipos de aditivos sólidos.

4.1 Sistema Bentonítico o Agua – gel

4.1.1 Formulación del fluido

Tabla # 4.1 Formulación del Sistema Agua – gel

Aditivo	Cantidad (cc)	Masa (lb)
Agua	322,621	322,621
Viscosificante	8,712	21,78
Densificante	18,667	78,4
Total	350	422,801

4.1.2 Resultados de las pruebas

Tabla # 4.2 Resultados de las pruebas al lodo Bentonítico antes y después de añadir los aditivos sólidos

Agua – gel		Arena (arena)			Arena (arcilla-limo)			Lutita		
Propiedades	Original	5%	8%	10%	5%	8%	10%	5%	8%	10%
Densidad lpg	10	10,1	10,3	10,4	10,2	10,3	10,5	10,2	10,3	10,5
T. prueba °F	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
PH	9,78	9,85	9,85	9,85	9,83	9,83	9,84	9,75	9,72	9,74
L600	32	40	40	43	53	55	58	245	—	—
L300	19	25	25	27	32	33	36	198	273	—
L200	14	19	20	20	25	27	30	172	246	—
L100	9	13	14	14	18	18	21	141	207	—
L6	3	7	7	8	6	7	8	71	110	—
L3	2	6	6	7	6	6	8	70	108	—
Va (cp)	16	20	20	21,5	26,5	27,5	29	122,5	—	—
Vp (cp)	13	15	15	16	21	22	22	47	—	—
Yp (lb/100p ²)	6	10	10	11	11	11	14	151	—	—
Gel 10 seg	4	6	6	7	8	9	10	34	47	—
Gel 10 min	12	21	24	26	27	28	30	65	84	—
Gel 30 min	14	25	29	32	30	31	34	80	98	—
Filt. 7,5 min	4,25	4,5	4,5	4	4,25	4,5	4,5	3,25	2,75	2,25
Filt 30 min	9	10	9,75	9,5	9	9	9,5	6,75	6,25	5,5

Es importante destacar que en la tabla 4.2 no se presentan los resultados de las propiedades reológicas para la adición de lutita en el sistema en un 10%, ya que el lodo no soporta esta cantidad de sólidos y se floculó, para el caso de 8% la lectura a 600 rpm no pudo realizarse porque pasaba de 300, que es la capacidad de medición de los viscosímetros disponibles en el laboratorio, lo que indica que también se floculo. Esto era de esperarse porque este lodo es muy sensible a la contaminación y ese tipo de sólidos es extremadamente contaminante, ya que este fluido en su formulación solo presenta dos tipos de aditivos, un agente viscosificante y uno densificante, no posee aditivos que puedan ayudar a soportar un poco

una contaminación de este tipo. Por consiguiente dentro de los sistemas base agua este es el más sensible por eso su uso es limitado y se le conoce como lodo de iniciación.

Para proceder a realizar el análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio se debe decir que hay que tomar en cuenta la siguiente leyenda referente al tipo de aditivo sólido utilizado:

- Arena tamaño arena
- Arena tamaño arcilla – limo
- Lutita

4.1.2.1 Comportamiento de la densidad

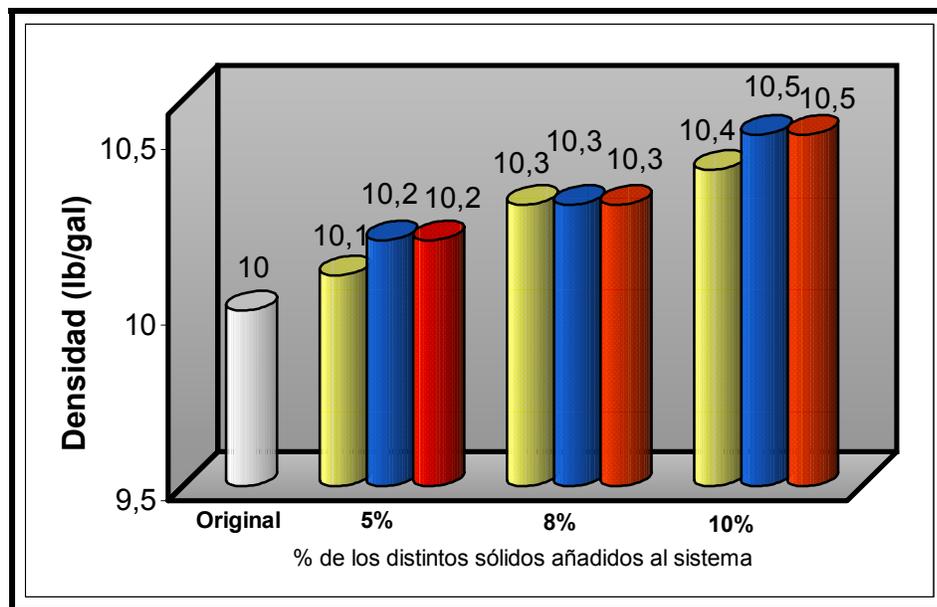


Figura # 4.1 Comportamiento de la densidad en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos

En lo que respecta a esta propiedad se sabe que la densidad se define como masa entre volumen, y que si a un mismo volumen se le incrementa la masa lo que se espera que se obtendría sería un aumento de la densidad ^(11 y 12). Esto es lo que ocurre en este sistema,

independientemente del tipo de sólido que sea, se observa que a medida que el porcentaje de sólidos incluidos al sistema aumenta, es decir, 5, 8 y 10% respectivamente, se produce el incremento de esta propiedad.

Los valores deberían ser muy parecidos, porque es la misma masa de sólidos que se esta incluyendo al sistema, independientemente del tipo o tamaño del mismo. Se observa que para las medidas con arena tamaño arena el valor varía en 0,1 lpg con respecto a los demás, esto puede ser por la incertidumbre del equipo o por la dificultad de realizar las mediciones cuando se usa la arena tamaño arena, ya que esas partículas pueden decantar por gravedad y se producen pequeñas variaciones en las medidas pero que no afectan mucho los resultados, porque el lodo se encuentra en constante movimiento impidiendo su fuerte decantación, caso contrario ocurre cuando el tamaño de las partículas son tan pequeñas que el lodo las mantiene en estado de dispersión..

4.1.2.2 Comportamiento del pH.

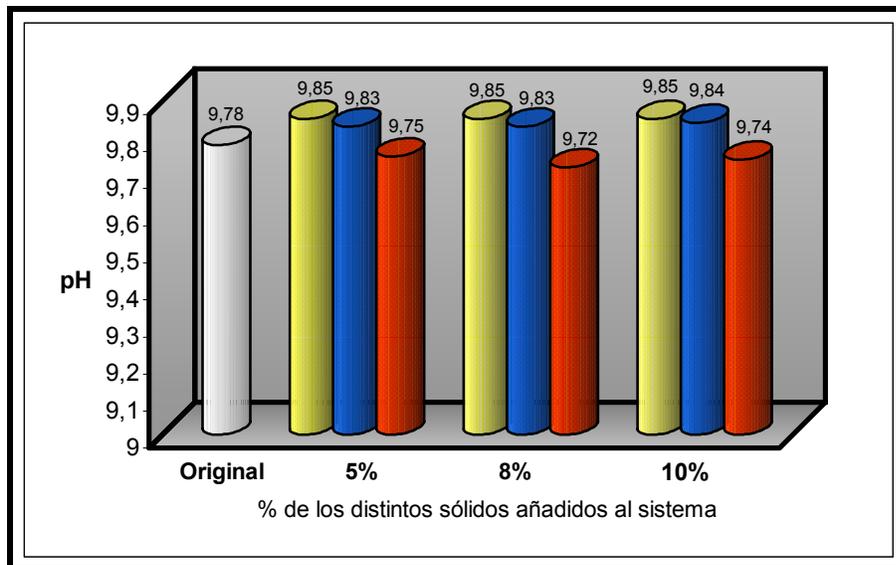


Figura # 4.2 Comportamiento del pH en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos

Como se sabe el pH se define como el logaritmo negativo de los iones hidrógeno ⁽⁴⁾, y como se observa, estos sólidos no poseen ninguna influencia en esta propiedad, ya que no producen ningún incremento de estos iones, independientemente de el porcentaje en masa ni el tipo o tamaño del sólido incluido, es decir, su tipo de carga o su tamaño de granos.

Aunque se muestra variación en los valores de pH, como lo presenta la figura 4.2, se puede decir que esa variación puede ser porque los fluidos fueron preparados en días distintos y es difícil conseguir esa igualdad, o por medidas del aparato; pero en general se dice que el valor de pH se encuentra en un rango normal para este tipo de lodo de 9 a 10. El pH es un buen indicador de la presencia de contaminantes, pero en este caso no es efectivo ya que los sólidos incluidos no alteran los iones H⁺, caso contrario ocurre en contaminaciones como por ejemplo: el cemento, agua de formación, donde si es un medio eficaz que indica presencia de contaminación.

4.1.2.3 Comportamiento de la viscosidad aparente

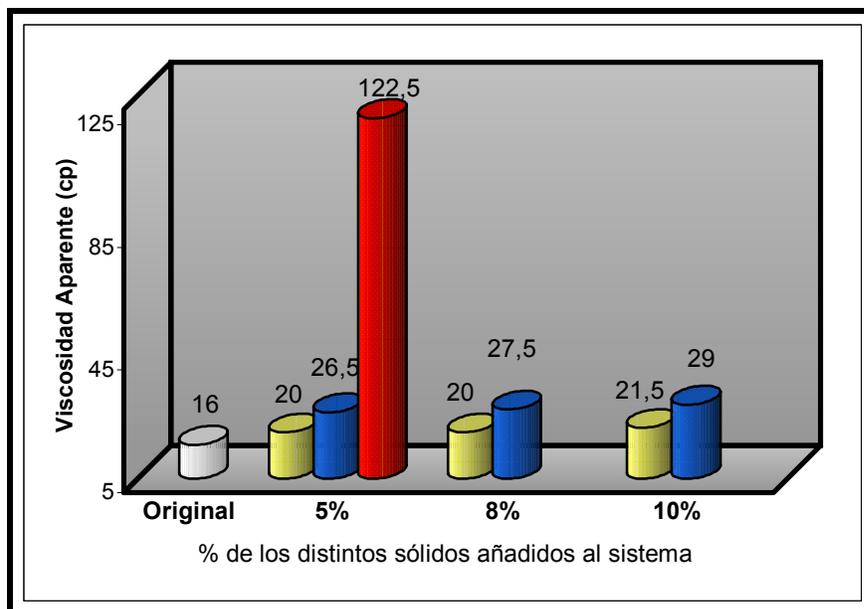


Figura # 4.3 Comportamiento de la viscosidad aparente en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos

En lo referente a esta propiedad se observa que las partículas cargadas, es decir, la lutita afecta inmensamente la viscosidad, porque la atracción de las cargas hace que las partículas se coloquen más juntas causando que el lodo tienda a aumentar la resistencia al flujo.

Esto se observa en la figura 4.3, donde las medidas de lutita al 8 y 10% respectivamente no pudieron hacerse porque el lodo se floculó, es decir, no soporta tantos sólidos en el sistema y mucho menos si estos son no inertes, y poseen cargas eléctricas que conllevan en futuro inmediato a la floculación excesiva y su imposible realización de las propiedades reológicas.

Por consiguiente se puede decir, que las partículas cargadas afectan en mayor magnitud la viscosidad aparente de un lodo que las inertes, por provocar un arreglo más unido por la atracción e interacción eléctrica entre las partículas del fluido, y a medida que aumenta la cantidad más viscoso se convierte el fluido.

Cuando se analiza las partículas inertes en este caso la arena, en sus dos respectivos tamaños, se puede concluir que a medida que se hace más pequeño el tamaño de los sólidos su influencia en la viscosidad aumenta, igual que a medida que se incrementa la cantidad de 5 a 8 y luego a 10% respectivamente.

Esto es causado porque al existir más sólidos en el mismo volumen, las partículas se arreglan de manera tal que se encuentran más unidas; aunque no presenten cargas eléctrica por ser inertes; incrementando así la resistencia al flujo del lodo y por consiguiente un incremento en la viscosidad.

4.1.2.4 Comportamiento de la viscosidad plástica

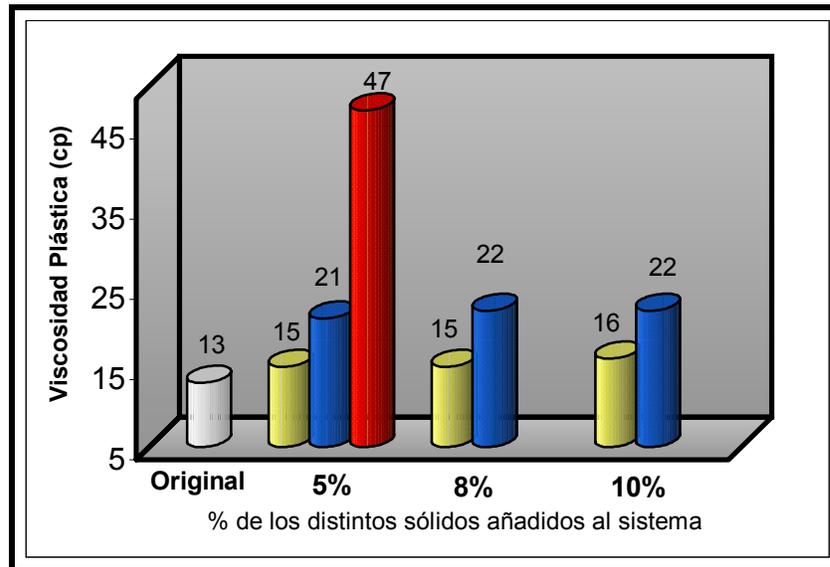


Figura # 4.4 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos Agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos

En los lodos de perforación, la viscosidad plástica aumenta proporcionalmente al área superficial de los sólidos. El área superficial de todos los sólidos debe estar humectada. A medida que la cantidad de líquido disminuye debido al aumento del área superficial, la viscosidad del fluido aumenta y la eficiencia del lodo disminuye ^(11 y 12). Los sólidos coloidales producen el mayor incremento de la viscosidad plástica en los lodos de perforación, debido a este aumento del área superficial en contacto. Por este motivo, el volumen de los sólidos coloidales contenidos en el lodo de perforación debe ser controlado por razones de economía y eficacia.

Lo dicho anteriormente puede ser observado en la figura 4.4 como el comportamiento en este tipo de fluido, también se observa que si el sólido incluido está cargado hace que las partículas se unan más y produzcan un incremento en la viscosidad, esto se ve muestra en la figura 4.4, simplemente porque las medidas de 8 y 10% con lutita no pudieron realizarse porque sus valores se excedían del dial del viscosímetro. Por todo esto se puede decir que, la viscosidad es directamente proporcional al tamaño de partícula y también al tipo de

sólido incluido, es decir, su tipo de carga, inerte o no. En la figura 4.4 se observa también que cuando el lodo es contaminado con arena en sus dos tamaños, es capaz de soportar un poco la adición de estos sólidos, pero se observa la tendencia a aumentar, porque están entrando más sólidos al sistema, y la viscosidad plástica es función de la fricción mecánica entre sólidos y sólidos, por consiguiente a mayor presencia de sólidos mayor viscosidad.

4.1.2.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado

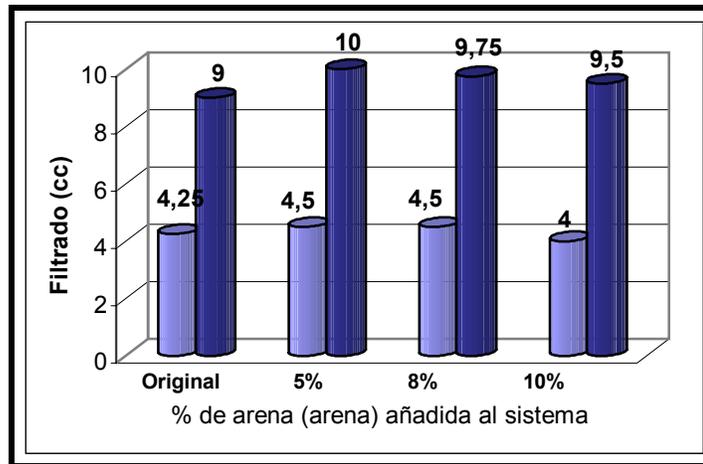


Figura # 4.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arena

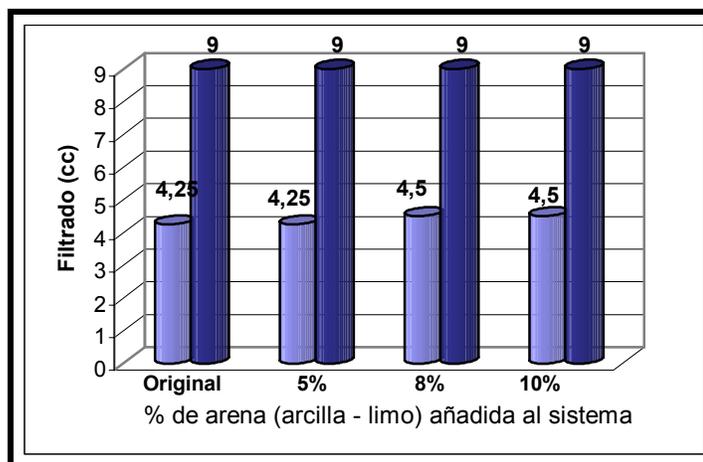


Figura # 4.6 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arcilla

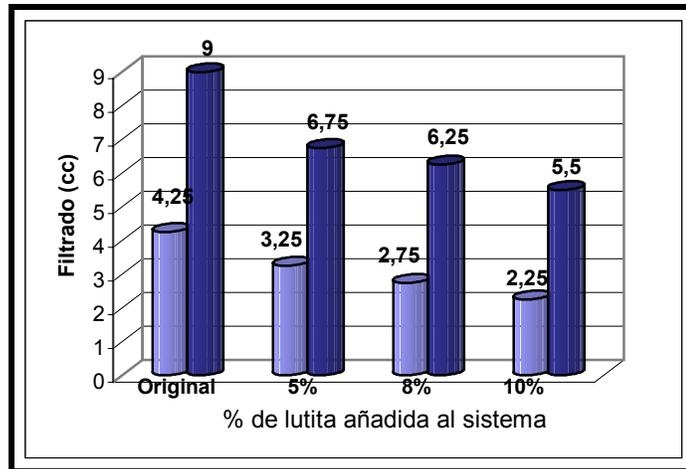


Figura # 4.7 Comportamiento de la pérdida de filtrado del sistema Agua – gel antes y después de añadir lutita

Se observa que a medida que se incrementa la cantidad de sólidos dentro del sistema, ocurre algo anormal, que es la tendencia a disminuir el filtrado, esto ocurre muy poco y se debe a la muy buena escogencia de los granos de los distintos aditivos añadidos al sistema, lo que ocurre es que la buena escogencia disminuye la permeabilidad del revoque y por ser partículas compresibles la presión aplicada al sistema ayuda a reducir el filtrado por medio de una buena compactación de los granos, independientemente del tipo de sólidos si es cargado o no es cargado.

Lo expresado anteriormente es válido para las tres gráficas de pérdida de filtrado, y para los tres tipos de sólidos incluidos al sistema agua – gel (ver gráfica 4.5, 4.6 y 4.7), lo sucedido aquí es algo poco común, porque la tendencia sería de aumentar el filtrado por causa de un incremento en la permeabilidad por medio de los distintos granos de los sólidos.

4.1.2.6 Comportamiento del punto cedente

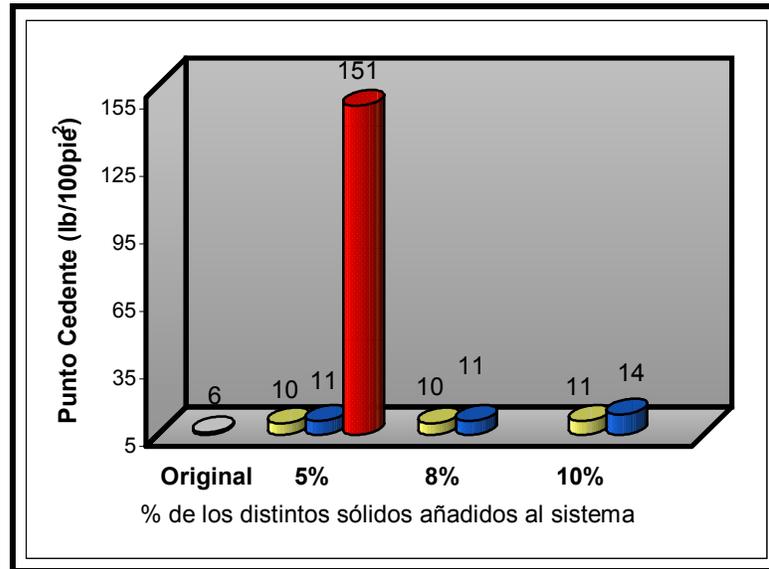


Figura # 4.8 Comportamiento del punto cedente del sistema agua – gel antes y después de añadir aditivos sólidos

No pudieron obtenerse las medidas para 8 y 10% de lutita ya que como fue mencionado anteriormente el lodo se encontraba floculado, no soportó ese nivel de contaminación, aunque con las medidas que si se hicieron, se infiere que el punto cedente es afectado por la inclusión de cualquier tipo de sólido.

Como el punto cedente es la resistencia al flujo causada por la atracción entre partículas^(10 y 12), se observa como aumenta al ingresar lutita en el sistema cuando se agrega 5% donde el valor sube de 6 a 151 lb/100pie², porque la lutita contiene arcillas reactivas y por consiguiente la atracción entre partículas aumenta, la inclusión de este tipo de sólidos a los sistemas debe ser de mucho cuidado ya que puede causar gravísimos daños al momento de perforar, por eso se debe llevar un buen seguimiento de las propiedades del lodo.

Se ha dicho en la literatura que el punto cedente es afectado solamente por partículas cargadas o no inertes^(4 y 5), pero gracias a estas pruebas, se observa que sí, las partículas cargadas disparan los valores de punto cedente, pero las inertes varían también esta

propiedad, aunque no en la misma magnitud pero si se presenta una pequeña variación, que pudiese ser significativa dependiendo de la formación que se este perforando, por eso se deben tener en cuenta todos los tipos de sólidos que ingresen al sistema

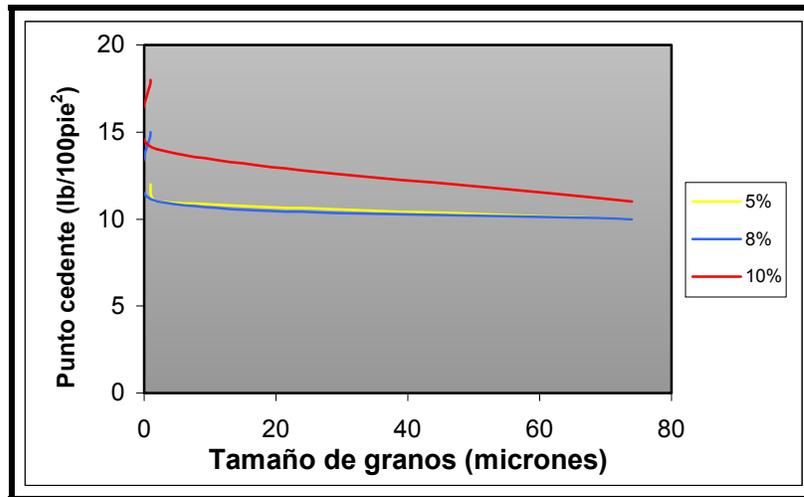


Figura # 4.9 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del sistema agua – gel

Esta gráfica fue hecha tomando en consideración la arena usada como aditivo, se empleó en sus dos tamaños arena y arcilla-limo, esto es para observar la influencia del tamaño de grano en esta propiedad con su respectiva concentración.

De esto se infiere que las partículas más pequeñas influyen más, lo cual es causado por el movimiento de las partículas, su interacción y el arreglo interno dentro del mismo volumen de lodo de las partículas, ya que una partícula más pequeña posee más superficie para interactuar y trae como consecuencia mayor punto cedente. También se observa que a medida que aumenta la cantidad de sólidos que ingresan al sistema la cedencia se incrementa, esto se observa en la gráfica 4.9.

4.1.2.7 Comportamiento de la estructura de gel

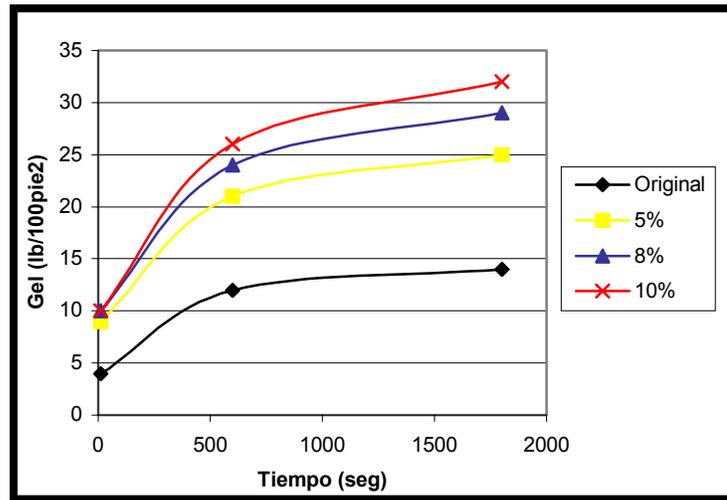


Figura # 4.10 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arena

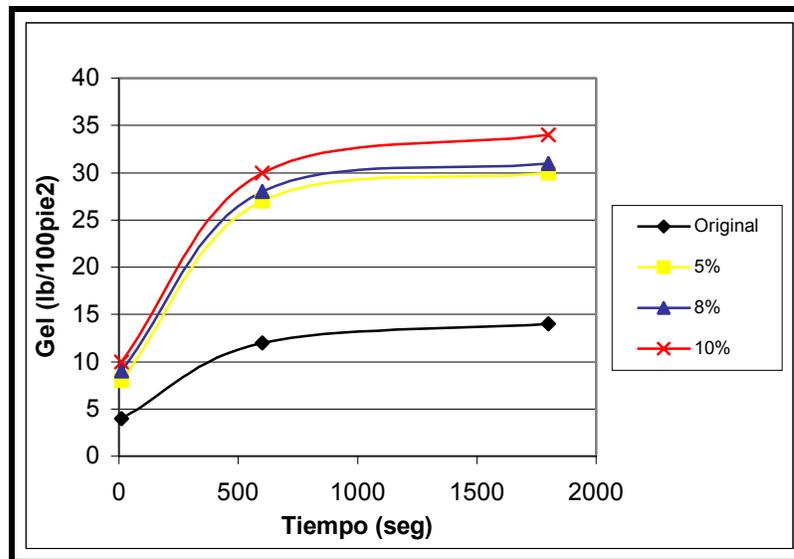


Figura # 4.11 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena tamaño arcilla

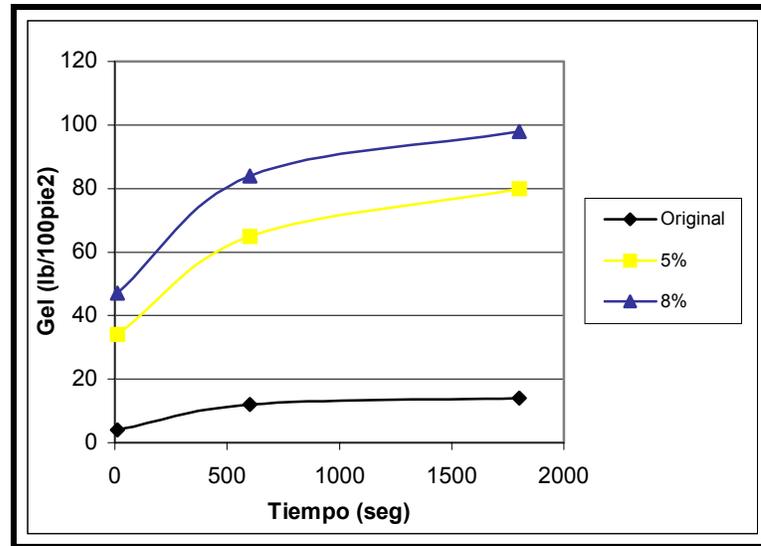


Figura # 4.12 Comportamiento de la estructura de gel en sistema agua – gel antes y después de añadir arena lutita

Al observar las tres gráficas anteriores, se infiere que este sistema presenta una formación de gel progresivamente antes y después de la adición de sólidos, muy beneficioso para este tipo de lodos, además de que presenta valores accesibles o favorables a la hora de realizar la perforación de una formación.

Se observa que la inclusión de sólidos al sistema incrementa la fuerza de gel independientemente del tipo, forma y tamaño de sólidos. Aunque se demuestra que la lutita eleva los valores, ya que incrementa la interacción o atracción entre las partículas por ser cargada, y esto es visible por los valores de la gráfica 4.11, los cuales con un 8% de sólidos casi llega a 100 un valor excesivamente alto para esta propiedad; de seguro dañaría las bombas. Se observa también que la medida a 10% tampoco se realizó por que las características del lodo impidieron su medición.

También se muestra que el tamaño de granos influye mientras más pequeño más influye porque aumenta la superficie de interacción, aunque esta sea inerte, se demuestra su influencia; caso contrario a lo que afirma la literatura, donde solo influyen las cargadas ^(4 y 5) esto podrá ser detallado por medio de las siguientes figuras.

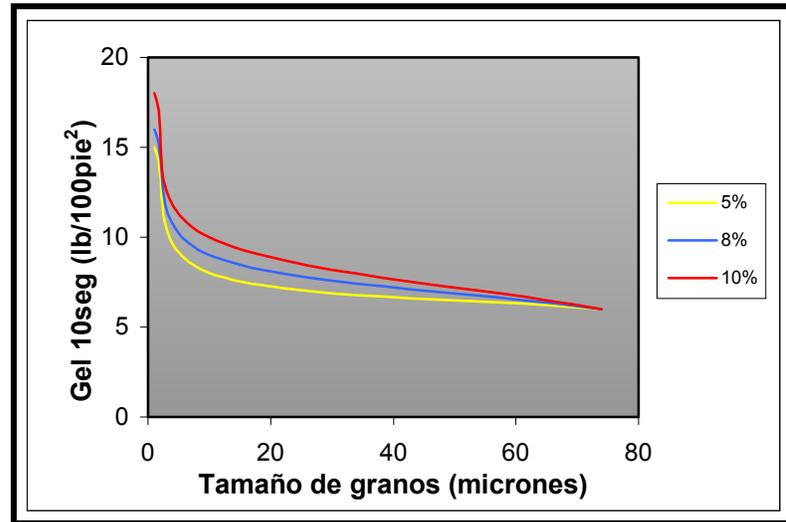


Figura # 4.13 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en sistema agua – gel

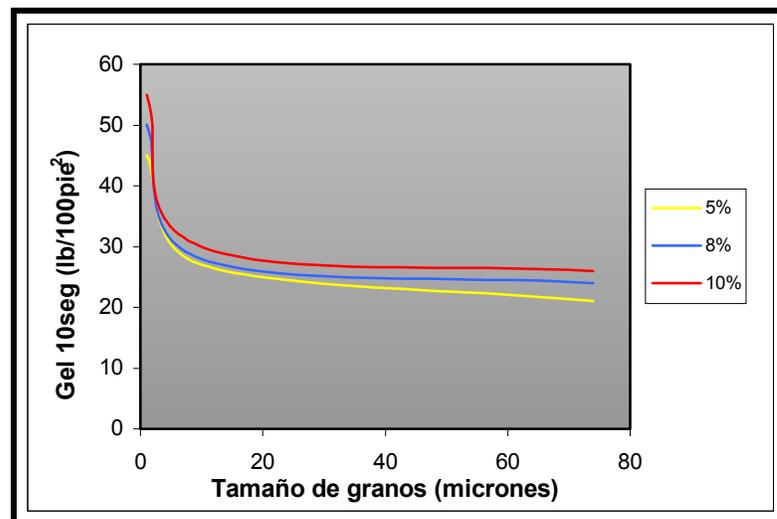


Figura # 4.14 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en sistema agua – gel

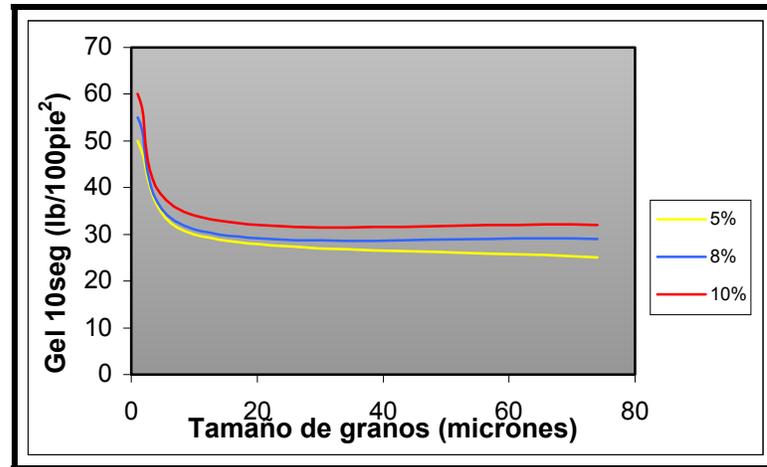


Figura # 4.15 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en sistema agua – gel

Por medio de las gráficas 4.13, 4.14 y 4.15, se observa la influencia del tamaño de granos en la formación de esta estructura, las partículas más pequeñas ayudan a la tixotropía, esto se debe a que poseen mayor superficie de contacto, aunque sea una partícula inerte, por consiguiente se dice que estas si tienen influencia en la formación de la estructura rígida denominada gel. Se observa la misma tendencia en las propiedades de punto cedente y fuerza de gel, esto se debe a que estas propiedades están relacionadas con la capacidad de limpieza de los hoyos que se estén perforando.

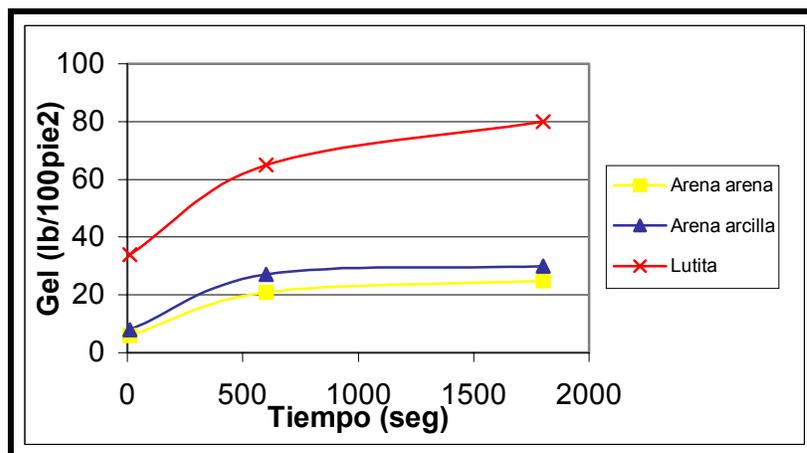


Figura # 4.16 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en sistema agua – gel caso comparativo 5%

En la figura anterior se muestra la influencia más significativa por la lutita, es decir, las partículas no inertes en la formación de gel, aunque también se observa que las inertes también influyen en la formación de estas estructuras en menor rango, y mientras más pequeños sean los sólidos incluidos al sistema mayor será su influencia por eso se dice que la estructura de gel esta directamente relacionado con el tamaño de grano, mientras más pequeño más fácil se forma.

Con todo esto se puede decir que las partículas tamaño coloidales o arcillas son muy influyentes en las propiedades de los lodos de perforación y por consiguiente son a las que más se le debe prestar atención al momento de incluirse en el sistema, pero se debe decir que son las más difíciles de eliminar, por eso se le debe prestar suma importancia para aprender a combatir o aprender a vivir con su presencia.

4.2 Sistema lignosulfonato

4.2.1 Formulación del fluido

Tabla # 4.3 Formulación del Sistema Lignosulfonato

Aditivo	Cantidad (cc)	Masa (lb)
Agua	314,61	314,61
Viscosificante	6	15
Controlador de filtrado	1,33	2
Defloculante	2	3
Controlador de reología	0,59	1
Controlador de pH)	0,47	1
Densificante	25	70
Total	350	406,61

Este sistema presenta una variedad de aditivos con respecto al lodo agua – gel o de iniciación; en su formulación se encuentran diversos agentes que aparte de ayudar a controlar las propiedades del lodo, también pueden ayudar a prevenir una contaminación, como en este caso la inclusión de sólidos al sistema. Hay que recordar que una de las ventajas de este sistema es su buena estabilidad a altas temperaturas con respecto a otros sistemas base agua ⁽¹²⁾, pero su desventaja es, por poseer una elevada capacidad de contaminante no debe usarse en la zona productora. Este lodo es de color marrón oscuro debido a los lignitos incluidos en la formulación del sistema.

4.2.2 Resultados de las pruebas

Tabla # 4.4 Resultados de las pruebas al lodo lignosulfonato antes y después de añadir los aditivos sólidos

Lignosulfonato		Arena (arena)			Arena (arcilla-limo)			Lutita		
Propiedades	Original	5%	8%	10%	5%	8%	10%	5%	8%	10%
Densidad lpg	9,6	9,7	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,7	9,8	9,9
T. prueba °F	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
PH	8,72	8,78	8,82	8,82	8,85	8,87	8,87	8,83	8,85	8,89
L600	43	48	50	53	48	48	53	120	200	250
L300	25	28	29	31	28	28	31	85	146	182
L200	19	22	22	23	24	24	24	69	109	151
L100	12	14	14	15	15	16	16	50	86	115
L6	3	4	4	5	5	7	7	24	37	55
L3	3	3	3	3	4	4	5	22	35	53
Va (cp)	21,5	24	25	26,5	24	24	26,5	60	100	125
Vp (cp)	18	20	21	22	20	20	22	35	54	68
Yp (lb/100p ²)	7	8	8	9	8	8	9	50	92	114
Gel 10 seg	3	4	4	5	4	5	5	20	28	31
Gel 10 min	14	16	17	18	19	20	22	55	66	78
Gel 30 min	21	24	25	27	26	28	31	62	73	95
Filt. 7,5 min	2	2	2	1,5	2,25	2,25	2	1,75	1,5	1,25
Filt 30 min	5	4,2	4	4	4,75	4,5	4,25	3,75	3,5	3

Para proceder a realizar el análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio se debe decir que hay que tomar en cuenta la siguiente leyenda referente al tipo de aditivo sólido utilizado:

- Arena tamaño arena
- Arena tamaño arcilla – limo
- Lutita

4.2.2.1 Comportamiento de la densidad

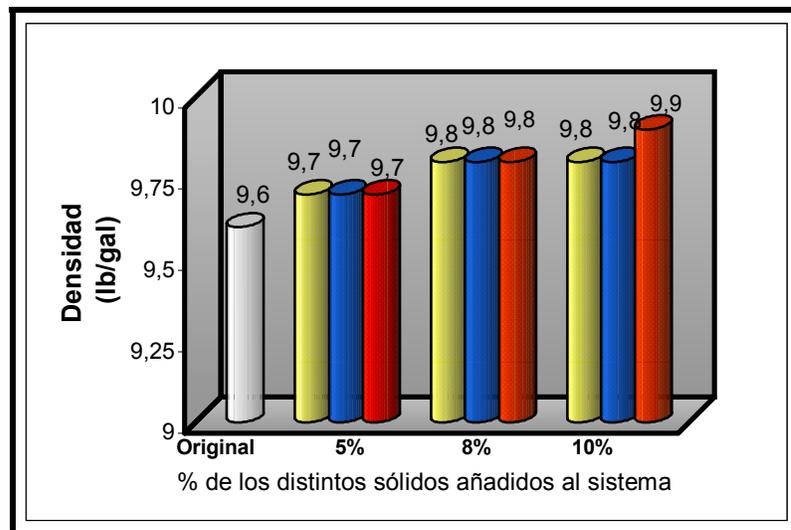


Figura # 4.17 Comportamiento de la densidad en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos

Cuando se menciona esta propiedad, se debe saber que es una de las más importantes, ya que de ella depende el peso de la columna hidrostática de lodo que ingresara a la formación la cual puede llegar a ser fracturada y provocar una pérdida de circulación. También indica si la perforación se realiza sobre balance o bajo balance.

Al observar la figura 4.17, es visible que independientemente del tipo de sólido que ingrese al sistema, la densidad tiende a variar en la misma proporción de acuerdo a la cantidad que

se incluye, es decir, cuando ingresa 10% de arena tamaño arena y el 10% de arena tamaño arcilla se observa el mismo incremento, pero con respecto a la lutita varía en 0,1 lpg, esto puede ser porque las partículas son más pequeñas e influyen más en los resultados, o puede ser por incertidumbre de la balanza, en fin es 0,1 lpg no es tan significativo, porque se sigue la tendencia. En conclusión la densidad varía porque es más masa dentro del mismo volumen, por consiguiente la densidad aumenta ⁽¹¹⁾. Cuando se propone que se incluyan 5, 8 o 10% de sólidos independientemente del tipo, entra la misma masa al sistema, es decir, 5% de lutita es igual al 5% de arena en sus dos tamaños disponibles.

4.2.2.2 Comportamiento del pH.

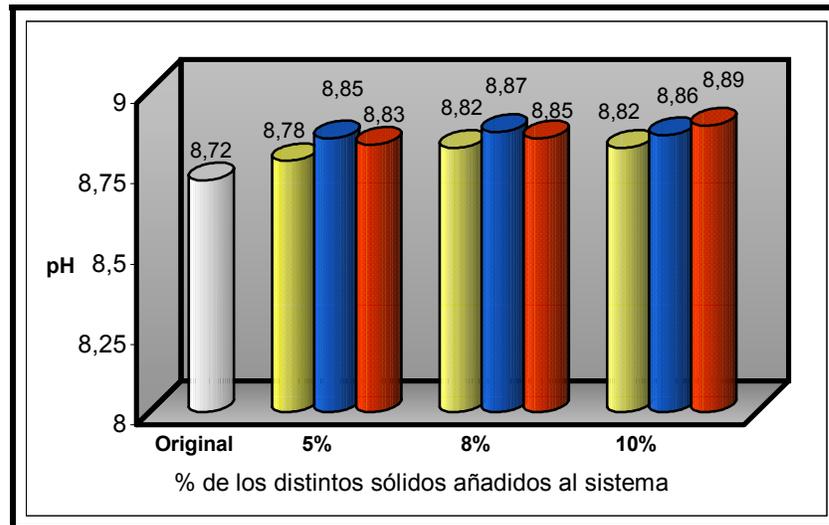


Figura # 4.18 Comportamiento del pH en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos

Esta propiedad es muy buen indicativo de la presencia de contaminantes, pero no para estos tipos de sólidos, porque se ve que no es afectada, ya que no se produce el incremento de los iones hidrógenos en el sistema.

Las variaciones que se observan son por las incertidumbres del aparato, y en fin estas variaciones no son significativas, por eso se asume un pH constante antes y después de incluirse los aditivos sólidos.

Hay que mencionar que el rango aceptable de pH en que debe trabajar este tipo de lodos es de 8,5 a 11⁽¹²⁾.

4.2.2.3 Comportamiento de la viscosidad aparente y plástica.

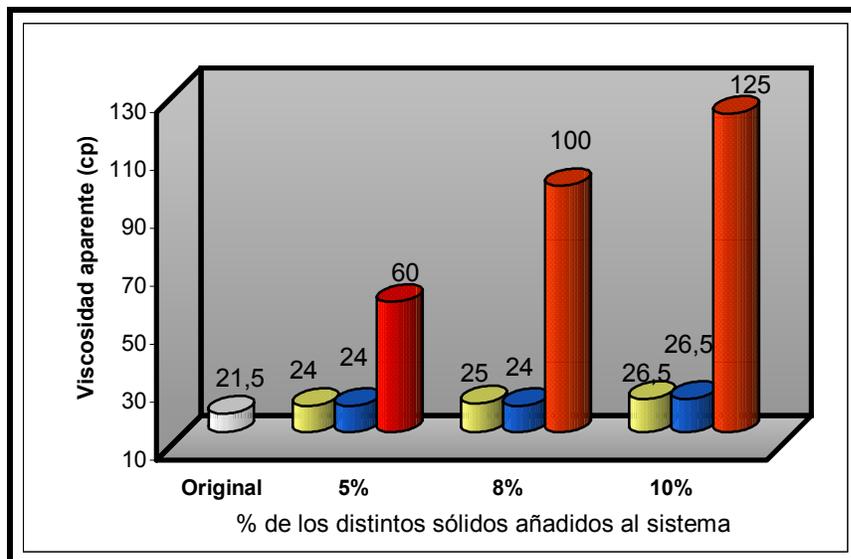


Figura # 4.19 Comportamiento de la viscosidad aparente en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos

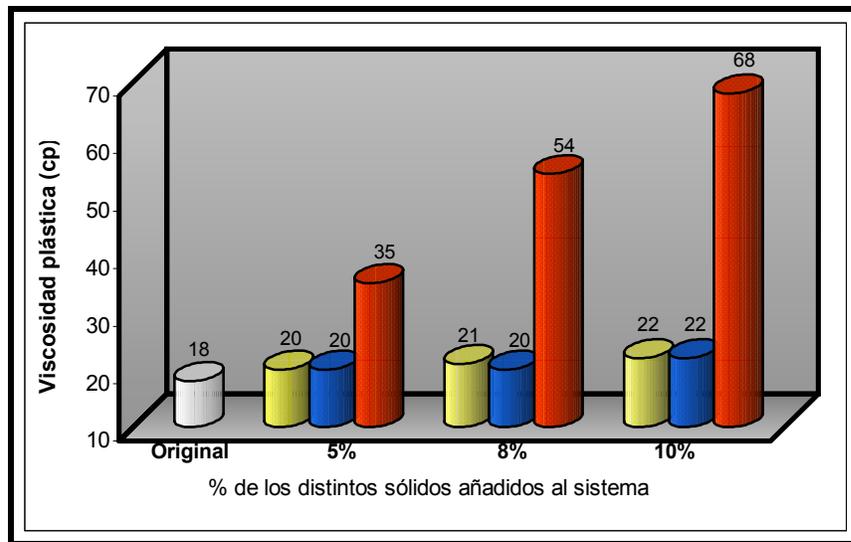


Figura # 4.20 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos

En lo referente a la viscosidad plástica y a la viscosidad aparente, se dice que aumentan a medida que ingresan sólidos a los sistemas ⁽¹⁰⁾, pero cuando son partículas cargadas (lutita) se observa que aumentan mucho más en comparación a las inertes, esto es a causa que las cargas hacen que las partículas se arreglen mucho más unidas e interactúen entre sí, trayendo como consecuencia mayor fricción entre ellas y un incremento desenfrenado de la resistencia a fluir.

Entre estas dos viscosidades se sabe que la aparente es una medida de viscosidad para el fluido si este fuese newtoniano, por consiguiente se le hace más caso al valor de viscosidad plástica, sin dejar de atender la aparente. Se observa que este lodo las partículas de arenas en sus dos tamaños disponibles varían de igual manera las viscosidades, aunque ellas son función del tamaño, esto se debe a la buena escogencia de los granos de la arena.

En fin la inclusión de sólidos hace que las viscosidades aumenten, porque los sólidos que ingresan comienzan a interactuar entre si, incrementando la fricción entre partículas y si estas son cargadas incrementan así en mayor magnitud la resistencia a fluir. Como la viscosidad plástica es función de la fricción entre las partículas sólidas, dependiendo del

tamaño y tipo, es lógico este comportamiento y la tendencia a aumentar a medida que ingresa mayor porcentaje de sólidos ⁽¹¹⁾.

También es importante decir que este lodo soporta mejor la contaminación con respecto al lodo de iniciación ya que todas estas medidas pudieron realizarse a los distintos porcentajes disponibles, esto es causado por la variedad de aditivos incluidos en sus formulaciones.

4.2.2.4 Comportamiento de la pérdida de filtrado

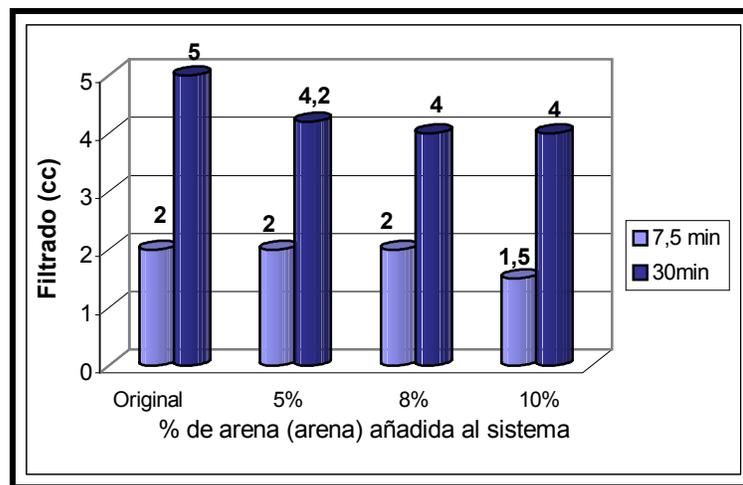


Figura # 4.21 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir arena tamaño arena

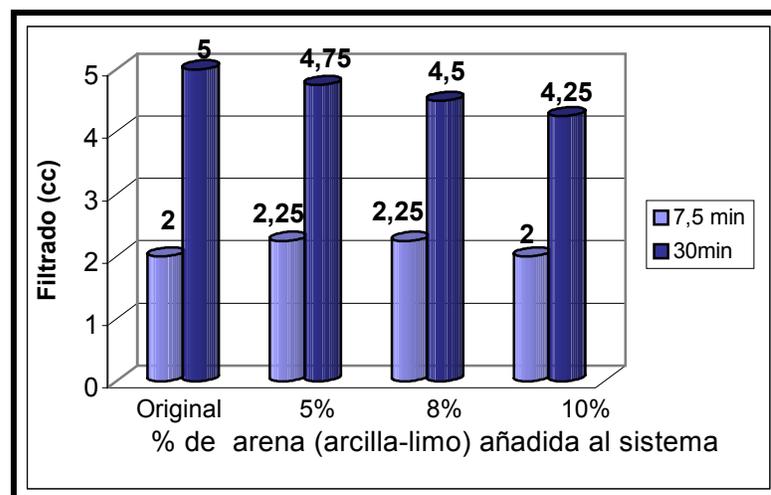


Figura # 4.22 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir arena tamaño arcilla

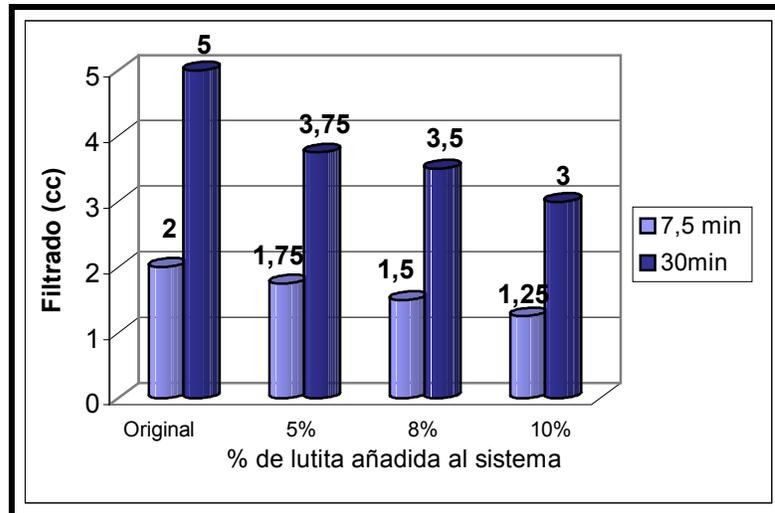


Figura # 4.23 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos lignosulfonato antes y después de añadir lutita

Con respecto a la pérdida de filtrado, este lodo presenta originalmente una buena capacidad controladora de filtrado de 5 cc a los 30 minutos que dura la prueba, esto es una de las principales características de este fluido, presenta poca pérdida de filtrado y este es de color marrón oscuro de allí su alta capacidad contaminante de formaciones.

Con los resultados obtenidos se puede decir que la inclusión de sólidos, ya sea arena o lutita, disminuye el filtrado, algo inusual; esto ocurre gracias a la buena escogencia de los granos que permiten una disminución de la permeabilidad del revoque, y también por que estos sólidos son compresibles lo cual lleva a soportar presiones, permitiendo así un buen arreglo en las paredes del hoyo. Es muy importante mencionar que esto se puede observar porque a medida que aumentan los porcentajes de masa en los lodos preparados se observa que independientemente del sólido incluido, la tendencia es a ir disminuyendo el filtrado, esto es causado por lo dicho anteriormente. La lutita simulada en el laboratorio, presenta un porcentaje de la arena tamaño arcilla – limo por eso su gran capacidad como controlador de filtrado, que lo coloca en 3 cc a 30 minutos. Como conclusión se dice que la inclusión de estos aditivos sólidos se mejora considerablemente esta propiedad, evitando así mayores daños a las formaciones.

4.2.2.5 Comportamiento del punto cedente

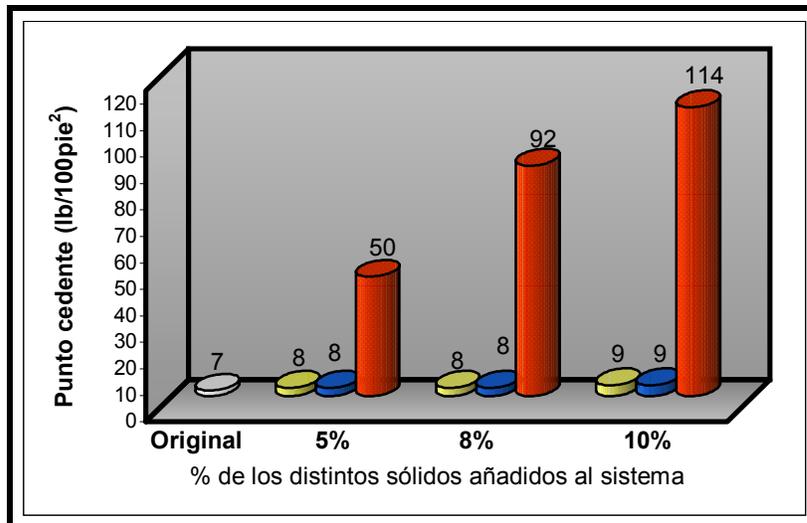


Figura # 4.24 Comportamiento del punto cedente del lodo lignosulfonato antes y después de añadir aditivos sólidos

El punto cedente es la resistencia al flujo causada por la atracción entre partículas ⁽¹²⁾, se observa como aumenta al ingresar lutita en el sistema como se observa en 5% donde el valor sube de 7 a 50 lb/100pie², porque la lutita presenta arcillas reactivas como la montmorilonita, y por consiguiente la atracción entre las partículas aumenta, cuando existe la inclusión de este tipo de sólidos en los lodos merece mucha atención, ya que puede causar gravísimos daños al momento de perforar, por eso se recomienda llevar un buen control de las propiedades del lodo.

En muchas oportunidades se piensa que el punto cedente es afectado solamente por partículas cargadas o no inertes presentes en los sistemas ^(4 y 5) bien sea intencionalmente o no, pero gracias a estas pruebas se observa que las partículas cargadas aumentan la atracción entre las partículas y por eso se elevan abruptamente los valores de punto cedente, pero las inertes varían también esta propiedad, aunque no en la misma magnitud pero si se observa una pequeña variación, que podría ser significativa dependiendo de la formación

que se este perforando, por eso se deben tener en cuenta todos los tipos de sólidos que ingresen al sistema. En estos tipos de lodos se observa que la viscosidad plástica y la cedencia están muy ligadas, al aumentar una la otra crece también, esto es otro punto negativo. Se recuerda que los valores altos de cedencia no necesariamente se traducen en altas limpiezas del hoyo, sino en problemas que pueden ocasionar hasta la pérdida del hoyo que se esta perforando.

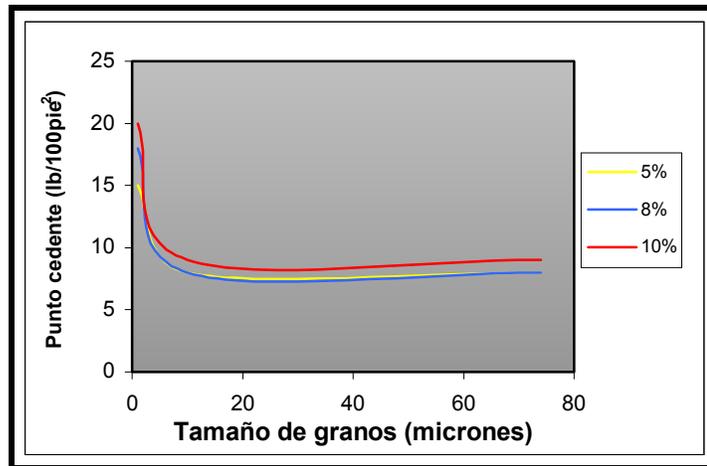


Figura # 4.25 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del lodo lignosulfonato

Esta gráfica fue hecha tomando en cuenta la arena usada como aditivo, se usó en sus dos tamaños arena y arcilla-limo, todo para observar la influencia del tamaño de grano en esta propiedad y con sus respectiva concentración. De esto se infiere que para este lodo la diferencia de tamaño de partículas no es tan influyente, aunque se observa que para las partículas menores a 2 micrones o coloidales se presenta una pequeña variación, y a medida que aumenta la concentración esta se hace más visible, es decir de 5 a 8 y este a 10%, todo esto es causado por el movimiento de las partículas y su interacción entre ellas, y también por el arreglo interno dentro del mismo volumen de lodo de las partículas, ya que una partícula más pequeña posee más superficie para interactuar y trae como consecuencia mayor punto cedente.

4.2.2.6 Comportamiento de la fuerza de gel

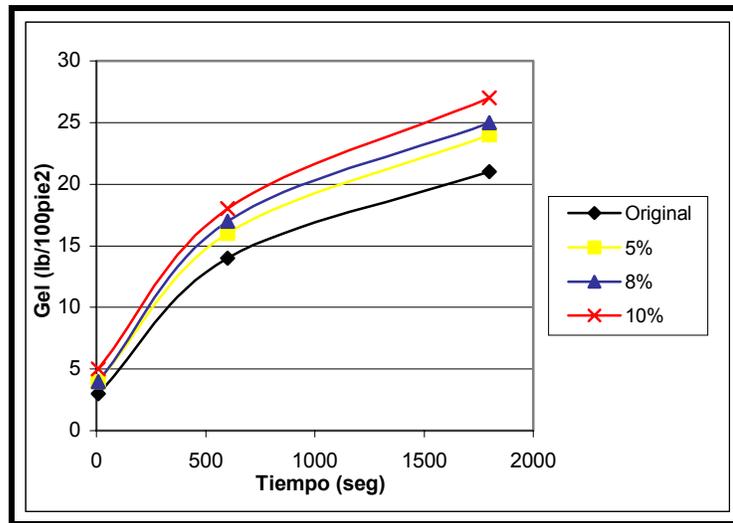


Figura # 4.26 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir arena tamaño arena

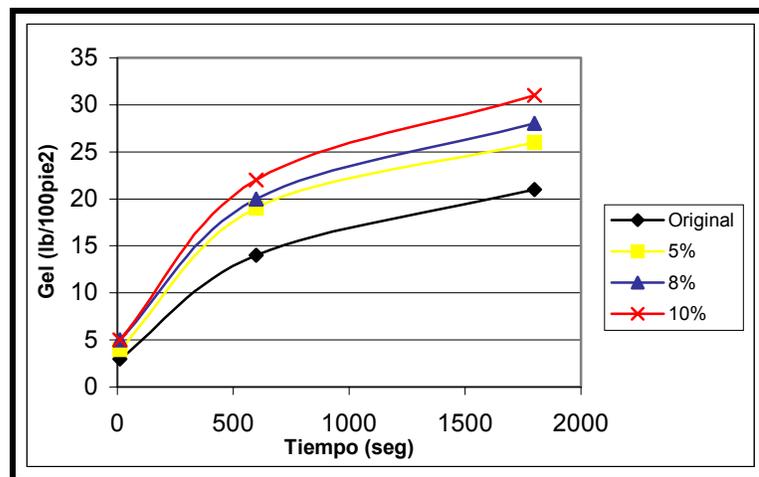


Figura # 4.27 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir arena tamaño arcilla

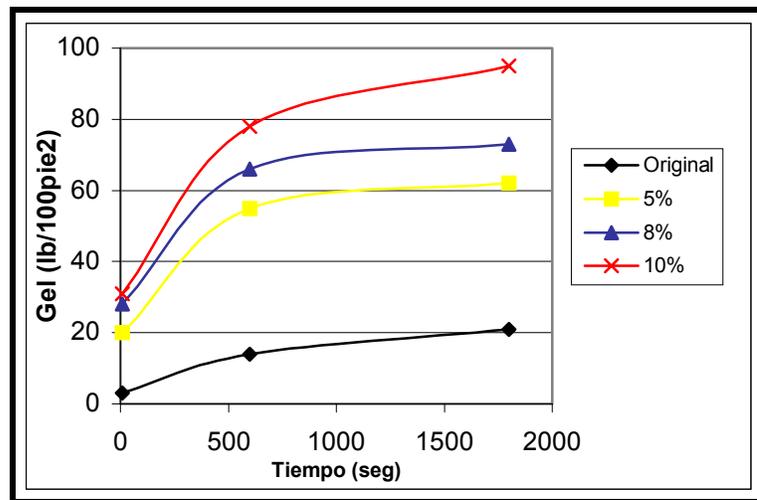


Figura # 4.28 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos lignosulfonatos antes y después de añadir lutita

Al observar las gráficas 4.26, 4.27 y 4.28, acerca de los comportamientos de las estructuras de gel, se puede indicar que este sistema presenta una formación de geles progresivamente antes y después de la adición de sólidos, esto es lo más visible que nos describe esta gráfica.

Se observa que la inclusión de sólidos al sistema incrementa la fuerza de gel independientemente del tipo, forma y tamaño de sólidos. Aunque se demuestra que la lutita eleva los valores, ya que se incrementa la interacción entre las partículas por poseer carga, esto se observa en la gráfica 4.28, en donde la fuerza de gel con un 10% de sólidos casi llega a 100 lb/100pie², un valor excesivamente alto para esta propiedad, que probablemente dañaría las bombas de lodo.

Al tomar en cuenta estos valores y compararlos con el lodo agua – gel, se confirma aún más lo comentado anteriormente que este lodo es mucho más estable a la adición de estos tipos de sólidos, porque a este lodo si se le pudieron medir todas sus propiedades reológicas.

Se observa que el tamaño de granos influye, mientras más pequeño es el grano más aumenta la superficie de interacción, y aunque estos sean inertes o no, se demuestra su influencia, esto podrá ser visualizado mejor por medio de las siguientes figuras.

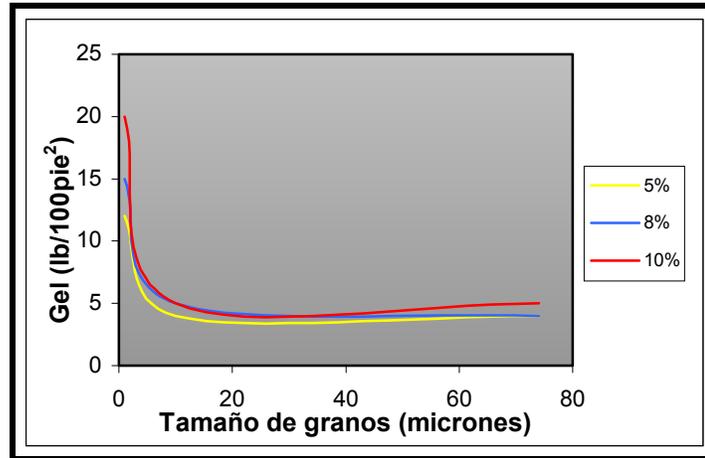


Figura # 4.29 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo lignosulfonato

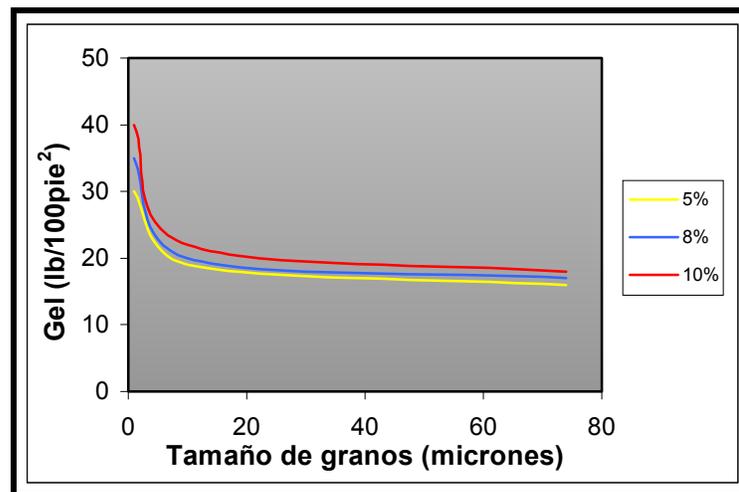


Figura # 4.30 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo lignosulfonato

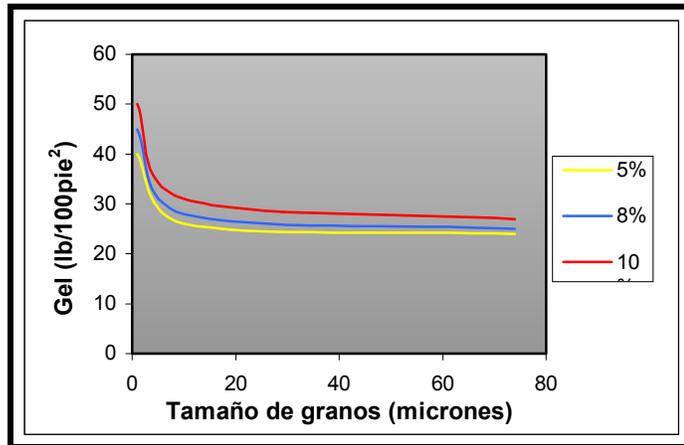


Figura # 4.31 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo lignosulfonato

Antes de iniciar esta discusión se debe decir, que para la realización de estas gráficas se usaron los distintos tipos de tamaños de arenas disponibles para esta investigación.

Se observa la influencia del tamaño de granos en la formación de esta estructura, las partículas más pequeñas incrementan la capacidad tixotrópica de los fluidos, esto se debe a que poseen mayor superficie de contacto, y aunque sean partículas inertes influyen, por consiguiente se dice que estas si tienen influencia en la formación de la estructura rígida denominada gel.

Se observa la misma tendencia en las propiedades de punto cedente y fuerza de gel y en la viscosidad plástica para este lodo, esto se debe a que estas propiedades están muy ligadas la una con la otra y están también relacionadas con la capacidad de limpieza de los hoyos que se estén perforando, pero hay que tener en cuenta que los valores altos en estas propiedades no necesariamente conllevan a una mejor limpieza, sino en la mayoría de los casos a daños irreparables en los hoyos que se estén perforando.

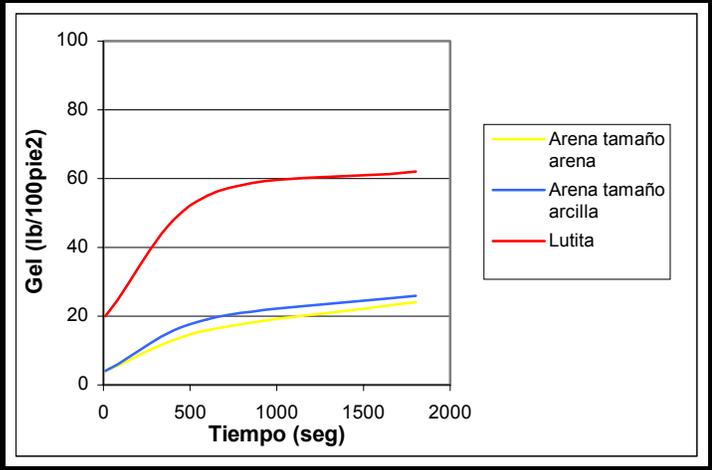


Figura # 4.32 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 5%

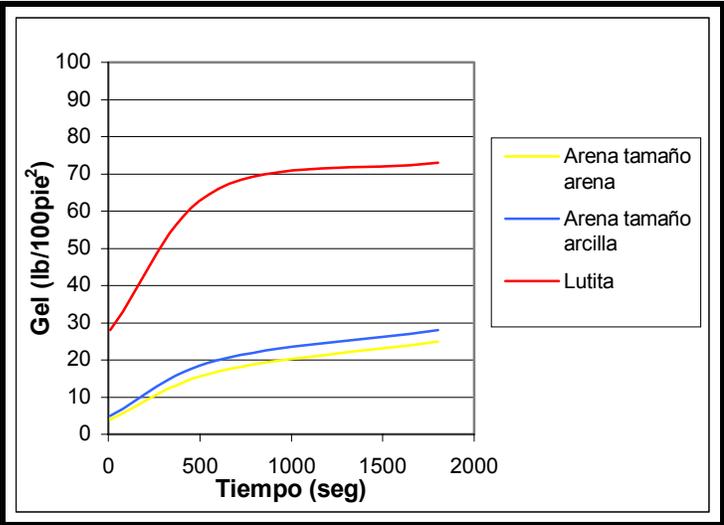


Figura # 4.33 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 8%

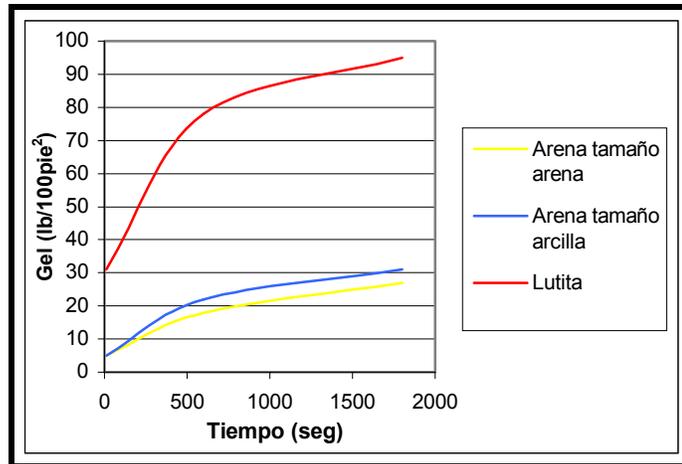


Figura # 4.34 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo lignosulfonato caso 10%

En las figuras anteriores se muestra que la influencia más significativa es causada por la lutita en los distintos porcentajes de peso, es decir, las partículas no inertes influyendo en la formación de gel, todo esto concuerda con lo dicho anteriormente; aunque también se observa que las inertes influyen también en la formación de estas estructuras pero en menor magnitud, y se observa también que mientras más pequeños son los sólidos incluidos al sistema mayor será su influencia, por eso se dice que la estructura de gel esta directamente relacionado con el tamaño de grano. Además se visualiza que a medida que aumenta la concentración de sólidos presentes las propiedades varían significativamente y si son no inertes mucho peor para el lodo, ya que podría flocularlo y ocasionar daños, siempre y cuando el lodo no sea capaz de soportar esas variaciones.

4.3 Sistema Polimérico Flo - pro™

4.3.1 Formulación del fluido

Tabla # 4.5 Formulación del Sistema Polimérico Flo - pro™

Aditivo	Cantidad (cc)	Masa (lb)
Agua	308,05	308,05
Viscosificante	1,066	1,6
Inhibidor de arcillas	2,487	5
Controlador de filtrado	1,33	2
Densificante	36,57	102,4
Controlador de pH	0,5	1,065
Total	350	420,115

Este sistema presenta una variedad de aditivos que demuestran que su uso con respecto al lodo agua – gel o de iniciación puede ser variable; en su formulación se encuentran diversos agentes que aparte de ayudar un poco más a controlar las propiedades del lodo, también pueden ayudar a prevenir una contaminación, como en este caso la inclusión de sólidos al sistema. Estos tipos de lodos son de reología inversa, es decir, punto cedente mayor que la viscosidad plástica, esta es la característica principal en los lodos que presentan alta capacidad de limpieza, su uso es variado, pero es muy característico en pozos inclinados y horizontales, donde se requiere buen nivel de limpieza del hoyo y remoción de los ripsos a la superficie.

Hay que recordar que una de las desventajas de este sistema es inestabilidad a altas temperaturas con respecto a otros sistemas base agua, solamente resisten hasta un máximo de 200 °F.

4.3.2 Resultados de las pruebas

Tabla # 4.6 Resultados de las pruebas al lodo Polimérico antes y después de añadir los aditivos sólidos

Polimérico		Arena (arena)			Arena (arcilla-limo)			Lutita simulada		
Propiedades	Original	5%	8%	10%	5%	8%	10%	5%	8%	10%
Densidad lpg	10	10,1	10,3	10,4	10,1	10,3	10,4	10,3	10,4	10,5
T. prueba °F	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
PH	9,35	9,37	9,39	9,39	9,40	9,47	9,40	9,17	9,18	9,20
L600	50	57	59	62	57	59	60	92	108	131
L300	42	49	50	52	47	48	49	79	95	117
L200	40	46	46	47	45	45	47	74	88	108
L100	35	39	40	40	37	39	40	59	75	90
L6	21	24	24	25	22	23	24	34	42	54
L3	18	21	21	22	20	21	21	30	39	50
Va (cp)	25	28,5	29,5	31	28,5	29,5	30	46	54	65,5
Vp (cp)	8	8	9	10	10	11	11	13	13	14
Yp (lb/100p ²)	34	41	41	42	37	37	38	66	82	103
Gel 10 seg	12	13	13	14	12	14	14	14	15	17
Gel 10 min	17	22	23	23	20	21	22	25	28	32
Gel 30 min	18	24	24	25	23	24	24	27	33	38
Filt. 7,5 min	3,5	3,5	3,5	4	3,75	4	4	7	5,5	4
Filt 30 min	7,5	9,5	9,5	10	9,5	10	10	13,5	11	9

A este fluido de perforación luego de observar que era el más estable a la contaminación, no se floculó, y las propiedades con respecto a los otros dos sistemas no eran alteradas en la misma magnitud, se le procedió a realizar pruebas especiales como el uso de una lutita proveniente del estado Falcón. Para proceder a realizar el análisis de los resultados de las pruebas de laboratorio se debe considerar la siguiente leyenda referente al tipo de aditivo sólido utilizado:

- Arena tamaño arena
- Arena tamaño arcilla – limo
- Lutita simulada en laboratorio (lutita 1)
- Lutita del Estado Falcón (lutita 2)

Tabla # 4.7 Resultados de las pruebas al lodo Polimérico antes y después de añadir lutita del Edo. Falcón

Polimérico		Lutita 2		
Propiedades	Original	5%	8%	10%
Densidad lpg	10	10,2	10,4	10,5
T. prueba °F	120	120	120	120
pH	9,35	9,4	9,36	9,39
L600	50	68	91	110
L300	42	56	78	96
L200	40	51	73	90
L100	35	45	64	83
L6	21	28	42	59
L3	18	26	40	56
Va (cp)	25	34	45,5	55
Vp (cp)	8	12	13	14
Yp (lb/100p ²)	34	44	65	82
Gel 10 seg	12	14	15	17
Gel 10 min	17	23	25	29
Gel 30 min	18	26	28	34
Filt. 7,5 min	3,5	4,5	4,5	4
Filt 30 min	7,5	10,5	10	9,5

4.3.2.1 Comportamiento de la densidad

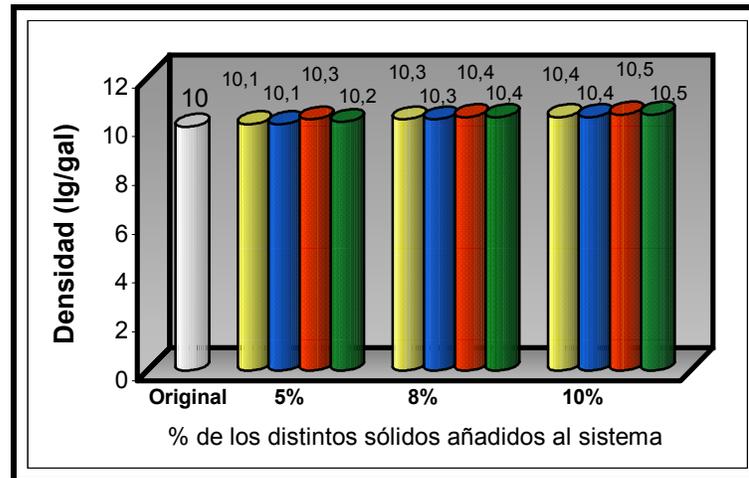


Figura # 4.35 Comportamiento de la densidad en lodos Polimérico antes y después de añadir aditivos sólidos

Cuando se analiza esta propiedad, se debe tomar en consideración que es una de las más importantes, ya que de ella depende el peso de la columna hidrostática de lodo que ingresara a la formación ⁽¹²⁾, la cual si es muy pesada puede llegar a fracturar y provocar una pérdida de circulación. También indica si la perforación se realiza sobre balance o bajo balance.

La figura 4.35 muestra que independientemente del tipo de sólido que ingrese al sistema, la densidad tiende a variar en la misma proporción de acuerdo a la cantidad que se incluya.

En conclusión la densidad varía porque es más masa dentro de un mismo volumen, ya que cuando decimos que se incluyen 5, 8 o 10% de sólidos independientemente del tipo, entra la misma masa al sistema, es decir, 5% de lutita es igual al 5% de arena en sus dos tamaños disponibles.

4.3.2.2 Comportamiento del pH.

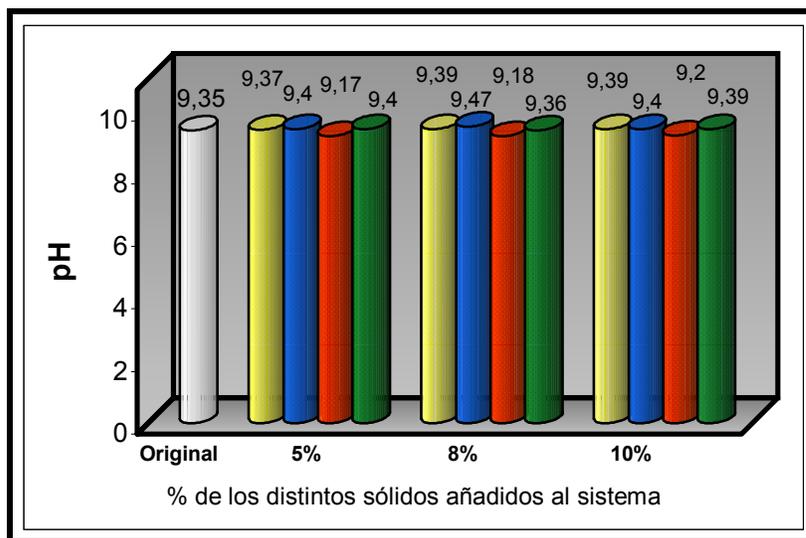


Figura 4.36 Comportamiento del pH en lodos Polimérico antes y después de añadir aditivos sólidos

Esta propiedad es un buen indicativo de presencia de contaminantes, pero no para estos tipos de sólidos, porque el pH no es afectado, no se produce el incremento de los iones hidrógenos en el sistema.

Las variaciones que se observan son por las incertidumbres del equipo de medición de pH, por lo tanto estas variaciones no son significativas, por eso se asume un pH constante antes y después de incluirse los aditivos sólidos.

El pH para este tipo de lodos debe estar alrededor de 9,5 para evitar las degradaciones de los polímeros.

4.3.2.3 Comportamiento de la viscosidad aparente y plástica

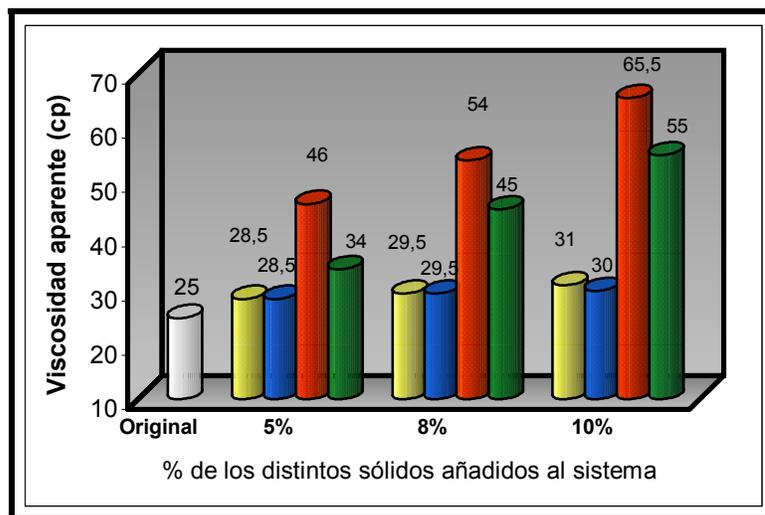


Figura # 4.37 Comportamiento de la viscosidad aparente en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos

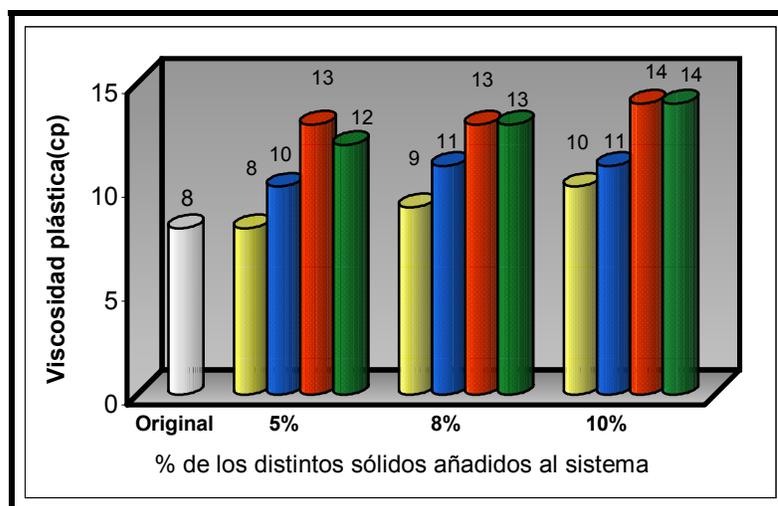


Figura # 4.38 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos

En lo referente a la viscosidad plástica y a la viscosidad aparente, se afirman que aumentan a medida que ingresan sólidos a los sistemas ^(10 y 12), pero cuando se trata de la inclusión de partículas cargadas (lutita) se observa que aumentan mucho más en comparación a las inertes, esto es a causa que las cargas hacen que las partículas se arreglen mucho más unidas e interactúen entre sí, lo cual trae como consecuencia mayor fricción entre ellas y un incremento desenfrenado de la resistencia a fluir. Entre estas dos viscosidades se sabe que la aparente es una medida de viscosidad para el fluido si este fuese newtoniano, por consiguiente se le hace más caso al valor de viscosidad plástica, sin dejar de atender la aparente.

Se observa que en este lodo las partículas de arenas en sus dos tamaños disponibles varían casi de igual manera las viscosidades, aunque ellas son función del tamaño y forma del grano, esto se debe a la buena escogencia de los granos de la arena.

La inclusión de sólidos hace que las viscosidades aumenten, porque los sólidos que ingresan comienzan a interactuar entre ellos produciendo fricción y si son cargadas más aún, incrementan la resistencia a fluir. Como la viscosidad plástica es función de la fricción entre las partículas sólidas, dependiendo del tamaño y tipo, este comportamiento es lógico y la tendencia a aumentar a medida que ingresa mayor porcentaje de sólidos. Además se observa que en la lutita simulada los sólidos son más pequeños y producen variaciones más altas, causada por la mayor presencia de superficies de contacto para interactuar, es válida esta comparación por ser partículas muy influyentes en las viscosidades de los fluidos.

Es importante decir que este lodo soporta mejor la contaminación con respecto al lodo de iniciación ya que todas estas medidas pudieron realizarse a los distintos porcentajes disponibles, esto es causado por la variedad de aditivos incluidos en sus formulaciones y la capacidad de encapsular los ripios por eso su alta capacidad de limpieza, no deja que los sólidos interactúen entre sí, con la misma intensidad que otro tipo de fluido base agua.

4.3.2.4 Comportamiento de la pérdida de filtrado

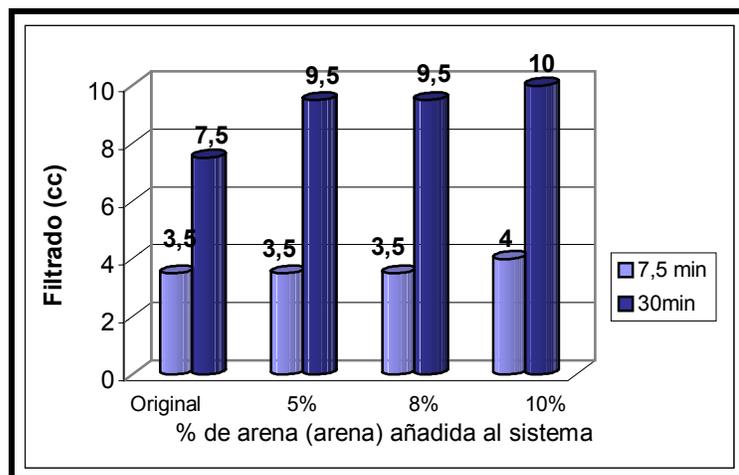


Figura # 4.39 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arena

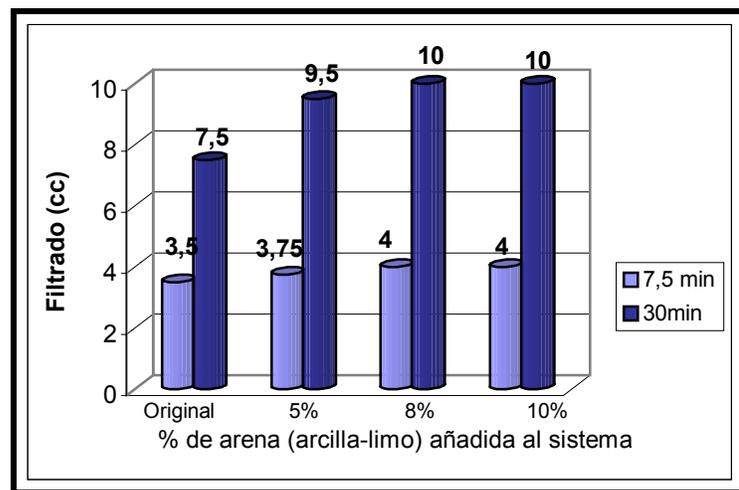


Figura # 4.40 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arcilla - limo

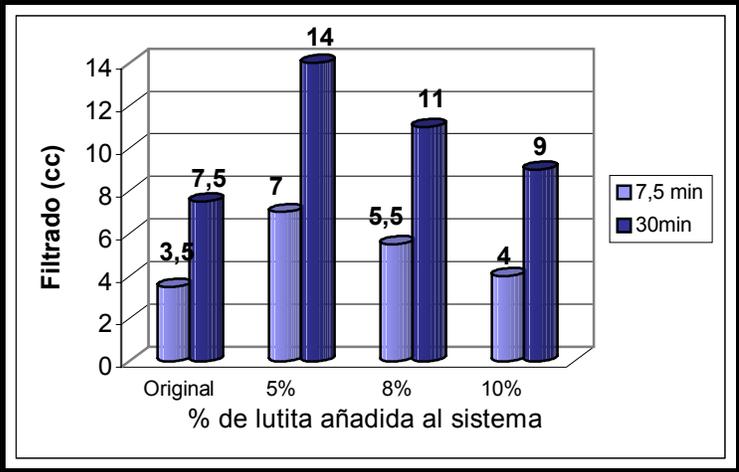


Figura # 4.41 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita simulada

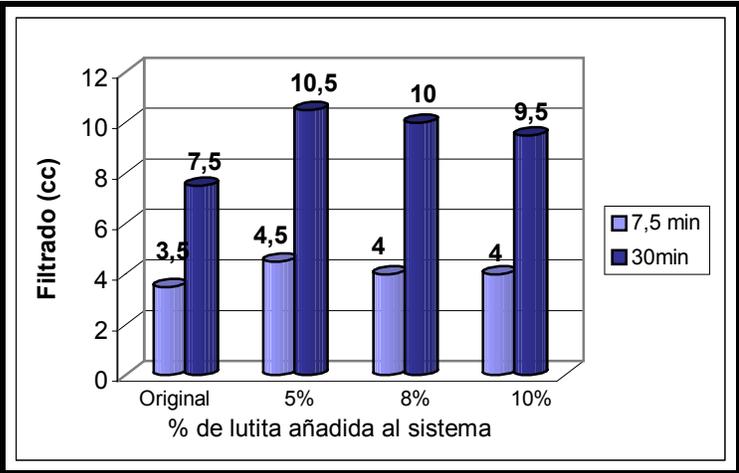


Figura # 4.42 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita Estado Falcón

Con respecto a la pérdida de filtrado, este lodo presenta originalmente una buena capacidad controladora de filtrado de 7,5 cc a los 30 minutos que dura la prueba, esto es una de las características de este fluido junto con los pequeños espesores de los revoques que se forman.

Con los resultados obtenidos se infiere que la inclusión de sólidos inertes, figura 4.39 y 4.40, el filtrado aumenta, esto era de esperarse porque la inclusión de sólidos hace que la permeabilidad del revoque aumente permitiendo así el paso de filtrado a la formación. Aunque todavía se mantiene en valores accesibles de lodos utilizables en el campo. Este lodo con respecto al lignosulfonato presenta menor capacidad de controlar el filtrado, esto es porque el lignosulfonato es usado especialmente para eso, entre otras cosas.

En referencia a las lutitas, esta también aumenta el filtrado por lo comentado anteriormente, aunque como comportamiento diferente se observa que a medida que aumenta la concentración de sólidos su tendencia es a disminuirlo, esto es por la buena escogencia de los sólidos añadidos, evitando así mayores daños a las formaciones.

4.3.2.5 Comportamiento del punto cedente

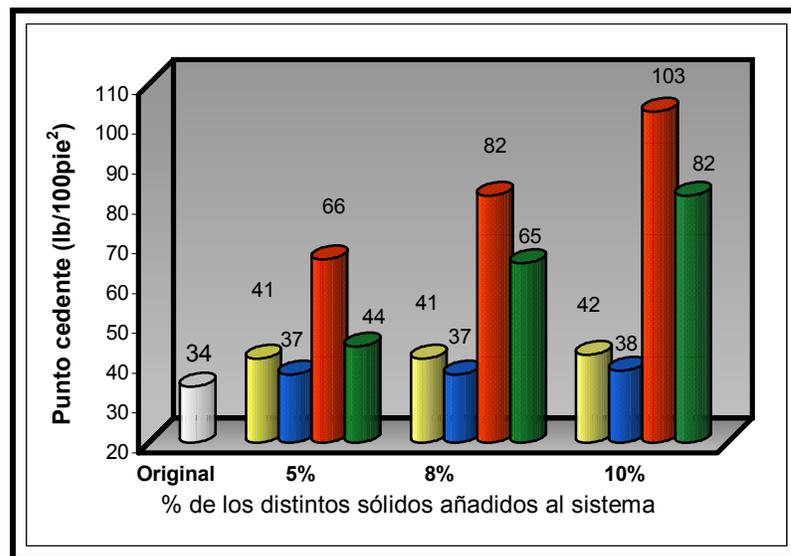


Figura # 4.43 Comportamiento del punto cedente en lodos Poliméricos antes y después de añadir aditivos sólidos

Como definición, el punto cedente es la resistencia al flujo causada por la atracción entre partículas ^(4 y 5), esto se observa en la figura 4.43 como aumenta al ingresar lutita en el sistema como se observa en 5% donde el valor sube de 34 a 66 lb/100pie², porque la lutita

presenta arcillas reactivas como la montmorilonita, y por consiguiente la atracción entre las partículas aumenta, cuando existe la inclusión de este tipo de sólidos en los lodos merece mucha atención, ya que puede causar gravísimos daños al momento de perforar, por eso se propone llevar un buen control de las propiedades del lodo.

Con respecto a la lutita del Estado Falcón esta afecta considerablemente esta propiedad, pero a causa de que sus granos son un poco más grandes aunque aún en el rango de arcilla – limo, y porque en su contenido la presencia de montmorilonita es un poco menor, por eso su influencia es más pequeña pero significativa, como por ejemplo al 5% donde el valor sube de 34 a 44 lb/100pie²

En muchas oportunidades se piensa que el punto cedente es afectado solamente por partículas cargadas o no inertes presentes en los sistemas ^(4 y 5) bien sea intencionalmente o no; pero gracias a estas pruebas se observa que las cargas aumentan la atracción entre las partículas y por eso se elevan los valores de punto cedente, pero las inertes varían también esta propiedad, aunque no en la misma magnitud, que podría ser significativa dependiendo de la formación que se este perforando, por eso se deben tener en cuenta todos los tipos de sólidos que ingresen al sistema.

En estos tipos de lodos se observa que la viscosidad plástica y la cedencia están muy ligadas, por ser de reología inversa (punto cedente mayor que la viscosidad plástica), esto se resume en alta capacidad de limpieza, tomando en consideración que valores excesivos en el punto cedente pueden ocasionar daños a las formaciones.

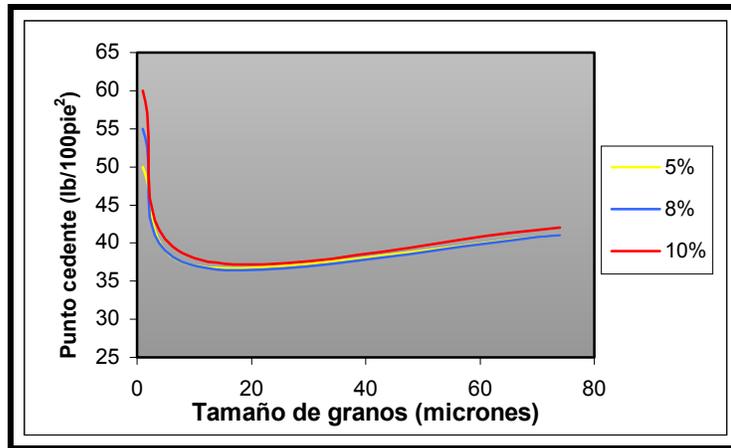


Figura # 4.44 Influencia del tamaño de partículas utilizando la arena, sobre el punto cedente del lodo Polimérico

Esta gráfica fue realizada tomando en consideración la arena usada como aditivo, se empleó en sus dos tamaños arena y arcilla-limo, todo para observar la influencia del tamaño de grano en esta propiedad y con sus respectivas concentraciones.

De lo anterior se infiere que para este lodo la diferencia de tamaño de partículas no es tan influyente, aunque se observa que para las partículas menores a 2 micrones o coloidales se presenta una pequeña variación, y a medida que aumenta la concentración esta se hace más visible, es decir de 5 a 8 y este a 10%, todo esto es causado por el movimiento de las partículas que es desordenado y su interacción entre ellas, y también por el arreglo interno de las partículas dentro del mismo volumen de lodo, ya que una partícula más pequeña posee más superficie para interactuar y trae como consecuencia incrementos en el punto cedente.

4.3.2.6 Comportamiento de la fuerza de gel

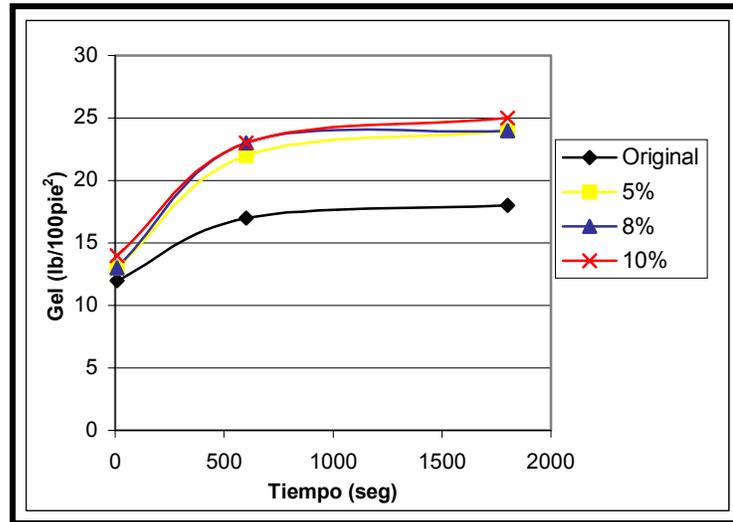


Figura # 4.45 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arena

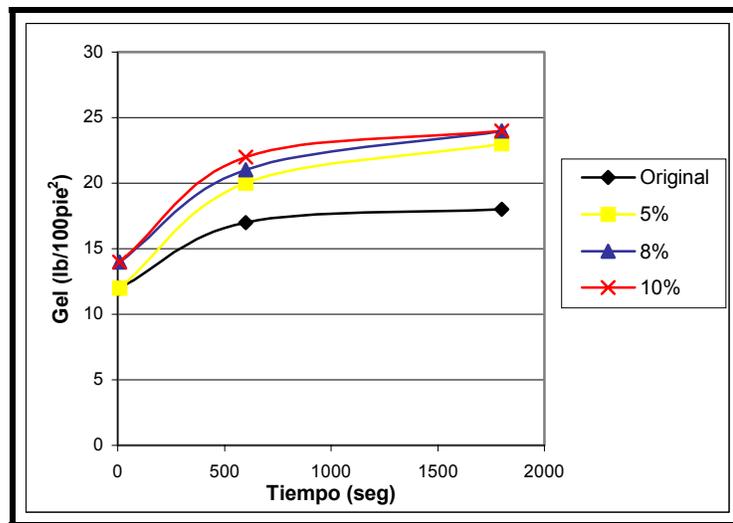


Figura # 4.46 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir arena tamaño arcilla - limo

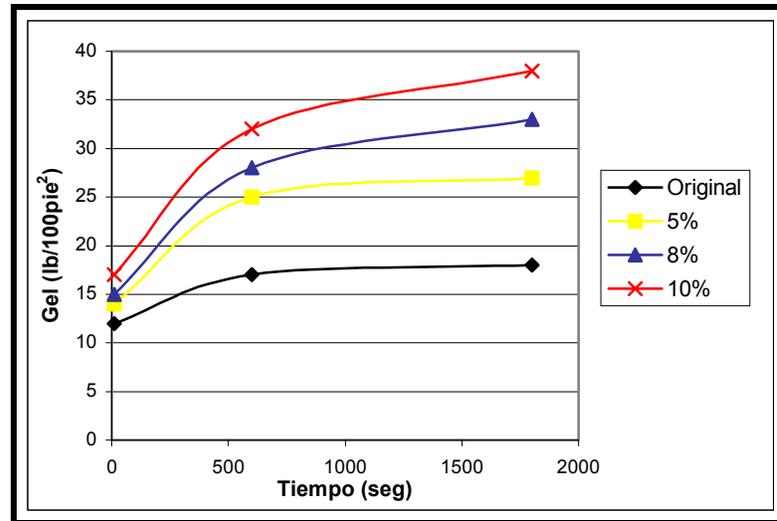


Figura # 4.47 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita simulada

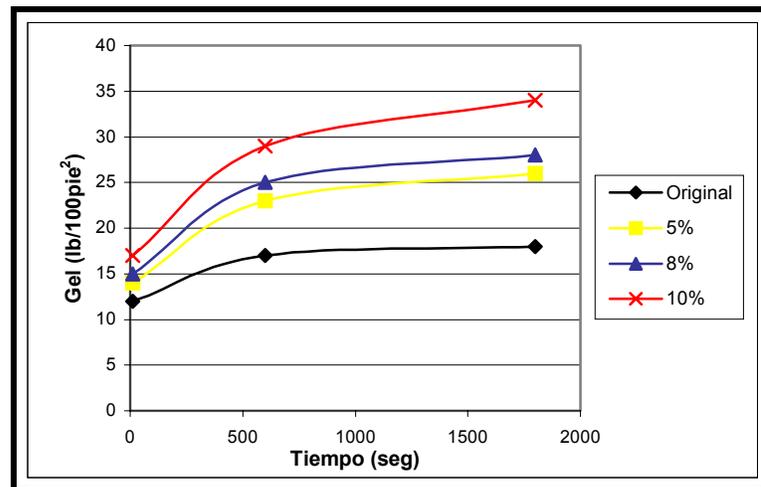


Figura # 4.48 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos antes y después de añadir lutita del Estado Falcón

Al observar las gráficas anteriores acerca de los comportamientos de las estructuras de gel, se puede mencionar que este sistema polimérico presenta una formación de geles progresivamente antes y después de la adición de sólidos, esto es lo más visible que nos

describe esta gráfica. La característica de que estos geles sean progresivos, es que la formación de estas estructuras esta ligada con la tixotropía que no es más nada que la capacidad que poseen los fluidos de perforación en formar geles a condiciones estáticas, con una dependencia del tiempo, por consiguiente a mayor tiempo mayor gel; aunque es importante decir que llega un momento que ya el valor es constante y no se forma más rígida la estructura aunque pase más tiempo, y ese es el valor máximo de gel que puede presentar un lodo a esas condiciones.

Se observa que la inclusión de sólidos al sistema incrementa la fuerza de gel independientemente del tipo, forma y tamaño de sólidos. Aunque se demuestra que la lutita ya sea la simulada o la del Estado Falcón eleva los valores, ya que incrementa la interacción entre las partículas por poseer carga, esto se observa en las gráficas 4.47 y 4.48, en donde la fuerza de gel con un 10% de sólidos casi llega a 40 lb/100pie² y a 35lb/100pie² respectivamente, valores un poco altos para esta propiedad, se observa además con respecto a los otros dos sistemas que este tolera más la inclusión de esos aditivos porque no incrementa abruptamente los valores, aunque los varía significativamente, todo esto causado por su capacidad encapsulante de los sólidos añadidos en las labores de perforación. Se muestra que el tamaño de granos influye, mientras más pequeño es el grano más aumenta la superficie de interacción, y aunque estos sean inertes o no, se demuestra su influencia, esto es visualizado mejor por medio de las siguientes figuras.

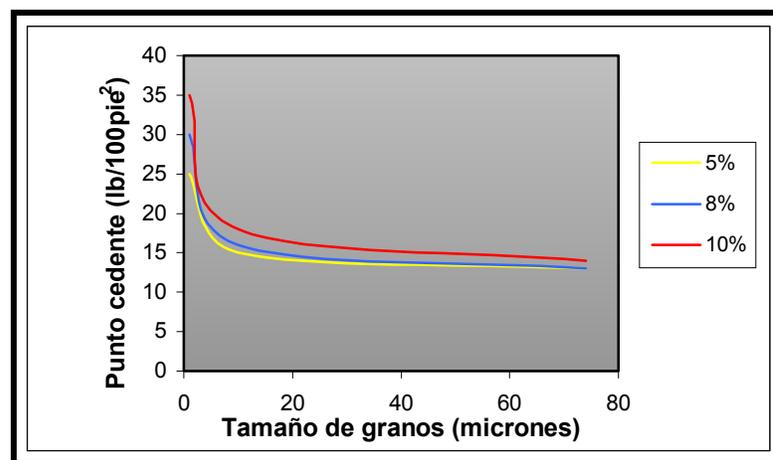


Figura # 4.49 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo Polimérico

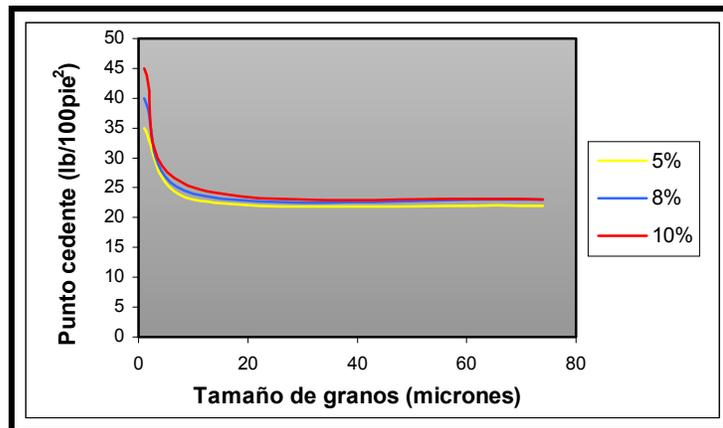


Figura # 4.50 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo Polimérico

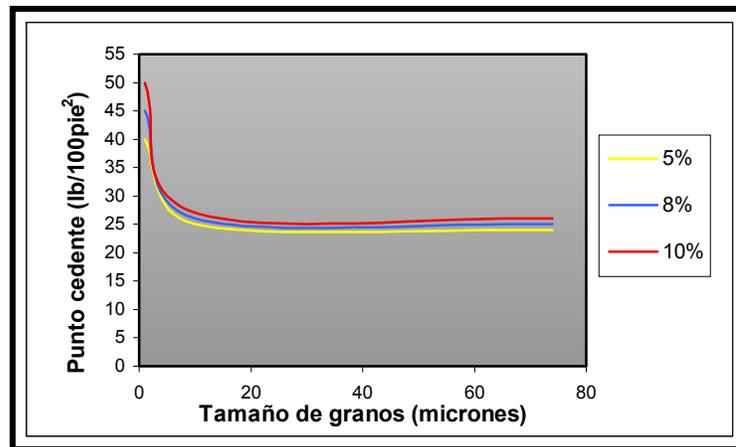


Figura # 4.51 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo Polimérico

Antes de iniciar la próxima discusión se debe indicar, que para la realización de estas gráficas se usaron los resultados de los distintos tipos de tamaños de arenas disponibles para esta investigación, y luego de diversas pruebas con varios tamaños se llegó a la siguiente conclusión.

Se observa que el tamaño de granos influye en la formación de estas estructuras rígidas, las partículas más pequeñas incrementan la capacidad tixotrópica de los fluidos, esto se debe a que poseen mayor superficie de contacto, y aunque sean partículas inertes influyen, por consiguiente se dice que estas si tienen influencia en la formación de la estructura rígida denominada gel.

Se presenta la misma tendencia en las propiedades de punto cedente y fuerza de gel para este lodo, esto se debe a que estas propiedades están muy relacionadas la una con la otra y tienen que ver también con la capacidad de limpieza de los hoyos que se estén perforando, y además este lodo es de reología inversa y por consiguiente estas propiedades están íntimamente asociadas, pero no hay que olvidar que los valores altos en estas propiedades no necesariamente conllevan a una mejor limpieza, sino que pudiesen traer problemas de perforación.

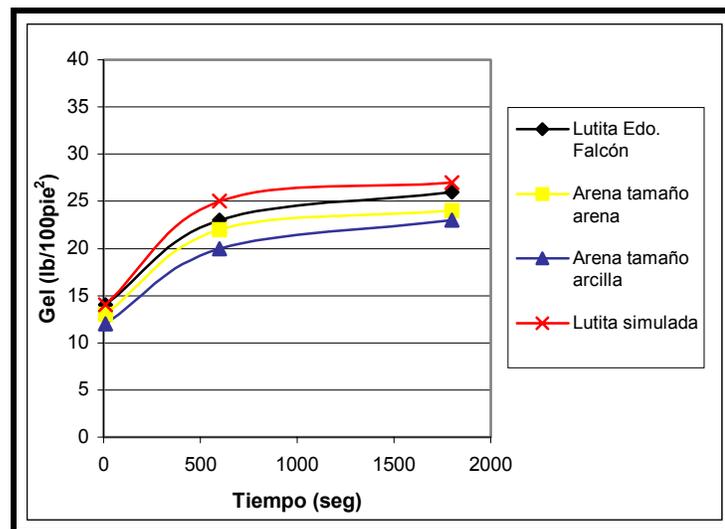


Figura # 4.52 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 5%

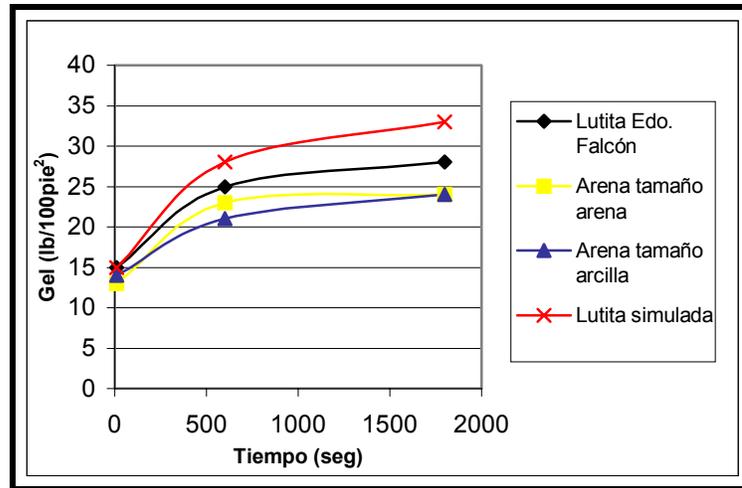


Figura # 4.53 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 8%

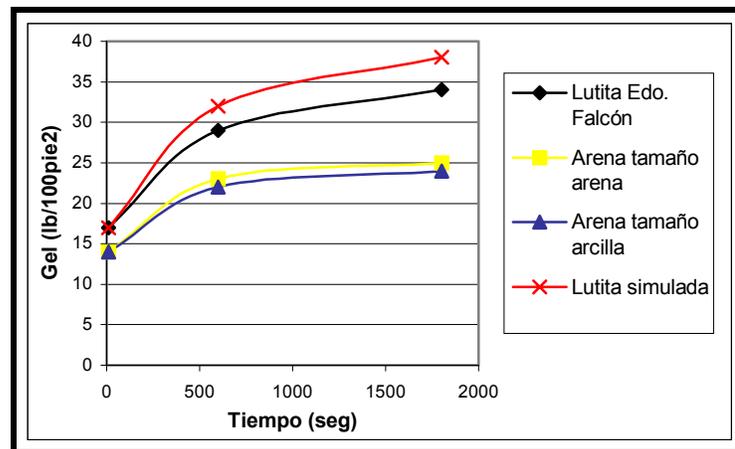


Figura # 4.54 Influencia del tipo de partículas en la formación de la estructura de gel en lodo Polimérico caso 10%

En las figuras 4.52, 4.53 y 4.54, se muestra que la influencia más significativa es causada por la lutita simulada en los distintos porcentajes de peso, es decir, las partículas no inertes influyendo en la formación de gel, ya que esta lutita presenta más cantidad de arcillas reactivas y además en segundo lugar, la lutita del Estado Falcón por tener menor proporción de montmorilonita y sus granos son un poco más grandes. Todo esto concuerda con lo mencionado anteriormente; aunque también se observa que las inertes influyen

también en la formación de estas estructuras pero en menor magnitud, y se observa también que la arena influye casi igual con respecto a sus tamaños disponibles, esto es porque el lodo encapsula y no deja que los sólidos actúen. Además se visualiza que a medida que aumenta la concentración de sólidos presentes las propiedades varían significativamente y si son no inertes mucho peor para el lodo, ya que podría flocularlo y ocasionar daños, aunque se observa la capacidad de soportar muchos más sólidos en su formulación

4.3.3 Resultados de las pruebas del lodo envejecido

Tabla # 4.8 Resultados de las pruebas antes y después de añadir los aditivos sólidos al lodo Polimérico envejecido

Polimérico		Arena (arcilla-limo)			Arena (arena)			Lutita simulada		
Propiedades	Original	5%	8%	10%	5%	8%	10%	5%	8%	10%
Densidad lpg	9,3	9,3	9,4	9,5	9,3	9,4	9,5	9,5	9,7	9,8
T. prueba °F	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
PH	8,54	8,54	8,51	8,52	8,57	8,47	8,51	8,54	8,56	8,56
L600	51	46	54	57	42	46	48	76	107	139
L300	42	39	44	46	36	39	40	61	90	114
L200	40	35	40	43	34	36	38	56	85	106
L100	34	30	35	36	30	31	34	48	71	102
L6	20	18	19	20	15	16	19	28	41	53
L3	19	15	17	18	13	13	17	26	38	51
Va (cp)	25,5	23	27	28,5	21	23	24	38	52,5	69,5
Vp (cp)	9	7	10	11	6	7	8	15	17	25
Yp (lb/100p ²)	33	32	34	35	30	32	32	46	73	89
Gel 10 seg	13	14	14	15	11	11	12	15	17	19
Gel 10 min	20	18	19	20	12	13	14	24	31	36
Gel 30 min	22	20	20	22	14	15	16	27	37	43
Filt. 7,5 min	5,5	5	6	8	4,5	4	4	7	4,5	4
Filt 30 min	12	10	12,5	15	9,5	9	9	14,5	9,75	9

Hay que destacar que las pruebas de envejecimiento dinámico para los fluidos base agua deben hacerse a una temperatura de 200 °F y 100lpc, pero al realizarlas se observó degradación del polímero, por consiguiente estas pruebas se hicieron a una temperatura de

175 °F y a 100lpc de presión. Además a la formulación inicial se le tuvo que agregar 1 cc más de soda cáustica para mantener el pH en un nivel aceptable, ya que el envejecimiento puede provocar alteraciones en las propiedades.

En lo referente a estas pruebas se decidió usar el sistema polimérico, por su alta estabilidad frente a estos aditivos, y por consiguiente a nivel de laboratorio pueden ser más fáciles las mediciones de sus propiedades y así cumplir los objetivos de este trabajo.

En la tabla anexa 4.8 se presentan las pocas variaciones que muestran las propiedades del lodo, y como es nuestro interés se le tomara más consideración para su análisis el punto cedente y la fuerza de gel. Esta prueba da datos más confiables del comportamiento del lodo en una perforación ya que asume: la presión, el movimiento y la temperatura, estos factores afectan al lodo en las perforaciones diarias.

4.3.3.1 Comportamiento del punto cedente después de envejecer

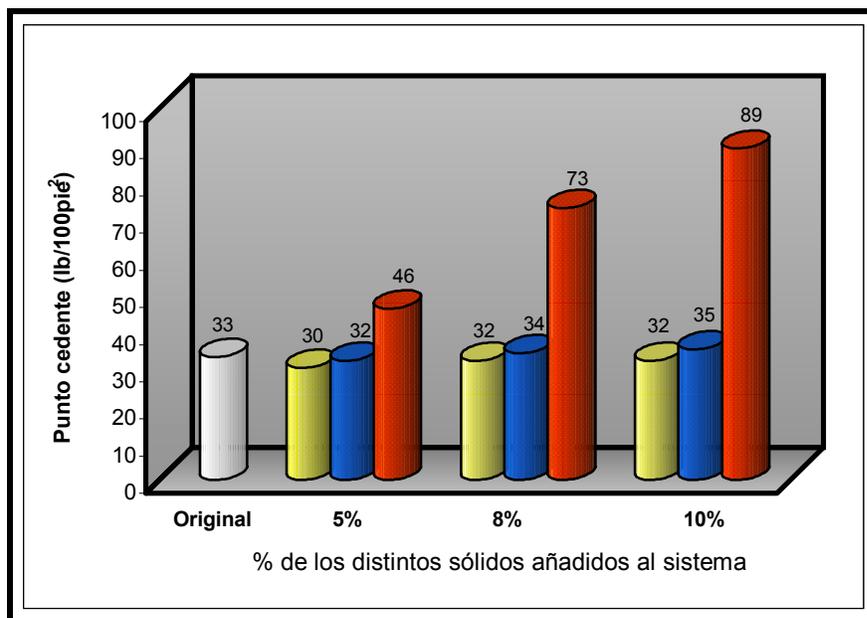


Figura # 4.55 Comportamiento del punto cedente al envejecer el lodo polimérico y al añadir aditivos sólidos

Aquí se menciona, que se cumple el mismo comportamiento observado antes de envejecer, la tendencia a aumentar a medida que disminuye el tamaño de granos y además mientras el

sólido presente carga elevará más los valores de esta propiedad, debido a la interacciones internas de las partículas presentes y añadidas al lodo intencionalmente. Se observa que los valores decrecen para la medida de tamaño arena. Esto puede ser causado a través del movimiento al que es sometido el lodo cuando se está envejeciendo, lo cual trae como consecuencia la decantación de algunas partículas por su diferencia de tamaño con respecto a las otras más pequeñas o de limo – arcilla.

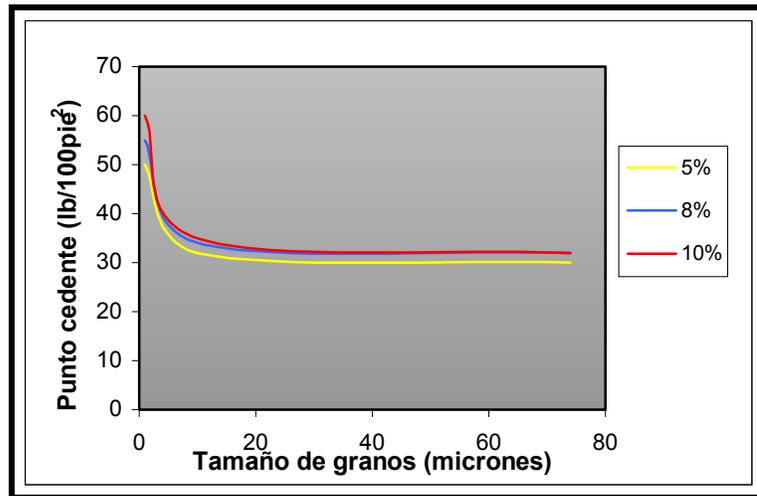


Figura # 4.56 Influencia del tamaño de partículas utilizando arena, sobre el punto cedente en lodo Polimérico envejecido

Aquí se observa de nuevo la misma tendencia, de que a medida que las partículas se hacen más pequeñas mayor es su influencia en la propiedad, por eso se necesita prestar mayor atención a este tipo de partículas e idear un mecanismo para poder eliminarlas de los lodos de perforación o sino aprender a vivir con ellas.

4.3.3.2 Comportamiento de la resistencia de gel después de envejecer

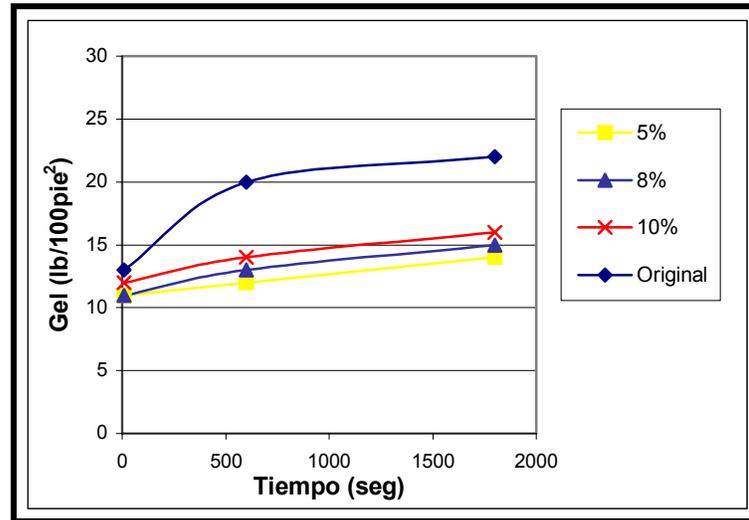


Figura # 4.57 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir arena tamaño arena

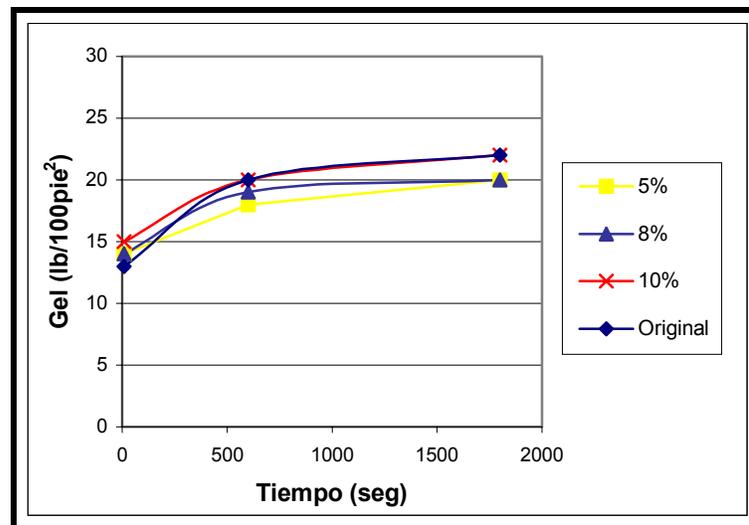


Figura # 4.58 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir arena tamaño arcilla - limo

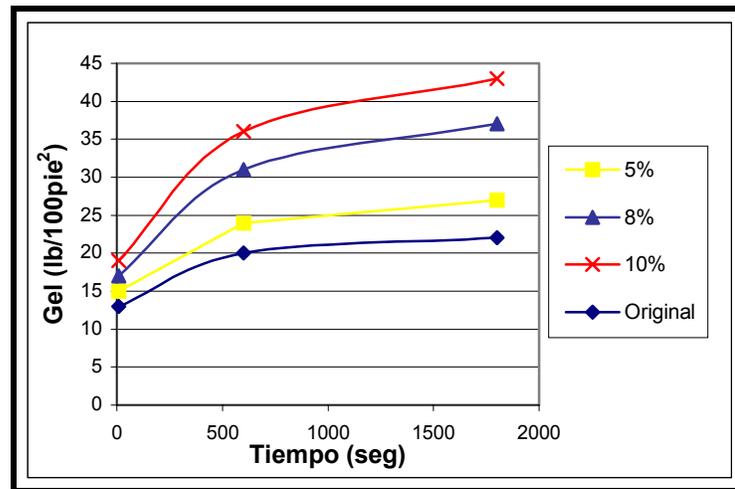


Figura # 4.59 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos Poliméricos envejecido antes y después de añadir lutita simulada

Por medio de las gráficas 4.57, 4.58 y 4.59, se observa que el lodo sigue la misma tendencia de gel progresivo, sobre todo la figura 4.59 donde se muestra el mayor incremento por causa de la lutita incluida.

También se observa en la figura 4.57 y 4.58 que el contenido de arena disminuye un poco los valores de fuerza de gel, esto es causado por la decantación de algunas partículas a causa del movimiento, la presión y temperatura a la que se encuentra el lodo cuando es envejecido.

Pero la evidencia de que las partículas inertes, con sus respectivos tamaños influyen en el desarrollo de estas estructuras se puede verificar a través de las siguientes gráficas (ver figuras 4.60,4.61 y 4.62) comparativas para cada porcentaje de adición respectivamente.

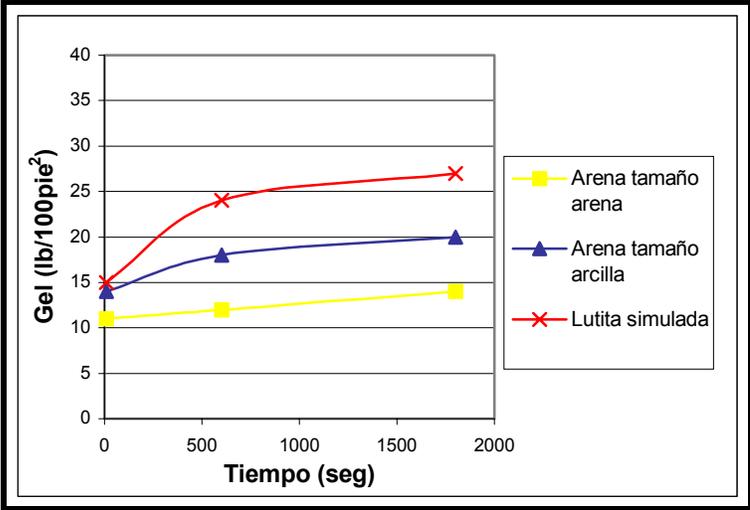


Figura # 4.60 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 5%

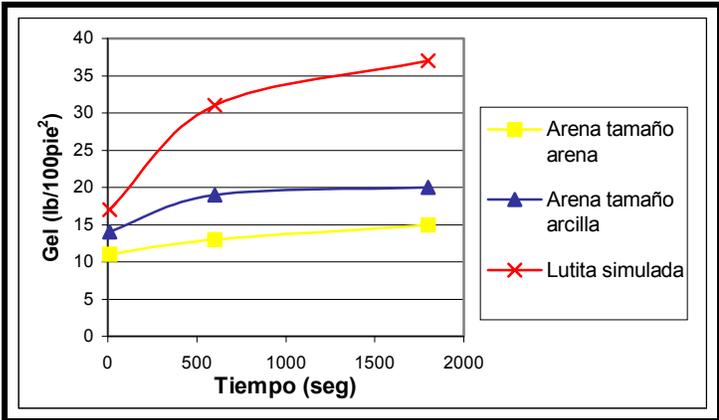


Figura # 4.61 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 8%

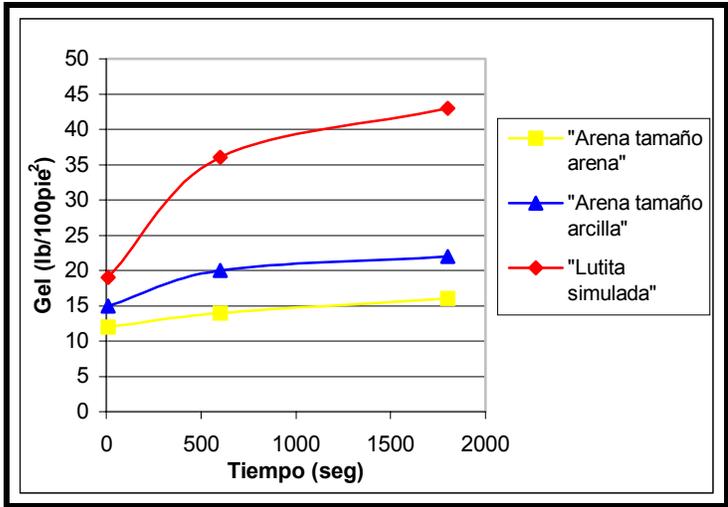


Figura # 4.62 Influencia del tipo de sólidos en la formación de estructuras de gel en lodos Poliméricos envejecido, caso 10%

La influencia causada por el tamaño de granos está descrita de la siguiente manera, a medida que el grano se hace más pequeño, más influye, aumentando la estructura de gel. Esto es causado por que las partículas se encuentran más unidas y el movimiento desordenado de ellas provocan interacción y roce el cual hace que se formen estas estructuras rígidas, esta implicación por tamaño puede ser visualizado por las siguientes gráficas.

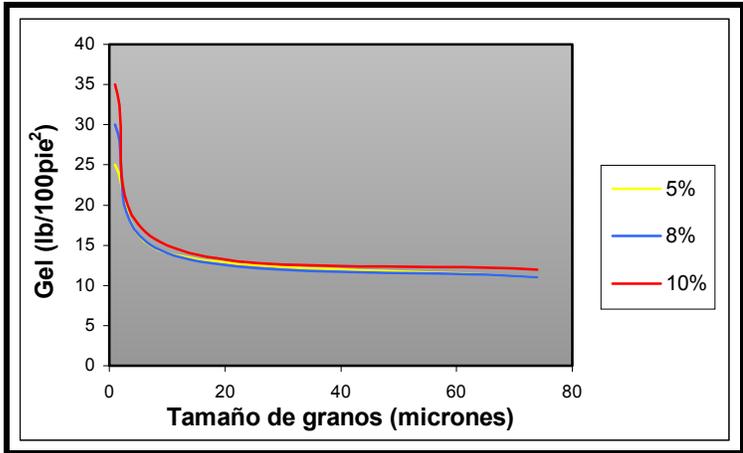


Figura # 4.63 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 segundos en lodo Polimérico envejecido

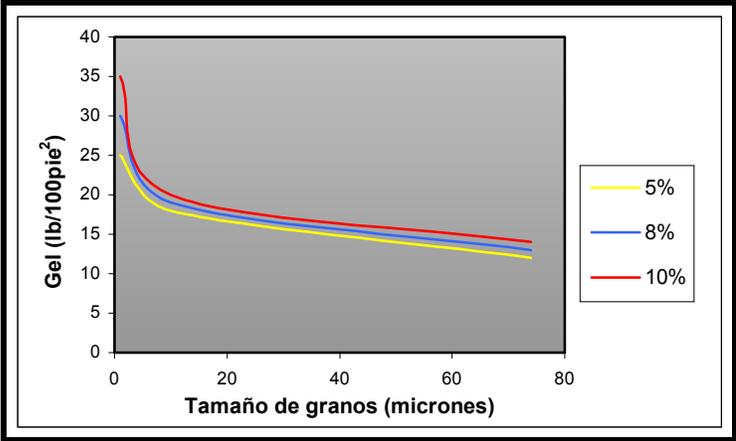


Figura # 4.64 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 10 minutos en lodo Polimérico envejecido

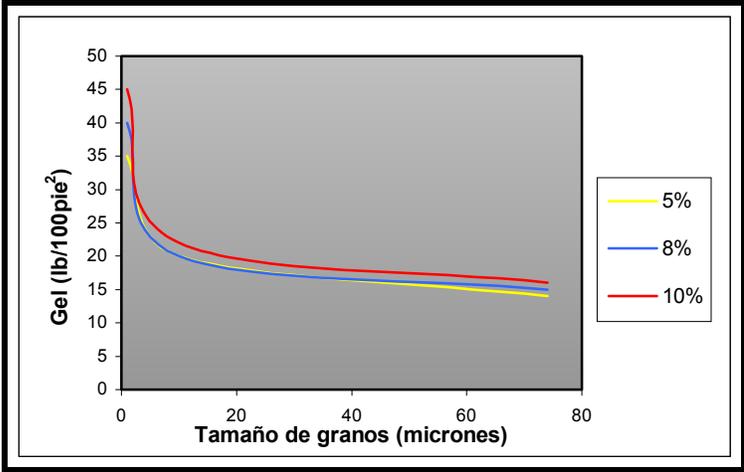


Figura # 4.65 Influencia del tamaño de partículas en la formación de la estructura de gel a 30 minutos en lodo Polimérico envejecido

5. CONCLUSIONES

- ✓ Se comprobó que las partículas inertes poseen influencia en menor magnitud que las no inertes en la formación de estructuras de gel y el punto cedente; aunque en algunas literaturas tales como Lummus, J y Gray, George; afirman que esta propiedad solamente es influenciada por las partículas no inertes.
- ✓ Los lodos bentoníticos son muy sensibles a la adición de sólidos de cualquier tipo, por eso su limitación de uso, y se transforma en un buen medio para la formación de geles, además de ser un lodo base agua.
- ✓ Los lodos poliméricos son entre los lodos base agua, los que mejor se comportan frente a contaminaciones.
- ✓ La formación de estructuras de gel en los lodos poliméricos sigue la misma tendencia que en todos los lodos base agua, pero se necesita de partículas de menor tamaño y a mayor cantidad para ceder a formar estas estructuras.
- ✓ La estructura de gel es dependiente del tamaño, forma y cantidad de sólidos que se ingresen a los diversos sistemas base agua, mayor cantidad y menor tamaño conllevan a valores más altos.
- ✓ El tipo de sólido es influyente en la formación de gel, mientras más cargado es, más fácil forma la estructura, esto es originado por la interacción y la fricción entre las partículas sólidas que ingresan y las que ya están presentes en los diversos lodos base agua.
- ✓ El movimiento interno de las partículas es uno de los principales factores que provocan la formación de estas estructuras.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Efectuar este mismo experimento con otro tipo de sólidos de perforación y a otros tamaños, o simular una lutita con otra composición, para predecir si la tendencia es la misma.
- ✓ Realizar este trabajo con aditivos líquidos y observar la tendencia a la formación de estas estructuras.
- ✓ Utilizar los mismos sistemas que aquí se presentan pero a otras densidades a ver si los sólidos incluidos intencionalmente, como agentes de la formulación de los lodos influyen en la tendencia de formación.
- ✓ Comparar este experimento con otros sistemas, y siempre con los mismos valores de densidad, para así obtener valores más confiables que conduzcan a una mejor visualización de esta propiedad que tanto daño hace a los lodos si es muy elevada.

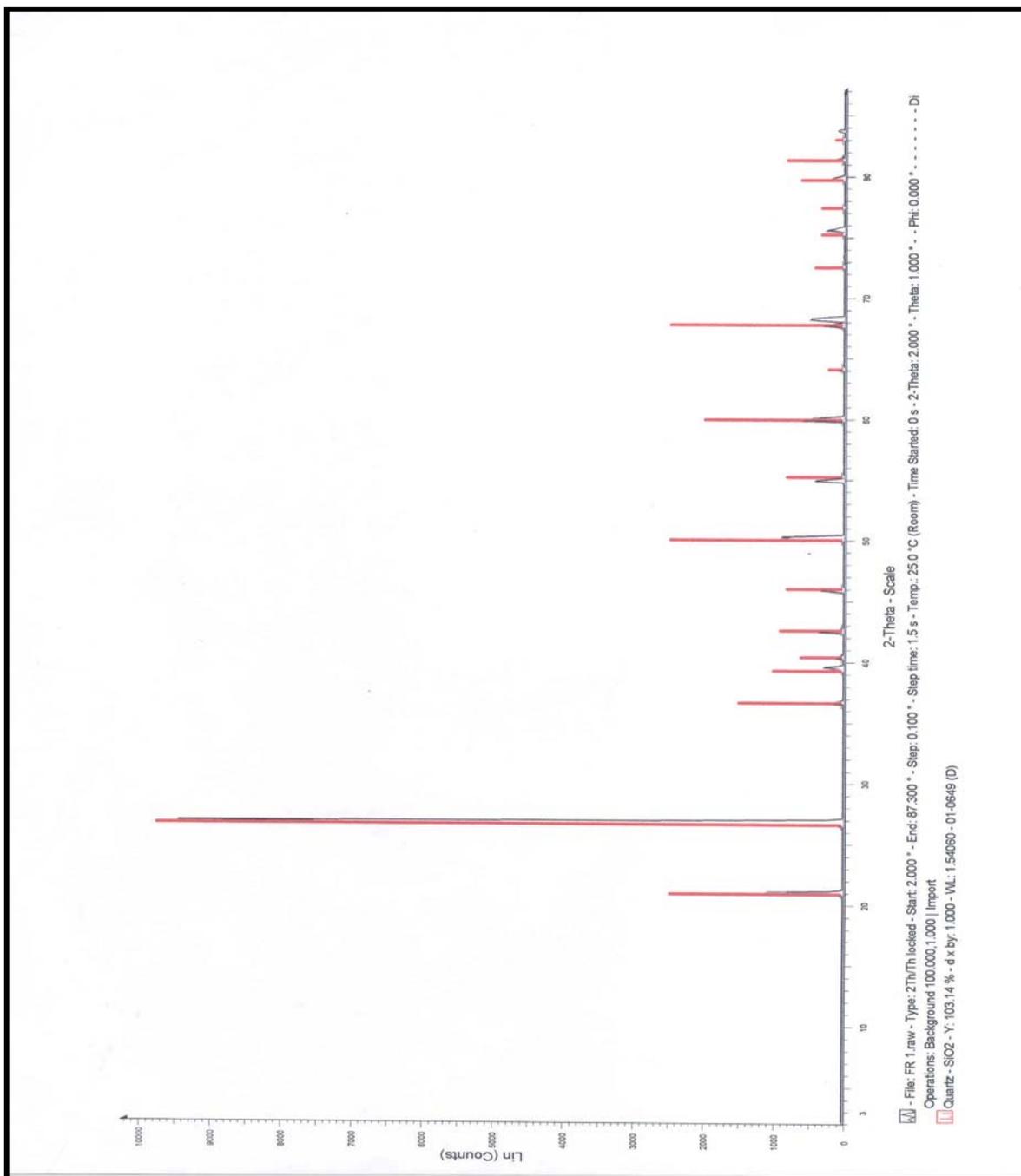
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Clark, P., “Drilling Mud Rheology and the API Recommended Measurements”, paper SPE # 29543, Abril 2-4, 1995, pags 933-941.
2. Dresher, H., “Basic Principles of Colloid Science”, The Royal Society of Chemistry, 1998, capitulos 1-6-8-9 y 13.
3. Goddy, Dean., “Modern Technologies Provide Environmental, Economics Incentives”, Oil & Gas Journal, Agosto 21, 2000, pags 31-35.
4. Gray, George., y Darley, H., “Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids”, Gulf Publishing Company, Fifth Edition, 1988, capitulos 1-2-4-6-8 y 11.
5. Lummus, James., “Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach”, Penn Well Publishing Company, 1986, Tulsa.
6. Martinez, Rafael., “Tecnología de Perforación, Fluidos de Perforación”, capítulo 11.
7. Outmans, H., “Mechanics of Static and Dynamics Filtration in the Borehole”, paper SPE # 491, Septiembre, 1963, pags 236-244.
8. Peng, Shuang. y Peden, J., “Prediction of Filtration Under Dynamics Conditions”, paper SPE # 23824, SPE Intl. Symposium of Formation Damage Control Held, Lafayette, Louisiana, Febrero 26-27, 1992
9. Pettijohn, F.J., “Rocas Sedimentarias”, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1963, pags 16,17,21,32,33,36 y 37.
10. Prieto, Ali., “Tecnología Aplicada a los Fluidos de Perforación”, Maracaibo, 1993.

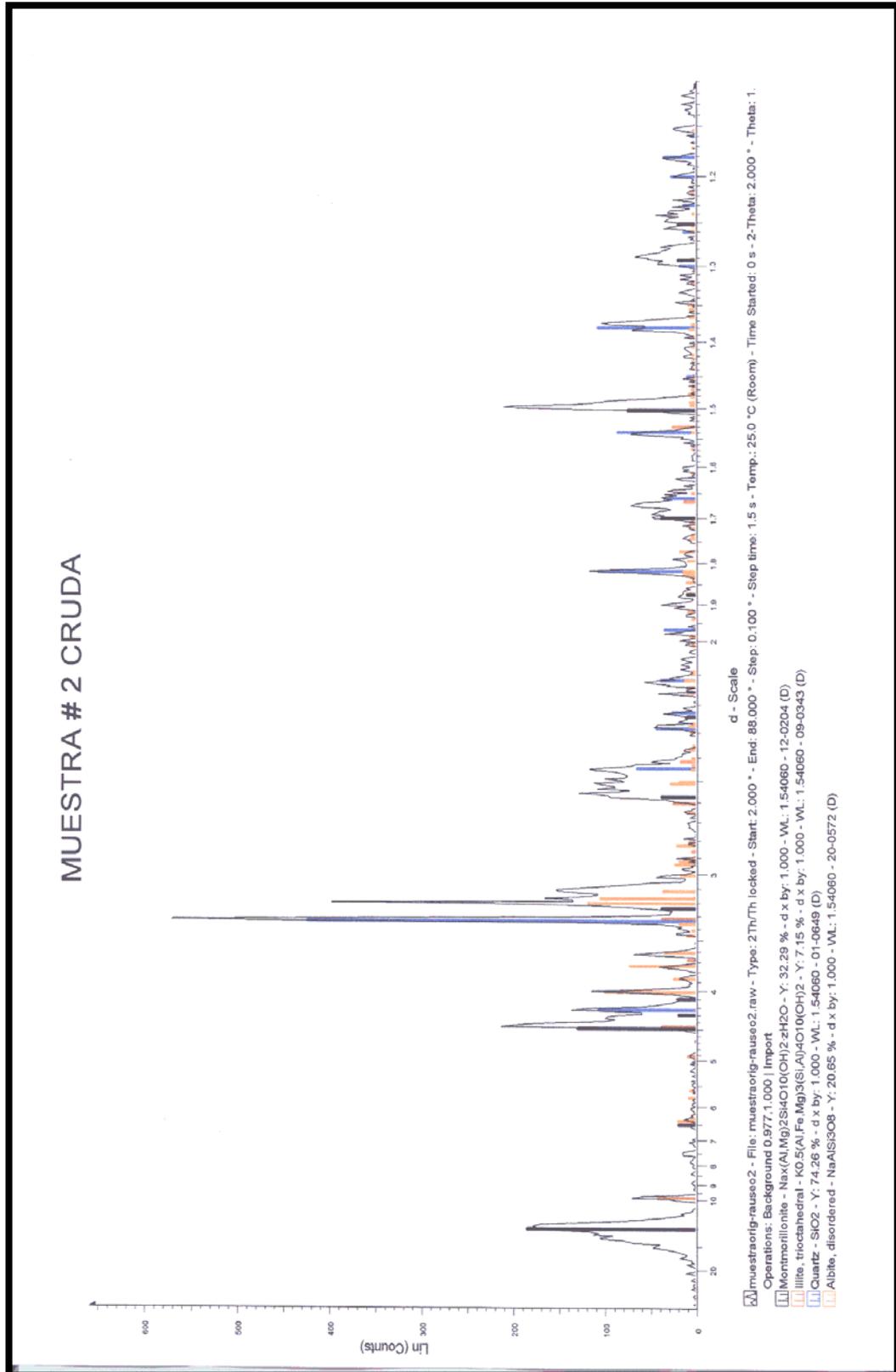
11. “Tecnología Aplicada de Lodos”, IMCO Service a Halliburton Company, capítulos 2,3,5,6,19 y 21.
12. “Manual de Fluidos de Perforación”, M.I. Drilling Fluids de Venezuela C.A, Cabimas 2001, capítulos 1,2,3,5,6,7,9,10,12.
13. “Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids”, American Petroleum Institute, Marzo, 1996, pags 1-23.
14. “Reología”, Cuaderno FIRP # 126, Universidad de los Andes, 1994, pags 1-19.
15. Robinson, Leonel., “How to Optimize Solids Control Economics, Efficiency”, Petroleum Engineer, Septiembre, 1994, pags 17-24.
16. Salager, Jean, “Coloides”, Cuaderno FIRP # 130, Universidad de los Andes, Mérida, 1994, pags 1-8.
17. Thorbjorn, Nyland., “The Effectiveness and Economics of Various Additives for Controlling Drilling Mud Fluid Loss in the Absence and Presence of Various Contaminants”, The University of Tulsa, 1979, pp 43.

8. APÉNDICES

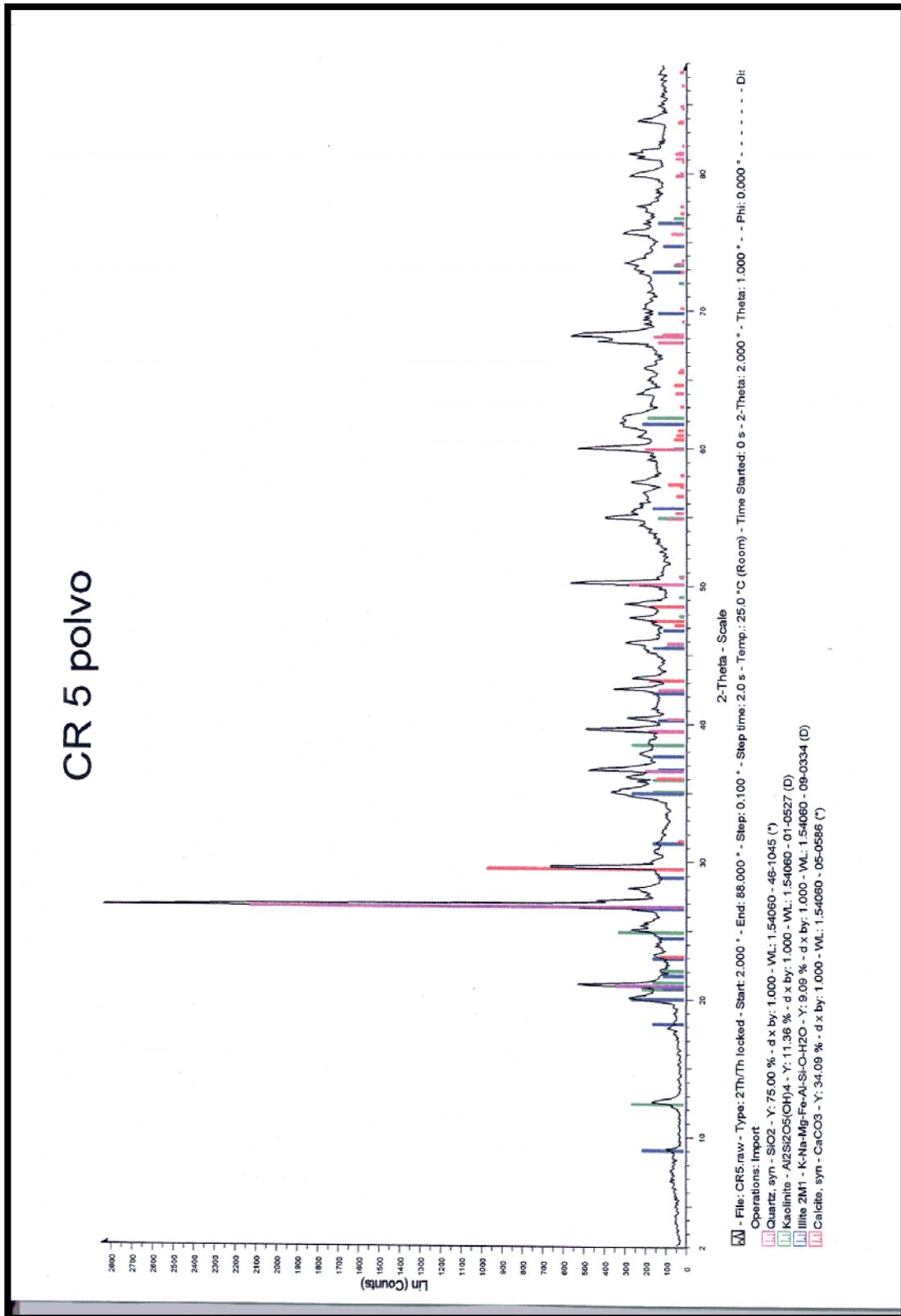
APÉNDICE A1



APÉNDICE A2



APÉNDICE A3



8.4 CALCULOS TIPO

Para el desarrollo de esta sección es usado el lodo polimérico antes de añadir los contaminantes.

- **FORMULACIÓN DEL FLUIDO**

La formulación de los fluidos debe cumplir con el balance de masa, que debe estar en función de 1bbl como volumen total del fluido. En condiciones de laboratorio, 1bbl en campo de cualquier fluido equivale a 350cc del mismo fluido.

La formulación usada para el lodo polimérico es la siguiente:

Tabla # 8.1 Formulación del lodo polimérico con su Gravedad Especifica

Aditivo	Volumen (cc)	Masa (lb)	GE
Agua	305,05	308,05	1
Viscosificante	1,066	1,6	1,5
Inhibidor de arcillas	2,487	5	2,01
Controlador de filtrado	1,33	2	1,5
Densificante	36,57	102,4	2,8
Controlador de pH	0,5	1,065	2,13
Total	350	420,115	

Entonces:

Balance de masas

$$(V_1 * \rho_1) + (V_2 * \rho_2) + (V_3 * \rho_3) + \dots = (V_f * \rho_f) \quad \text{Ecuación \# 8.1}$$

pero se sabe que:

$$G.E = (\rho \text{ elemento} / \rho \text{ agua}) \quad \text{donde } \rho \text{ agua} = 1 \text{ gr/cc} \quad \text{Ecuación \# 8.2}$$

$$(\rho \text{ elemento}) = G.E * \rho \text{ agua}$$

$$V = m / (G.E * \rho \text{ agua})$$

Ecuación # 8.3

El volumen final del lodo debe ser 350 cc, es por eso que se cumple lo siguiente:

$$(1\text{cc/gr}) * [(m_1/GE_1) + (m_2/GE_2) + (m_3/GE_3) + \dots] \text{gr} = 350\text{cc} \quad \text{Ecuación \# 8.4}$$

$$1 [(308,05/1) + (1,6/1,5) + (5/2,01) + (2/1,5) + (102,4/2,8) + (1,065/2,13)] = 350\text{cc}$$

$$308,05 + 1,066 + 2,487 + 1,33 + 36,57 + 0,5 = 350 \text{ cc}$$

$$350 \text{ cc} = 350 \text{ cc}$$

- CONTAMINACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

Una vez preparado cada fluido de perforación, se procedió a añadir los diversos contaminantes. Todos los fluidos fueron contaminados con los sólidos descritos en la “Metodología Experimental” en proporciones de 5%, 8% y 10%, del peso total del fluido formulado.

Para el lodo polimérico de densidad 10 lb/gal se calculó la siguiente cantidad de sólido contaminante:

Tabla # 8.2 Cantidad de sólidos añadidos por cada porcentaje en masa

Porcentaje de sólido añadido	Cantidad en gr
5%	21,005
8%	33,60
10%	42,01

Basándose de que 350cc de lodo pesa 420,115 gr se procedió a calcular los pesos de la siguiente manera:

5% en peso de contaminante = $(0,05) * (\text{peso de } 350\text{cc de lodo})$

8% en peso de contaminante = $(0,08) * (\text{peso de } 350\text{cc de lodo})$

10% en peso de contaminante = $(0,1) * (\text{peso de } 350\text{cc de lodo})$

5% en peso de contaminante = $(0,05) * (420,115)$

5% en peso de contaminante = 21,005gr

8% en peso de contaminante = $(0,08) * (420,115)$

8% en peso de contaminante = 33,60gr

10% en peso de contaminante = $(0,1) * (420,115)$

10% en peso de contaminante = 42,01gr

- CALCULO DE LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN**

Una vez formulados y preparados los fluidos de perforación, se les realizaron ciertas pruebas de laboratorio. A partir de esas mediciones se calcularon ciertas propiedades de los distintos fluidos que fueron claves para la realización de este trabajo, como: viscosidad aparente, viscosidad plástica y punto de cedencia. A continuación se presenta una tabla que muestra los resultados obtenidos de las pruebas del fluido polimérico original sin envejecer.

Tabla # 8.3 Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al lodo polimérico original

L 600 rpm	50
L 300 rpm	42
L 200 rpm	40
L 100 rpm	35
L 6 rpm	21
L 3 rpm	18
Viscosidad aparente	25
Viscosidad plástica	8
Punto de cedencia	34

$$\text{Viscosidad aparente (cp)} = (\text{L } 600 \text{ rpm})/2$$

$$\text{Viscosidad plástica (cp)} = (\text{L } 600 \text{ rpm}) - (\text{L } 300 \text{ rpm})$$

$$\text{Punto de cedencia (lb/100 pie}^2\text{)} = (\text{L } 300 \text{ rpm}) - \text{Viscosidad plástica}$$

$$\text{Viscosidad aparente} = (50/2)$$

$$\text{Viscosidad aparente} = 25 \text{ cp}$$

$$\text{Viscosidad plástica} = (50 - 42)$$

$$\text{Viscosidad plástica} = 8 \text{ cp}$$

$$\text{Punto de cedencia} = (42 - 8)$$

$$\text{Punto de cedencia} = 34$$