

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS



**EVALUACION DE METODOLOGIAS DE FORMULACION DE
MEZCLAS PARA EL CONTROL DE PERDIDAS DE
CIRCULACION DURANTE LA PERFORACION DE POZOS
GEOTERMICOS**

PRESENTADO POR:

ALEJANDRO JOSE CEA FLORES

ROSMERY ARELY CERON MORALES

ROCIO ESMERALDA ESCOTO SOLIS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSE LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZVALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTOR :

ING. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA E INGENIERIA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUIMICO

Título :

**EVALUACION DE METODOLOGIAS DE FORMULACION
DE MEZCLAS PARA EL CONTROL DE PERDIDAS DE
CIRCULACION DURANTE LA PERFORACION DE POZOS
GEOTERMICOS**

Presentado por :

ALEJANDRO JOSE CEA FLORES

ROSMERY ARELY CERON MORALES

ROCIO ESMERALDA ESCOTO SOLIS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. FERNANDO TEODORO RAMIREZ ZELAYA

San Salvador, Mayo 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Para el caso de uno solo:

Docente Asesor :

ING. FERNANDO TEODORO RAMIREZ ZELAYA

RESUMEN

El estudio de pregrado detallado a continuación aborda la evaluación de metodologías de formulación de mezclas para el control de pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos. Como se detallará más adelante el fluido de perforación es el principal componente del sistema de circulación de un equipo de perforación teniendo como función la estabilización de las paredes del agujero, enfriamiento de la barrena, control de presiones de formación, acarrear recortes perforados entre otros.

Para tener una idea del proceso de perforación en los primeros capítulos se describen generalidades y orígenes de la geotermia, tipos de pozos geotérmicos, tipos de técnicas utilizadas en su perforación, además de una breve cronología del desarrollo de la geotermia en El Salvador.

En los siguientes capítulos se presentan los sistemas del equipo de perforación los cuales se interrelacionan para llevar a cabo la operación de perforación. La definición y función de los fluidos de perforación, así como, sus sistemas, propiedades químicas y propiedades físicas. Posteriormente se indica y detallan aspectos reológicos e hidráulicos que estos fluidos pueden presentar. Así como la descripción del fenómeno de pérdidas de circulación, mencionando sus causas y clasificación y una evaluación de casos previos durante la perforación de los pozos geotérmicos A, B, C y D ubicados en los campos geotérmicos existentes en el país.

Como parte central del documento se presenta el desarrollo de la fase experimental donde se detallan las pruebas físicas, pruebas químicas, procedimientos y metodologías a seguir para esta etapa. Seguidamente de la presentación y análisis de resultados.

Como resultado de la evaluación de metodologías de formulación de mezclas, estas se clasifican en tres categorías diferentes: Por infiltración (<10bbl), Pérdidas Parciales (<250bbl) y Pérdidas Totales (>250bbl). Con base a esto se proponen lodos específicos para mitigar cada tipo de pérdidas de circulación.

AGRADECIMIENTOS

A las autoridades correspondientes de LaGeo S.A. de C.V. por darnos su confianza, aval y apoyo económico para la realización del presente trabajo de graduación.

Como equipo de trabajo quedamos enormemente agradecidos con todo el personal de LaGeo que nos apoyó a través del desarrollo de la actividad de campo desarrollado en Chinameca, por todas las atenciones y consideraciones brindadas hacia nosotros muchas gracias. Especialmente al Ing. Jorge Alberto Basagoitia, quien siempre nos acompañó y nos apoyó en el transcurso del desarrollo de todas las etapas del proyecto.

A nuestros asesores, Ing. Darío Benjamín Vásquez Mejía (LaGeo) e Ing. Fernando Teodoro Ramírez Zelaya (UES) por su valiosa asistencia para llevar a cabo la realización del presente documento.

A las autoridades de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por permitirnos realizar las pruebas químicas en las instalaciones de la Planta Piloto, así como al personal de la misma.

A todos nuestros maestros y compañeros de carrera, que de una u otra manera aportaron como personas en la formación de los excelentes profesionales que esperamos convertirnos.

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso por cuidarme y bendecirme a lo largo de mi vida. Por llevarme de la mano y poner en mi camino personas únicas y especiales. Por saber cuándo es el mejor momento para cada cosa.

A mis padres Hipólita Solís y Cecilio Escoto por todo el amor, cuidado y el apoyo brindado durante todos estos años. Por su inamovible objetivo de formarme como profesional, por su constante sacrificio y consejos para lograr que su hija alcanzara este logro. Ya que sin ustedes no hubiera sido posible.

A mis compañeros y amigos de trabajo de graduación Alejandro Cea y Rosmery Morales por todo el apoyo, paciencia y compañerismo brindado en el desarrollo del trabajo de graduación y por siempre estar ahí en los momentos necesarios.

Rocío Escoto

DEDICATORIA

Al ser supremo del Universo, porque cuidó cada uno de mis pasos a lo largo de mis épocas de estudiante, me permitió recibir muchas bendiciones y fue mi fuerza en los momentos más difíciles en los que sentía que iba a rendirme, su apoyo y su presencia estuvo siempre conmigo en todo momento.

A mi madre Graciela de Cerón y mi padre Gilberto Cerón, porque a pesar de todas las limitaciones con las que ellos contaron, nunca dudaron en invertir en mi formación como profesional, su sacrificio valió la pena, este logro es de ustedes.

A mi hermana mayor Gloria Cerón, por asumir en mi vida y en el de mis hermanas el rol de una segunda madre. Gran parte de la persona en la que me he convertido ha sido gracias a tu formación, apoyo y cariño. Te quiero hermana, ya puedes decirme con propiedad “Mi querida ingeniera”.

A mis amigos y amigas, si dicen que los amigos es la familia que se escoge, doy gracias a Dios por no haberme equivocado al escogerlos y por habernos permitido encontrarnos en esta vida, si hay otra vida después de esta, nos vemos en el mismo lugar de siempre, a la hora del café los domingo por la tarde.

A mis compañeros y amigos de trabajo de graduación, me siento orgullosa del grandioso equipo que formamos, Rocío Escoto y Alejandro Cea, lo logramos, a pesar de todas las dificultades ninguna fue tan fuerte como para vencernos.

Rosmery Cerón

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.” Albert Einstein.

DEDICATORIA

A mi madre Marta Flores, por todo el amor y apoyo incondicional brindado durante todos estos años, por darme la educación para desenvolverme en este mundo, pero principalmente te agradezco por enseñarme a materializar los sueños a través de voluntad y esfuerzo.

A mi padre Tito Cea por ser la persona que me ha instruido en el ámbito espiritual, por mostrarme la importancia de conocerse a sí mismo, por otorgarme libertad de culto y enseñarme que la felicidad es un estado mental y que no depende de situaciones transitorias, gracias a ti padre, he sido capaz de ver algo mágico en cada ser vivo que he conocido.

A mi hermano Alex, por esa confianza que hemos mantenido con el tiempo, por defenderme y aguantarme desde pequeño, en fin, por ser mi mejor amigo, también tengo muchísimo que agradecer a mi hermana Marta, por ser mi segunda madre, por dedicarme tantos años de su vida, por ayudarme económicamente en mi formación y por auxiliarme ante cualquier circunstancia.

A mis compañeras y amigas de trabajo de graduación Rosmery Cerón y Rocío Escoto, por haber completado esta meta manteniendo un ambiente de comprensión, apoyo y sobre todo de amistad. Realmente me siento honrado de haberlas conocido.

A la memoria de mi amigo Hugo Benítez Pascual. Tus amigos te hemos llevado presente todos estos años, y sé que donde quiera que tu alma resida puedes sentirte orgulloso de nosotros.

A mis amigos por apoyarme durante la carrera, por los buenos momentos, por las alegrías, por darme ánimos en los momentos difíciles, a todos ellos, muchas gracias.

Alejandro Cea

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

1	Generalidades De La Geotermia.....	48
1.1	Estructura Interna De La Tierra Y Su Relación Con La Geotermia.....	48
1.2	Proceso Geotérmico.....	52
1.3	Tipos De Pozos Geotérmicos.....	55
1.3.1	Pozos Exploratorios.....	55
1.3.2	Pozos De Explotación.....	57
1.4	Desarrollo De La Geotermia En El Salvador.....	58
2	Perforación De Pozos Geotérmicos.....	60
2.1	Técnicas De Perforación.....	60
2.1.1	Perforación Por Percusión (Herramienta De Cable).....	61
2.1.2	Perforación Rotatoria.....	65
2.1.3	Perforación Por Martillo Percusor (Martillo Neumático).....	72
3	Sistemas Del Equipo De Perforación.....	74
3.1	Sistema De Levantamiento.....	76
3.2	Sistema De Rotación.....	79
3.3	Sistema De Circulación Del Lodo Y Eliminación De Sólidos.....	87
3.4	Sistema De Potencia.....	90
3.4.1	Motores Ac.....	92
3.4.2	Motor Diésel Y Generador Ac.....	92

3.5	Sistema De Seguridad (Preventores De Reventones).....	93
4	Fluidos De Perforación.	96
4.1	Generalidades Del Fluido De Perforación	96
4.2	Funciones Del Fluido De Perforación.....	98
4.2.1	Remoción De Los Recortes Del Pozo	99
4.2.2	Control De Las Presiones De La Formación	101
4.2.3	Suspensión Y Descarga De Recortes.....	102
4.2.4	Obturación De Las Formaciones Permeables.....	103
4.2.5	Mantenimiento De La Estabilidad Del Agujero	104
4.2.6	Minimización De Los Daños A La Formación	105
4.2.7	Enfriamiento, Lubricación y Sostenimiento de la barrena y del conjunto de perforación.....	106
4.2.8	Transmisión De La Energía Hidráulica A Las Herramientas Y A La Barrena.	107
4.2.9	Asegurar La Evaluación Adecuada De La Formación.	107
4.2.10	Control De La Corrosión	108
4.2.11	Facilitar La Cementación Y Completación	108
4.2.12	Minimizar El Impacto Sobre El Medio Ambiente.....	109
4.3	Sistemas De Los Fluidos De Perforación	109
4.3.1	Aire Gas	110
4.3.2	Espuma O Fluidos Aireados	111
4.3.3	Lodos Base Agua.....	111
4.3.4	Lodos Emulsionados	113
4.3.5	Lodos Base Aceite	114
4.4	Propiedades De Los Fluidos De Perforación.	116

4.4.1	Propiedades Físicas	116
4.4.2	Propiedades Químicas.	119
5	Pérdidas De Circulación.	121
5.1	Fundamentos Del Fenómeno De Pérdidas De Circulación.....	121
5.2	Causas De Pérdidas De Circulación.	123
5.2.1	Invasión.	123
5.2.2	Fracturación.	126
5.3	Clasificación De Las Pérdidas De Circulación.	129
5.3.1	Materiales Para El Control De Pérdidas De Circulación.....	130
5.3.2	Tapones De Refuerzo (Pérdidas Totales).....	144
5.4	Recuperación De La Circulación.	145
5.4.1	Diagnóstico.	145
5.4.2	Localización De La Pérdida.	146
5.4.3	Medidas Correctivas.	152
5.4.4	Causas Que Impiden El Restablecimiento De La Circulación.	156
5.5	Evaluacion Casos Previos	157
5.5.1	Pérdidas De Circulación En El Pozo A	157
5.5.2	Pérdidas De Circulación En El Pozo B	160
5.5.3	Pérdidas De Circulación En El Pozo C	164
5.5.4	Pérdidas De Circulación En El Pozo D	170
6	Reologia E Hidráulica De Fluidos De Perforación.....	175
6.1	Propiedades Reologicas	176
6.1.1	Viscosidad.	176
6.1.2	Punto Cedente O Yield Point	180

6.1.3	Esfuerzos De Gel.....	182
6.2	Tipos De Fluidos.....	183
6.2.1	Fluidos Newtonianos.....	184
6.2.2	Fluidos No Newtonianos	185
6.3	Modelos Reologicos	187
6.3.1	Modelo De Newton	188
6.3.2	Modelo De Flujo Plástico De Bingham.....	188
6.3.3	Modelo De Ley Exponencial.....	190
6.3.4	Modelo De Ley Exponencial Modificada O Modelo De Herschel-Bulkley	192
6.4	Hidráulica De Fluidos De Perforación.....	199
6.4.1	Optimización De Hidráulica.....	199
6.4.2	Sistema De Circulación.....	205
6.4.2.1	Densidad Equivalente De Circulacion (Ecd)	207
6.4.2.2	Potencia Hidraulica Por Pulgada Cuadrada (Hsi) Del Area De La Barrena. ..	207
6.4.2.3	Fuerza De Impacto Hidraulica (If) Por Pulgada Cuadrada.	208
7	Fase Experimental.....	209
7.1	Pruebas Físicas.....	212
7.1.1	Densidad.....	212
7.1.2	Viscosidad De Embudo	214
7.1.3	Propiedades Reológicas.....	216
7.1.3.3	Procedimiento.....	220
7.1.4	Filtrado	222
7.1.5	Prueba De Ph	225
7.2	Pruebas Químicas	227

7.2.1	Prueba De Alcalinidad.....	227
7.2.2	Prueba De Azul De Metileno.....	233
7.2.3	Prueba De Contenido De Cloro.....	236
7.3	Formulación De Los Batch De Fluido De Perforación Obturante A Evaluar	238
7.3.1	Consideraciones Generales.....	238
7.3.2	Materiales Involucrados En El Procedimiento Experimental.....	243
7.3.3	Lodos Propuestos.....	253
7.4	Metodología De Evaluación De Formulaciones De Batch De Fluidos De Perforación Obturante.....	273
7.4.1	Análisis Técnico Operativo.....	274
7.4.2	Análisis Económico.....	275
7.4.3	Análisis Ambiental.....	277
7.4.4	Elección De Lodos.....	277
8	Presentación De Resultados.....	278
8.1	Lodo 1. Materiales Obturantes Involucrados: Magma Fiber Fino, Celofán Y Magma Fiber Grueso, Proporción 1:1:1	278
8.1.1	Reología Lodo 1	278
8.1.2	Filtrado Lodo 1	287
8.1.3	Pruebas Químicas Lodo 1.....	290
8.1.4	Caracterización Del Lodo 1	291
8.2	Lodo 2. Materiales Obturantes Involucrados: Granza De Arroz, Magma Fiber Grueso, Cascara De Nuez (Nut Plug™) Proporción 1:1:1	294
8.2.1	Reología Lodo 2	294
8.2.2	Filtrado Lodo 2.....	302
8.2.3	Pruebas Químicas Lodo 2.....	305

8.2.4	Caracterizacion Del Lodo 2.....	306
8.3	Lodo 3. Materiales Obturantes Involucrados: Granza De Arroz, Magma Fiber Grueso, Celofán, Cascara De Nuez.	309
8.3.1	Reología Lodo 3	309
8.3.2	Filtrado Lodo 3	317
8.3.3	Pruebas Químicas Lodo 3.....	320
8.3.4	Caracterizacion Del Lodo 3.....	321
8.4	Lodo 4. Materiales Obturantes Involucrados: Únicamente Mica Fina.	324
8.4.1	Reología Lodo 4	324
8.4.2	Filtrado Lodo 4.....	332
8.4.3	Pruebas Químicas Lodo 4.....	335
8.4.4	Caracterizacion Del Lodo 4.....	336
8.5	Lodo 5. Materiales Obturantes Involucrados: Cascarilla De Café, Magma Fiber Grueso, Celofán Y Mica Proporción 1:1:1:4.....	339
8.5.1	Reología Lodo 5	339
8.5.2	Filtrado Lodo 5	347
8.5.3	Pruebas Químicas Lodo 5.....	350
8.5.4	Caracterizacion Del Lodo 5.....	351
8.6	Lodo 6. Materiales Obturantes Y Aditivos Involucrados: Granza De Arroz, Cascara De Nuez, Carbón Fino, Carboximetilcelulosa, Aceite Vegetal. Tomado De Patente Eua No. 5, 599,776 (1998.).....	354
8.6.1	Reología Lodo 6	354
8.6.2	Filtrado Lodo 6.....	362
8.6.3	Pruebas Químicas Lodo 6.....	365
8.6.4	Caracterizacion Del Lodo 6.....	366

8.7	Lodo 7. Lodo De Inyección De Polímero Entrecruzado. Materiales Obturantes Involucrados: Form A Set.....	369
8.7.1	Reología Lodo 7	369
8.7.2	Filtrado Lodo 7	377
8.7.3	Pruebas Químicas Lodo 7.....	380
8.7.4	Caracterizacion Lodo 7.....	382
8.8	Lodo 8. Lodo De Alta Taza De Filtrado. Materiales Obturantes Involucrados: Form A Squeeze.....	385
8.8.1	Reología Lodo 8	385
8.8.2	Filtrado Lodo 8.....	393
8.8.3	Pruebas Químicas Lodo 8.....	396
8.8.4	Caracterizacion Lodo 8.....	397
8.9	Lodo 9. Materiales Obturantes Involucrados: Diamond Seal	399
8.9.1	Reología Lodo 9	399
8.9.2	Filtrado Lodo 9	400
8.9.3	Pruebas Químicas Lodo 9.....	402
8.9.4	Caracterizacion De Lodo 9.....	403
8.10	Lodo 10. Materiales Obturantes Involucrados: Diamond Seal, Carbón.	404
8.10.1	Introducción Lodo 10	404
8.10.2	Reología Lodo 10	404
8.10.3	Filtrado Lodo 10.....	405
9	Analisis De Resultados.....	406
9.1	Lodos Para El Tratamiento De Pérdidas De Hasta 10 Bbl/Hr.	406
9.2	Lodos Para El Tratamiento De Pérdidas De Hasta 250 Bbl/Hr.	412
9.3	Lodos Para El Tratamiento De Pérdidas Totales.	419

9.4	Resumen De Datos.....	425
9.5	Metodología De Aplicación De Los Lodos Propuestos.....	427
10	Conclusiones.	433
11	Recomendaciones.	436
12	Bibliografía	437
13	Glosario	441
14	Apendices.	464
14.1	Apéndice 1. Laboratorio De Evaluación De Materiales De Pérdida De Circulación.	464
14.2	Apéndice 2. Tema Propuesto.	467
15	Anexos	469
15.1	Anexo 1. Método De Los Factores Ponderados.....	469
15.2	Anexo 2. Evaluación Ambiental.	471
15.3	Anexo 3: Estimación De Propiedades Reológicas Para El Modelo De Herschel-Bulkley (Ley Exponencial Modificada).	475
15.3.1	Memoria De Calculo De Estimación De Las Propiedades Reológicas Para El Lodo 8.	476

ÍNDICE DE TABLAS

FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Tabla 4.1	Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos.....	116
Tabla 4.2	Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación.....	117
Tabla 4.3	Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación.....	118
Tabla 4.4	Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación.....	119
Tabla 4.5	Cuadro resumen sobre las propiedades químicas de los fluidos de perforación	120
Tabla 5.1	Clasificación de pérdidas de circulación	130

Tabla 5.2. Ejemplo de materiales fibrosos.	131
Tabla 5.3. Ejemplos de materiales laminares.	133
Tabla 5.4. Ejemplos de materiales granulares.	134
Tabla 5.5. Ejemplos de mezclas de materiales obturantes.	137
Tabla 5.6. Ejemplos de materiales obturantes solubles en ácido/solubles en agua.	139
Tabla 5.7. Ejemplo de materiales de alta tasa de filtrado.	140
Tabla 5.8. Ejemplos de materiales hinchables/hidratables.	142
Tabla 5.9. Ejemplos de nanopartículas.	143
Tabla 6.1Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación.....	195
Tabla 6.2Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.....	196
Tabla 6.3Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.....	197
Tabla 6.4Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.....	198
Tabla 7.1. Resumen de propiedades físicas a evaluar.	209
Tabla 7.2. Resumen de propiedades químicas a evaluar.	211
Tabla 7.3.Procedimiento para calibración de balanza de lodos.....	213
Tabla 7.4.Procedimiento para la determinación de la densidad de un fluido.	214
Tabla 7.5. Procedimiento para el cálculo de la viscosidad de embudo.	216
Tabla 7.6. Procedimiento para el cálculo de las propiedades reológicas.	220
Tabla 7.7. Procedimiento para el cálculo de las propiedades reológicas. Continuación....	221
Tabla 7.8.Procedimiento para la realización de la prueba de filtrado.	224
Tabla 7.9. Procedimiento para la calibración del pH-metro.....	226
Tabla 7.10. Procedimiento para la determinación del pH	226
Tabla 7.11.Preparación de solución 0.02 N de ácido sulfúrico.	228
Tabla 7.12. Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de filtrado Pf.....	228
Tabla 7.13.Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de filtrado Mf.....	230

Tabla 7.14. Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de lodo Pm.	230
Tabla 7.15. Concentraciones de iones que producen la alcalinidad en función de Pf y Mf.	231
Tabla 7.16. Preparación de solución de ácido sulfúrico 5N.	234
Tabla 7.17. Preparación de solución de peróxido de hidrógeno al 3%.	234
Tabla 7.18. Preparación de solución de peróxido de hidrógeno al 3%. Continuación.	235
Tabla 7.19. Procedimiento experimental para la obtención del azul de metileno.	235
Tabla 7.20. Preparación de solución de nitrato de plata 0.0282.	237
Tabla 7.21. Preparación de 0.02N de ácido sulfúrico.	237
Tabla 7.22. Procedimiento experimental para el cálculo de contenido de cloruros.	238
Tabla 7.23. Concentración sugerida de materiales obturantes acorde al tipo de pérdida.	240
Tabla 7.24. Distribución de materiales para el control de pérdidas de circulación acorde a la severidad de la pérdida.	241
Tabla 7.25. Propiedades fisicoquímicas de la bentonita.	244
Tabla 7.26. Propiedades del Diamond Seal.	250
Tabla 7.27. Composición química del Magma Fiber.	251
Tabla 7.28. Otros materiales obturantes.	252
Tabla 7.29. Resumen de lodos propuestos.	253
Tabla 7.30. Formulación para el lodo 1.	255
Tabla 7.31. Formulación para el lodo 2.	257
Tabla 7.32. Formulación para el lodo 3.	259
Tabla 7.33. Formulación para el lodo 4.	261
Tabla 7.34. Formulación para el lodo 5.	263
Tabla 7.35. Distribución de aditivos para lodo 6.	264
Tabla 7.36. Formulación para lodo 6.	265
Tabla 7.37. Formulación para lodo 7.	267
Tabla 7.38. Formulación para lodo 8.	269
Tabla 7.39. Formulación para lodo 9.	271
Tabla 7.40. Formulación para lodo 10.	273
Tabla 7.41. Criterios de decisión para el análisis técnico-operativo.	274

Tabla 7.42. Cuadro de costos unitarios de los materiales utilizados.	276
Tabla 7.43. Ponderación por nivel de clasificación de sustancias químicas.	277
Tabla 7.44. Criterios de decisión para elección de un lodo.	277
Tabla 8.1. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 1	278
Tabla 8.2. Propiedades reológicas para el lodo 1.	282
Tabla 8.3. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 1	287
Tabla 8.4. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 1.....	289
Tabla 8.5. Pruebas químicas realizadas al lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl.....	290
Tabla 8.6. Caracterización del lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl.....	291
Tabla 8.7. Composición del lodo 1 a una concentración de materiales obturantes de 12 lb/bbl.	292
Tabla 8.8. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 2	294
Tabla 8.9. Propiedades reológicas para el lodo 6.	297
Tabla 8.10. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 2	302
Tabla 8.11. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 2.....	304
Tabla 8.12. Pruebas químicas realizadas al lodo 1 a una concentración de 20 lb/bbl.....	305
Tabla 8.13. Caracterización del lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl.....	306
Tabla 8.14. Composición del lodo 2 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.	307
Tabla 8.15. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 3	309
Tabla 8.16. Propiedades reológicas para el lodo 3.	312
Tabla 8.17. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 3.....	317
Tabla 8.18. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 3.....	319
Tabla 8.19. Pruebas químicas realizadas al lodo 3 a una concentración de 12 lb/bbl.....	320
Tabla 8.20. Caracterización del lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl.....	321
Tabla 8.21. Composición del lodo 3 a una concentración de materiales obturantes de 18 lb/bbl.	322
Tabla 8.22. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 4.	324
Tabla 8.23. Propiedades reológicas para el lodo 4.	327
Tabla 8.24. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 4.....	332

Tabla 8.25. Criterios de decisión para la elección de una concentración en específico.	
Lodo 4.....	334
Tabla 8.26. Pruebas químicas para el lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl.	335
Tabla 8.27. Caracterización del lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl.	336
Tabla 8.28. Composición de lodo 4 a una concentración propuesta de materiales obturantes de 18 lb/bbl.	337
Tabla 8.29. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 5.	339
Tabla 8.30. Propiedades reológicas para el lodo 5.	342
Tabla 8.31. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 5.	347
Tabla 8.32. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 5.....	349
Tabla 8.33. Pruebas químicas realizadas al lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl.	350
Tabla 8.34. Caracterización del lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl.	351
Tabla 8.35. Composición de lodo 5 a una concentración propuesta de materiales obturantes de 18 lb/bbl.	352
Tabla 8.36. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 6.	354
Tabla 8.37. Propiedades reológicas para el lodo 6.	357
Tabla 8.38. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 6.	362
Tabla 8.39. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 6.....	364
Tabla 8.40. Pruebas químicas realizadas al lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl.	365
Tabla 8.41. Caracterización del lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl.	366
Tabla 8.42. Composición del lodo 6 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.	367
Tabla 8.43. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 7.	369
Tabla 8.44. Propiedades reológicas para el lodo 8.	373
Tabla 8.45. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 7.	377
Tabla 8.46. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 7.....	379
Tabla 8.47. Pruebas químicas realizadas al lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl.	380
Tabla 8.48. Caracterización del lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl.	382
Tabla 8.49. Composición del lodo 7 a una concentración de materiales obturantes de 16 lb/bbl.	383

Tabla 8.50. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 8.	385
Tabla 8.51. Propiedades reológicas para el lodo 8.	388
Tabla 8.52. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 8.	393
Tabla 8.53. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 8.	395
Tabla 8.54. Pruebas químicas realizadas al lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl.	396
Tabla 8.55. Caracterización del lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl.	397
Tabla 8.56. Composición del lodo 8 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.	398
Tabla 8.57. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 9.	400
Tabla 8.58. Pruebas químicas realizadas al lodo 9 a una concentración de 10 lb/bbl.	402
Tabla 8.59. Caracterización del lodo 9 a una concentración de 10 lb/bbl.	403
Tabla 8.60. Composición del lodo 9 a una concentración de materiales obturantes de 10 lb/bbl.	403
Tabla 8.61. Pruebas de filtrado. Lodo 10.	405
Tabla 9.1. Clasificación de los lodos planteados en función de su utilidad.	406
Tabla 9.2. Lodos propuestos para la mitigación de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.	407
Tabla 9.3. Costos totales de lodos para tratamientos de pérdidas de hasta 10 bbl/hr.	408
Tabla 9.4. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.	410
Tabla 9.5. Análisis técnico-operativo de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.	410
Tabla 9.6. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.	411
Tabla 9.7. Toma de decisión de un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.	412
Tabla 9.8. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas parciales de hasta 250 bbl/hr.	413
Tabla 9.9. Costos totales de lodos para tratamientos de pérdidas de hasta 250 bbl/hr.	414

Tabla 9.10. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.....	416
Tabla 9.11. Análisis técnico-operativo de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.	417
Tabla 9.12. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.	417
Tabla 9.13. Toma de decisión de un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.	418
Tabla 9.14. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas totales.	419
Tabla 9.15. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas totales de circulación.....	420
Tabla 9.16. Costos de lodos para tratamientos de pérdidas totales.	421
Tabla 9.17. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas totales de circulación.....	423
Tabla 9.18. Resumen de datos del análisis económico realizado a los diferentes lodos propuestos.	425
Tabla 9.19. Resumen de datos del análisis Técnico-Operativo realizado a los lodos clasificados para perdidas leves y perdidas parciales.....	426
Tabla 9.20. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas de circulación.	427
Tabla 15.1 Ponderación por nivel de clasificación de sustancias químicas	474
Tabla 15.2. Datos de esfuerzo de corte a diferentes velocidades de corte para el lodo 8...	476
Tabla 15.3. Asunciones iniciales de n y k para el cálculo de las propiedades reológicas. Lodo 8	477
Tabla 15.4. Cálculo de sumatorias intermediarias para la estimación de los parámetros reológicos del lodo 8	477
Tabla 15.5. Propiedades reológicas estimadas. Lodo 8.....	479

ÍNDICE DE FIGURAS

GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA

Figura 1.1. Núcleo, manto y corteza de la Tierra	49
Figura 1.2. Proceso de tectónica de placas.	50
Figura 1.3. Cinturón de Fuego del Pacífico.....	51
Figura 1.4. Estructura de un campo geotérmico.....	54

PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS

Figura 2.1. Equipo de perforación por percusión	63
Figura 2.2. Herramientas de percusión.....	64
Figura 2.3. Perforador rotatorio de circulación directa normal.	66
Figura 2.4. Equipo de perforación rotatoria.	67
Figura 2.5. Perforador rotatorio de circulación invertida.	71
Figura 2.6. Perforador de martillo neumático.....	73

SISTEMAS DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN

Figura 3.1. Componentes de la estructura soportante del sistema de levantamiento del equipo de perforación	77
Figura 3.2. Componentes del equipo de izaje.....	78
Figura 3.3. Tambor del malacate y línea rápida a la corona.....	79
Figura 3.4. Fotografía de tuberías de perforación	81
Figura 3.5. Fotografía de tuberías del tipo drill collar (DC).....	82
Figura 3.6. Fotografía de las tuberías tipo HWDP	83
Figura 3.7. Barrena para rocas tipo (TCI)	85
Figura 3.8. Barrena de PDC (cortadores de diamante policristalino).....	86
Figura 3.9. Barrena para rocas de dientes fresados y barrena sacanúcleos de diamantes naturales.....	86

Figura 3.10. Fotografía de una bomba triplex	88
Figura 3.11. Esquema de un sistema de circulación en perforación rotatoria	90

FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Figura 4.1 Ciclo de vida de los fluidos de perforación.....	98
Figura 4.2. Tipos de lodo base agua	113
Figura 4.3. Tipos de lodos de emulsión invertida o base aceite	115

PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

Figura 5.1 Mecanismos de egreso del fluido de perforación en el pozo.	122
Figura 5.2 Arena agotada.....	125
Figura 5.3 Secciones de pérdida de circulación:	126
Figura 5.4 Presión de fondo para ciclo normal de perforación.	127
Figura 5.5 Ciclo de perforación y el restablecimiento subsiguiente de parte de la integridad de formación.....	129
Figura 5.6 a) Sello de la fractura en la cara del pozo. b) Sello de la fractura dentro de la formación.....	132
Figura 5.7. Efecto de la concentración y tipo de material de pérdida de circulación sobre el sello de fracturas.	136
Figura 5.8. Resumen de las pruebas de materiales de pérdida de circulación.....	136
Figura 5.9. Localización de zona de pérdida de circulación mediante el estudio de temperaturas.....	148
Figura 5.10 Esquema simplificado del funcionamiento de un transductor para medir presiones.	149
Figura 5.11. Técnica de inyección de presión de alta pérdida de filtrado.	155

REOLOGIA E HIDRÁULICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Figura 6.1. Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad efectiva de un fluido no newtoniano.	178
Figura 6.2. Tipos de Geles.....	183
Figura 6.3. Fluido Newtoniano.....	184
Figura 6.4. Fluidos No Newtonianos.....	185
Figura 6.5. Efecto de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte en los fluidos no newtonianos.	186
Figura 6.6. Modelo de Bingham y fluido no newtoniano típico.....	189
Figura 6.7. Efecto del índice de flujo en un fluido de perforación.	191
Figura 6.8. Efecto del índice “n” de la Ley Exponencial sobre el perfil de velocidad.....	191
Figura 6.9. Comparación de modelos reologicos.	193
Figura 6.10. Grafico logarítmico de comparación de los modelos reologicos.	193

FASE EXPERIMENTAL

Figura 7.1. Esquema de una balanza de lodos.....	213
Figura 7.2. Esquema del cono de Marsh para realización de la prueba de viscosidad de embudo.	215
Figura 7.3. Rango sugerido para el punto cedente de un fluido base agua.	217
Figura 7.4. Rango sugerido de la viscosidad plástica para un fluido base agua.....	218
Figura 7.5. Esquema de un reómetro rotacional.....	220
Figura 7.6. Esquema de un filtro prensa API.	224
Figura 7.7. pH vs soda cáustica para agua destilada, dulce y salada.....	227
Figura 7.8. Procedimiento para la obtención de la alcalinidad de filtrado Pf.....	229
Figura 7.9. Procedimiento para la obtención de la alcalinidad de lodo Pm.	231
Figura 7.10. Concentración y tratamientos para carbonatos.	232
Figura 7.11. Concentración y tratamientos para bicarbonatos.	233

Figura 7.12. Esquema de los pasos 8, 9 y 10 de la prueba de azul de metileno.	236
Figura 7.13. Puente formado por materiales obturantes de tamaño inferior al de la fractura.	239
Figura 7.14. Puente formado por materiales obturantes de tamaño superior al tamaño de la fractura.	239
Figura 7.15. Puente formado por una combinación adecuada de materiales obturantes....	240
Figura 7.16. Clasificación actualizada de materiales de pérdida de circulación.	242
Figura 7.17. Comparación en la hidratación de la montmorillonita cálcica y sódica.....	245
Figura 7.18. Celulosa.....	246
Figura 7.19. Carboximetilcelulosa de Sodio	246
Figura 7.20. Saco de Form A Set.	248
Figura 7.21. Saco de Form A Squeeze.	249

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 9.1. Metodología para el control de pérdidas totales.	424
Figura 9.2. Metodología de aplicación del lodo 2 para el tratamiento de pérdidas leves (<10 bbl/hr).....	428
Figura 9.3. Metodología de aplicación del lodo 6 para el tratamiento de pérdidas parciales (<250 bbl/hr)	429
Figura 9.4. Metodología de aplicación de inyección de alta tasa de filtrado con Form-A-Squeeze.....	430
Figura 9.5. Metodología de aplicación de inyección de polímero entrecruzado con Form-A-Set.	431
Figura 9.6. Metodología para el control de pérdidas en perforaciones direccionales utilizando Diamond Seal.	432
Figura 13.1. Aparato de filtrado a alta temperatura y presión.....	465
Figura 13.2. Aparato de taponamiento de permeabilidad.....	466

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 8.1. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.	279
Gráfico 8.2. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes	279
Gráfico 8.3. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	280
Gráfico 8.4. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.	283
Gráfico 8.5. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.	283
Gráfico 8.6. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 1.....	284
Gráfico 8.7. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 1	284
Gráfico 8.8. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo1.....	285
Gráfico 8.9. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 1.....	288
Gráfico 8.10. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.	288
Gráfico 8.11. Curva reológica logarítmica para el lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl de LCM's.....	292
Gráfico 8.12. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.	295

Gráfico 8.13. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.	295
Gráfico 8.14. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	296
Gráfico 8.15. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2.	298
Gráfico 8.16. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2.	298
Gráfico 8.17. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 2.....	299
Gráfico 8.18. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 2.....	299
Gráfico 8.19. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 2.....	300
Gráfico 8.20. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 2.....	303
Gráfico 8.21. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2	303
Gráfico 8.22. Curva reológica logarítmica para el lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl de LCM's.....	307
Gráfico 8.23. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.	310
Gráfico 8.24. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.	310
Gráfico 8.25. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	311
Gráfico 8.26. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3	313
Gráfico 8.27. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3	313

Gráfico 8.28. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 3.....	314
Gráfico 8.29. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 3	314
Gráfico 8.30. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 3.....	315
Gráfico 8.31. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 3.....	318
Gráfico 8.32. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3.	318
Gráfico 8.33. Curva reológica logarítmica para el lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's.....	322
Gráfico 8.34. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.	325
Gráfico 8.35. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.	325
Gráfico 8.36. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	326
Gráfico 8.37. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 4.	328
Gráfico 8.38. Variación del punto de cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 4.	328
Gráfico 8.39. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 4.....	329
Gráfico 8.40. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4	329
Gráfico 8.41. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4.....	330
Gráfico 8.42. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4	333

Gráfico 8.43. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 4.....	333
Gráfico 8.44. Curva reológica logarítmica para el lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's.....	337
Gráfico 8.45. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.	340
Gráfico 8.46. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 12 lb/bbl de materiales obturantes.	340
Gráfico 8.47. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 27 lb/bbl de materiales obturantes	341
Gráfico 8.48. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.	343
Gráfico 8.49. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.	343
Gráfico 8.50. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 5.....	344
Gráfico 8.51. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 5	344
Gráfico 8.52. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 5.....	345
Gráfico 8.53. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 5.....	348
Gráfico 8.54. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.	348
Gráfico 8.55. Curva reológica logarítmica para el lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's.....	352
Gráfico 8.56. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.	355
Gráfico 8.57. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes	355

Gráfico 8.58. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	356
Gráfico 8.59. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.	358
Gráfico 8.60. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.	358
Gráfico 8.61. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 6.	359
Gráfico 8.62. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 6.	359
Gráfico 8.63. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 6.	360
Gráfico 8.64. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 6.	363
Gráfico 8.65. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.	363
Gráfico 8.66. Curva reológica logarítmica para el lodo 6 a una concentración 20 lb/bbl de LCM's	367
Gráfico 8.67. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.	370
Gráfico 8.68. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 6 lb/bbl de materiales obturantes.	370
Gráfico 8.69. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.	371
Gráfico 8.70. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 14 lb/bbl de materiales obturantes.	371
Gráfico 8.71. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.	374
Gráfico 8.72. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.	374

Gráfico 8.73. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 7.....	375
Gráfico 8.74. Variación de k y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 7.	375
Gráfico 8.75. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 7.....	378
Gráfico 8.76. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.	378
Gráfico 8.77. Variación del pH en función de la concentración de Form-A-Set.	381
Gráfico 8.78. Curva reológica logarítmica para el lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl de LCM's.....	383
Gráfico 8.79. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.	386
Gráfico 8.80. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.	386
Gráfico 8.81. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.	387
Gráfico 8.82. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.	389
Gráfico 8.83. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.	389
Gráfico 8.84. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 8.....	390
Gráfico 8.85. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 8.	390
Gráfico 8.86. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 8.....	391
Gráfico 8.87. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 8.....	393

Gráfico 8.88. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.	394
Gráfico 8.89. Curva reológica logarítmica para el lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl de LCM's.....	398
Gráfico 8.90. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 9	400
Gráfico 8.91. Crecimiento del diámetro de partícula del Diamond Seal para lodos base agua.	401

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Definición	Unidades
B	Expansibilidad del conducto.	<i>Adimensional</i>
D_b	Diámetro de la barrena	<i>pulg</i>
D_h	Diámetro interno del pozo o tubería de revestimiento.	<i>pulg</i>
D_{hyd}	Diámetro hidráulico.	<i>pulg</i>
D_i	Diámetro interno de la tubería de revestimiento.	<i>pulg</i>
D_n	Diámetro de la tobera.	<i>pulg</i>
D_p	Diámetro exterior de la tubería de perforación.	<i>pulg</i>
ECD	Densidad Equivalente de Circulación	lb_m/gal
f_a	Factor de fricción de Fanning.	<i>Adimensional</i>
G_p	Corrección geométrica de la velocidad de corte.	<i>Adimensional</i>
HSI	Potencial hidráulico por pulgada cuadrada	$hhp/pulg^2$
hhp_b :	Potencia hidráulica de la barrena	<i>hhp</i>
IF	Fuerza de impacto hidráulica por pulgada cuadrada	$lb_f/pulg^2$

Símbolo	Definición	Unidades
IF_{lb}	Fuerza de impacto hidráulica por unidad de masa	lb_f
K	Índice de consistencia de ley exponencial modificada.	$\frac{lb_f s^{-n}}{100 \text{ pies}^2}$
k	Índice de consistencia de ley exponencial.	$\frac{lb_f s^{-n}}{100 \text{ pies}^2}$
k_p	Factor de consistencia en tubería de perforación basado en indicaciones del viscosímetro de lodo a 300 y 600 RPM	$\frac{lb_f s^n}{100 \text{ pies}^2}$
L_m	Longitud de la tubería de perforación.	pies
n_p	Índice de comportamiento en tubería de perforación basado en indicaciones del viscosímetro de lodo a 300 y 600 RPM	<i>Adimensional</i>
n	Índice de flujo ley exponencial.	<i>Adimensional</i>
N	Índice de flujo ley exponencial modificada.	<i>Adimensional</i>
N_{Rea}	Número de Reynolds para espacio anular	<i>Adimensional</i>
N_{Re}	Número de Reynolds genérico	<i>Adimensional</i>

Símbolo	Definición	Unidades
N_{Rep}	Número de Reynolds para tuberías de perforación	<i>Adimensional</i>
P_b	Presión de barrena	$lb_f/pulg^2$
P_{cp}	Presión columna de perforación	$lb_f/pulg^2$
P_{ea}	Presión del espacio anular	$lb_f/pulg^2$
P_{es}	Presión equipo superficial	$lb_f/pulg^2$
P_t	Presión total	$lb_f/pulg^2$
PC	Punto cedente a velocidad de corte cero.	$lb_f/100\text{ pies}^2$
Q	Caudal/Razón de flujo	<i>gpm</i>
Q_c	Caudal critico	<i>gpm</i>
R	Relación del punto cedente	<i>Adimensional</i>
TFA	Área de flujo total.	$pulg^2$
TVD	Profundidad Vertical Verdadera.	<i>pies</i>

Símbolo	Definición	Unidades
V	Velocidad de flujo	<i>pies/min</i>
V_a	Velocidad media de propagación en espacio anular	<i>pies/min</i>
V_c	Velocidad crítica	<i>pies/min</i>
V_{cb}	Velocidad crítica para fluidos que cumplen la modelo plástico de Bingham	<i>pies/min</i>
V_{cp}	Velocidad crítica para fluidos que cumplen el modelo exponencial.	<i>pies/min</i>
V_n	Velocidad de tobera	<i>pies/min</i>
V_p	Velocidad de propagación en la tubería.	<i>pies/min</i>
γ	Velocidad de corte	s^{-1} o <i>RPM</i>
μ	Viscosidad del fluido	<i>cP</i>
μ_A	Viscosidad aparente	<i>cP</i>
μ_e	Viscosidad efectiva	<i>cP</i>
μ_{ea}	Viscosidad efectiva del fluido en el espacio anular.	<i>cP</i>

Símbolo	Definición	Unidades
μ_{ep}	Viscosidad efectiva del fluido en la tubería.	<i>cP</i>
μ_p	Viscosidad plástica	<i>cP</i>
τ	Esfuerzo de corte	<i>lb_f/100 pies²</i>
τ_y	Punto cedente real	<i>lb_f/100 pies²</i>
θ	Esfuerzo de gel	<i>lb_f/100 pies²</i>
ω	Velocidad angular	<i>RPM</i>
ρ	Densidad del fluido	<i>lb_f/gal</i>
α	Factor geométrico.	<i>Adimensional</i>

INTRODUCCIÓN

La Geotermia se dedica al estudio de las condiciones y fenómenos térmicos de la Tierra y se considera como el conjunto de técnicas o procesos industriales que permiten explorar y aprovechar la energía natural almacenada en el interior de la Tierra para ser utilizada en la generación de energía eléctrica. En El Salvador el aprovechamiento de este recurso se inició en 1975 con la explotación de pozos geotérmicos y se ha ido perfeccionando a lo largo de los años mediante estudios y prácticas de campo, los cuales en cierta medida identifican los diferentes problemas asociados al proceso. Uno de los problemas más frecuentes es la pérdida total o parcial del fluido de perforación, la cual representa gastos significativos a las empresas, por lo que mitigar estos problemas es de suma importancia.

La etapa de perforación juega un papel preponderante para la obtención del recurso, sin embargo, el buen desempeño de esta etapa se ve comprometida principalmente por problemas en la formación y estabilidad del pozo, afectando de manera directa al fluido de perforación, el cual tiene funciones importantes como la remoción de recortes del pozo y el control de las presiones de la formación, entre otras. Por lo tanto se necesita un análisis periódico del rendimiento de todas las áreas involucradas en la perforación de pozos geotérmicos.

Uno de los aportes del estudio de pregrado detallado a continuación es evaluar metodologías de formulación de mezclas para el control de pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos. Analizando sus rendimientos a partir de los resultados de las pruebas químicas y pruebas físicas realizadas a cada una de las formulaciones.

I. OBJETIVOS

GENERAL

Proponer metodologías de formulación de mezclas para un mejor control en las zonas de pérdidas de circulación parcial o total, de tal manera que permita la continuidad de las operaciones en la perforación de pozos geotérmicos.

ESPECÍFICOS

- Evaluar casos previos y actuales de pérdidas de circulación de fluidos de perforación durante la perforación de pozos geotérmicos de los cuatro campos geotérmicos existentes en el país, así como las metodologías aplicadas para el control de las mismas.
- Investigar sobre materiales obturantes locales y del exterior que podrían utilizarse para el control de pérdidas parciales.
- Investigar técnicas alternativas o complementarias a la cementación para el control de pérdidas totales de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos.
- Evaluar el efecto de los materiales propuestos en la reología del fluido de perforación a través de diferentes pruebas fisicoquímicas.
- Elaboración de diagramas de tendencia que presenten el comportamiento de concentración versus pruebas fisicoquímicas realizadas.
- Determinar las formulaciones más viables de materiales a utilizar para el control de pérdidas con base a criterios de evaluación técnicos-operativos, económicos y ambientales.

II. ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Tipo de Investigación

El presente estudio se desarrolló mediante tres tipos de investigación: Bibliográfica, Explotaría y Experimental.

Investigación Bibliográfica.

En esta etapa se sustenta la base teórica de la investigación, entre las temáticas de mayor interés para el trabajo realizado se encuentran:

- ✓ Generalidades del tema: La perforación de pozos y en especial de pozos geotérmicos es un tema extenso en cuanto a conceptos y terminología especial utilizada. Para entender de mejor manera la problemática a tratar, es necesario adquirir conocimientos básicos sobre: conceptos claves en el proceso de perforación, fluidos de perforación, pérdidas de circulación, reología de fluidos, entre otros.
- ✓ Antecedentes del problema: orientadas tanto a investigaciones previas así como también a las consultas de bitácoras de operaciones de perforación de pozos en diferentes campos geotérmicos en el país.
- ✓ Materiales obturantes utilizados actualmente y materiales alternativos a estos para el caso de pérdidas parciales.
- ✓ Técnicas alternativas a la de la utilización de tapones de cemento para el caso de pérdidas totales.

Investigación Exploratoria

Se realizaron visitas de reconocimiento a los campos geotérmicos, las cuales permitieron al equipo de investigación identificar las variables y operaciones relacionadas a las pérdidas de circulación, a su vez, en esta parte se verificaron los equipos y materiales disponibles, para poder realizar la fase experimental.

Investigación Experimental

La parte experimental de la investigación se desarrolló a nivel de laboratorio con el objetivo de evaluar el efecto de los materiales obturantes en el batch a inyectar de cada uno de las formulaciones planteadas. Se plantearon diez formulaciones de batch diferentes, cada una de las cuales se varió la concentración de LCM'S en un rango de concentración desde los 0 lb/bbl hasta las 20 lb/bbl. Diez concentraciones en total.

Se realizaron mediciones con el viscosímetro rotacional para conocer la reología de las formulaciones propuestas (viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzos de gel, parámetros de limpieza de pozo), pruebas de filtrado para conocer el nivel de reducción de filtrado de las diferentes combinaciones de materiales obturantes así como el espesor y consistencia de revoque formado y pruebas químicas para corroborar la posible contaminación de los lodos por parte de los LCM'S.

III. ALCANCES

1. Investigación sobre las características de materiales obturantes disponibles para la realización de la fase experimental.
2. Recopilación de las marchas analíticas e instrumentales normalizadas (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001) para la determinación de los parámetros físicos y químicos siguientes: densidad, viscosidad de embudo, propiedades reológicas, filtrado, pH, alcalinidad, azul de metileno, contenido de cloro.
3. Generación de datos y diagramas de tendencia (concentración de LCM'S versus parámetro medido) sobre: reología (viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzos de gel, parámetros de limpieza de pozo), cantidad de filtrado, espesor de revoque de cada una de las diez formulaciones diferentes de batch propuestas. Datos generados únicamente a nivel de laboratorio.

4. Aplicación de un método multicriterial de ayuda a la decisión: Evaluación económica, ambiental y técnica operativa de los batch con mejores resultados de parámetros reológicos.
5. Presentación de diagramas que describen la aplicación en términos operacionales de los batch escogidos mediante la evaluación multicriterial.

IV JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de graduación pretende formar parte de una línea de investigación cuyo propósito es contribuir a la mitigación de las pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos. Dichas pérdidas ocasionan un mal funcionamiento de los equipos y/o derrumbes en las paredes del pozo, que de no ser controladas necesitan la utilización de tapones duros o en el peor de los casos la desestimación del pozo. Esto no solo representa pérdidas de tiempo si no también pérdidas económicas. Las dos tablas siguientes muestran indicadores de costos de convivir con el problema en casos concretos.

García (2013) presenta una aproximación de los costos operativos por día, asociados a la utilización de la técnica de cementación debido a la pérdida de circulación total en un pozo geotérmico a ciento veinticinco metros de profundidad (Ver tabla I).

Tabla I. Detalle de costos operativos en el uso de técnica de cementación durante una pérdida de circulación total en un pozo geotérmico a 125 metros de profundidad.

Desglose de actividades	Costo por día (US\$)
Costo de perforación	24,000
Costo de tapón de cemento	5,000
Costo mano de obra	1,000
Total	30,000

La tabla anterior muestra una relación costo/tiempo debido a pérdidas de circulación, en condiciones de operaciones normales. El monto asciende a \$30,000 diarios de costos operativos para utilizar tapones de cemento

Para dimensionar de mejor manera la magnitud de los costos totales ocasionados por pérdidas de circulación ya finalizada la fase de perforación, se muestran en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Los costos asociados al tiempo improductivo debido a esta problemática dados durante la perforación de los pozos TR-4R, TR-18B, SV-5A. (García & Vásquez, 2013)

Tabla II Costo por días de paro por problemas de pérdidas de circulación en los pozos TR-4R, TR 18B, SV-5A

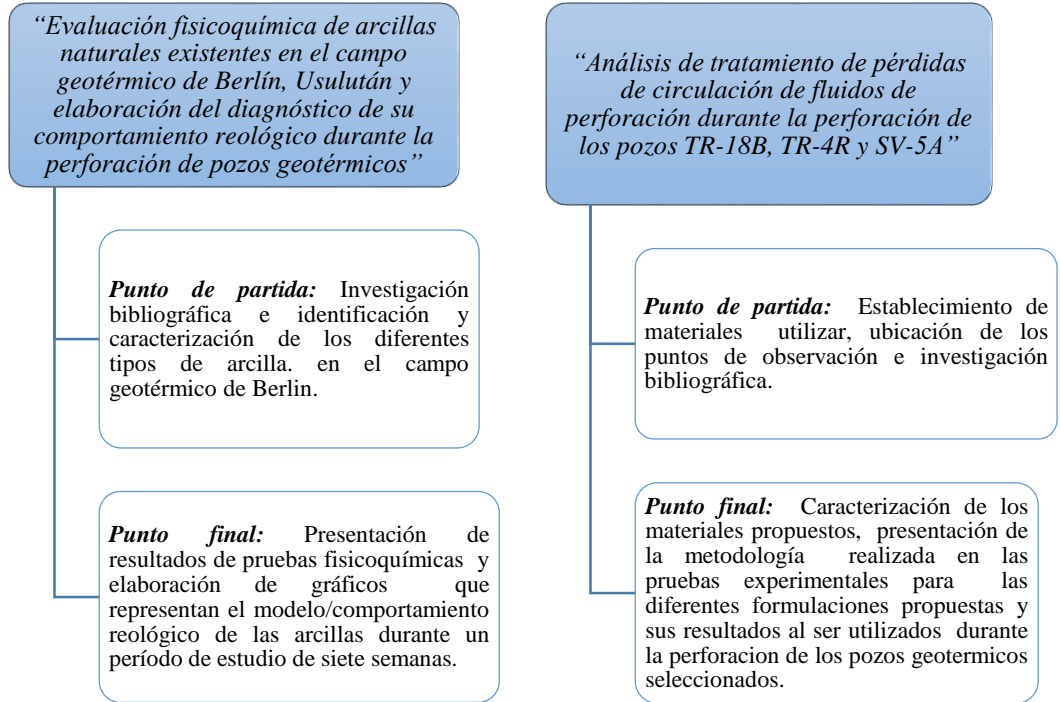
Pozo	Días sin perforación	Costo por días de paro (US\$)
TR-4R	22	528,000.00
TR-18B	16	384,000.00
SV-5A	16	384,000.00
Total		1,296,000.00

Además de las evidentes pérdidas económicas que este problema ocasiona, las pérdidas de circulación del fluido de perforación se convierten en un riesgo ambiental potencial por la proximidad de mantos freáticos que pudiesen ser contaminados.

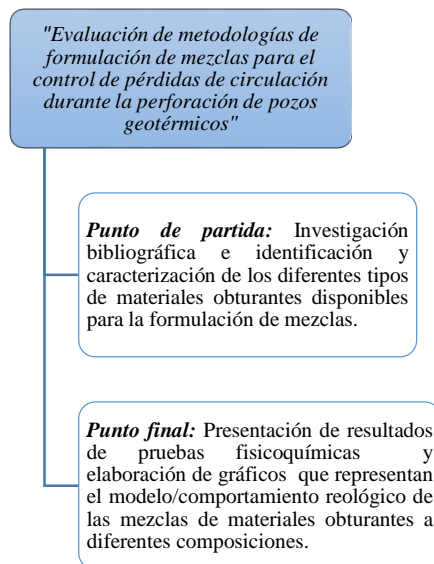
La Universidad de El Salvador y los estudiantes de Ingeniería Química contribuyen con la realización del tercer componente de la línea de investigación anteriormente mencionada la cual se describe con más detalle más adelante.

V LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

✓ Antecedentes.



✓ Presente Investigación.



✓ Futuras investigaciones

"Simulación experimental superficial a escala de laboratorio de los parámetros de operación en el proceso de perforación de pozos geotérmicos"

Punto de partida: Investigación bibliográfica e identificación de los parámetros de operación durante la perforación de un pozo geotérmico.

Punto final: Presentación de un modelo a escala de planta piloto de un sistema de perforación de un pozo geotérmico.

"Evaluación del rendimiento de mezclas de materiales obturantes en pozos geotérmicos específicos que permitan realizar pruebas insitu y un modelado del comportamiento de éstos en el campo"

Punto de partida: Investigación bibliográfica y uso de formulaciones realizadas en trabajos de investigación anteriores .

Punto final: Presentación de resultados de pruebas realizadas en campo y gráficos de tendencia que presenten el comportamiento de las mezclas utilizadas, así como, resultados de las mezclas óptimas para el control de pérdidas de circulación.

1 GENERALIDADES DE LA GEOTERMIA.

La Geotermia se dedica al estudio de las condiciones y fenómenos térmicos de la Tierra, así también, se puede considerar como el conjunto de técnicas o procesos industriales que permiten explotar y aprovechar la energía natural almacenada en el interior de la Tierra para ser utilizada en la generación de energía eléctrica, o bien, para usarla como energía térmica.

1.1 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA Y SU RELACIÓN CON LA GEOTERMIA.

El globo terráqueo desde el centro hasta la superficie está formado por tres capas sucesivas de temperatura decreciente. El **núcleo** sólido en su parte interna puede alcanzar una temperatura de 4200°C y rodeando a éste se encuentra un núcleo líquido compuesto ampliamente de Hierro (Fe), Níquel (Ni) y varios elementos más ligeros. Posteriormente rodeando al núcleo líquido se extiende el **manto** con temperaturas que van desde los 3000°C a 1000°C, compuesto por rocas silíceas, éste posee textura plástica hacia el centro, volviéndose sólido hacia la superficie (Fernandez, 2015).

Como capa superficial se tiene la **corteza** terrestre, más sólida y liviana, flota sobre el manto, desplazándose sobre él, está dividida en corteza continental y oceánica, su temperatura varía desde los 1000°C en su contacto con el manto hasta los 15-20°C de la superficie terrestre. Su espesor varía desde 5 a 20 km en las profundidades oceánicas, y desde 30 a 70 km bajo los continentes. La parte sólida del manto constituye la litosfera, fragmentada a varias placas litosféricas que se desplazan lentamente, unas con relación a otras, pudiendo dar lugar a importantes anomalías térmicas en sus bordes. Así también se tiene la astenosfera que es una zona de débil resistencia, con rocas en constante movimientos cada año, es maleable y puede ser empujada y deformada en respuesta al calor

de la Tierra. (Llopis & Angulo, 2008). A continuación se muestra en la figura 1.1 el núcleo, manto y corteza de la Tierra.

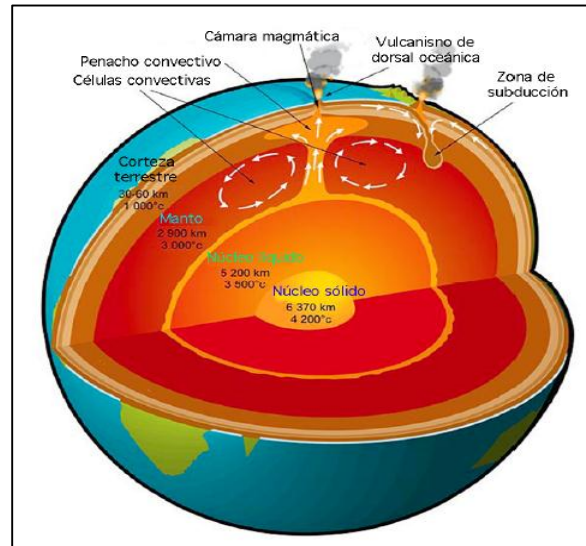


Figura 1.1. Núcleo, manto y corteza de la Tierra

Fuente: Llopis & Angulo, 2008

En la litosfera se da el fenómeno de subducción de placas el cual es un proceso de hundimiento de una placa litosfera bajo otra en un límite convergente, que según la teoría de tectónica de placas propone que la cantidad de superficie de las placas (tanto continental como oceánica) que desaparecen en el manto a lo largo de los bordes divergentes de subducción está más o menos en equilibrio con la corteza oceánica nueva que se está formando a lo largo de los bordes divergentes (dorsales oceánicas).

En las zonas donde la litosfera es más delgada, especialmente en las áreas oceánicas, es empujada hacia arriba y quebrada por el material parcialmente fundido muy caliente, que asciende desde la astenosfera. Éste es el mecanismo que originó y origina las dorsales oceánicas, que se extienden por más de 60,000 Km debajo de los océanos emergiendo en algunos lugares (Azores, Islandia) e incluso desplegándose entre los continentes, como en el Mar Rojo. (Llopis & Angulo, 2008).

En las zonas de subducción la litosfera se pliega y sumerge bajo la litosfera adyacente hasta zonas profundas muy calientes, donde es digerida por el manto y el ciclo se reinicia nuevamente. Parte del material litosférico vuelve al estado fundido y puede ascender hacia la superficie a través de fracturas en la corteza. Consecuentemente, se forman arcos magmáticos con numerosos volcanes paralelos a las fosas, en el lado opuesto al de las dorsales. En las fosas localizadas en el océano, como en el Pacífico Occidental estos arcos magmáticos corresponden a cadenas de islas volcánicas; en las fosas ubicadas a lo largo de márgenes continentales los arcos magmáticos consisten en cadenas de montañas de numerosos volcanes, como en los Andes (Arenivar, Martínez, & Rivera, 2012). En la figura 1.2 se muestra el proceso de tectónica de placas.

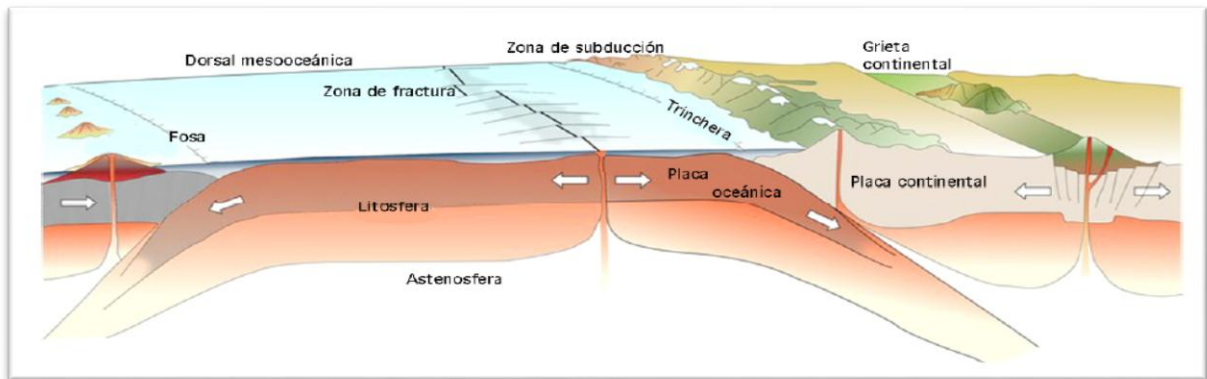
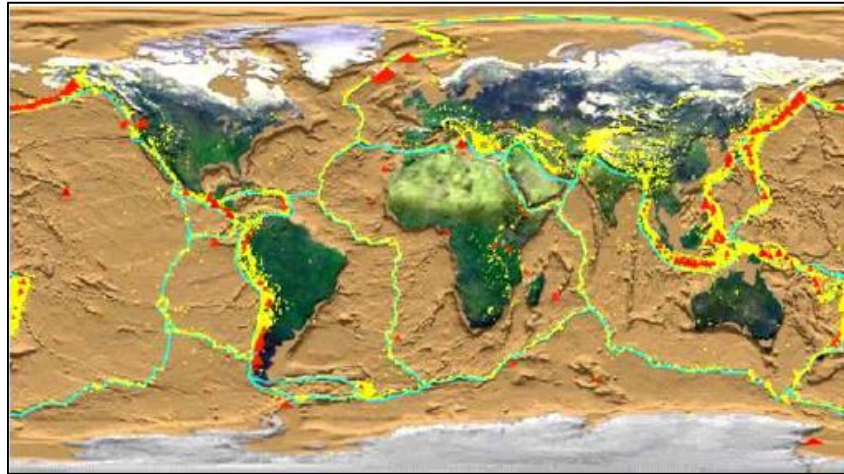


Figura 1.2. Proceso de tectónica de placas.

Fuente: Sociedad Mexicana de Ingeniería, 2015

La mayor expresión de la actividad volcánica, producida por el choque y subducción entre las placas tectónicas, se localiza en lo que se denomina El Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual rodea la línea de la costa occidental del continente americano. Estas zonas presentan una elevada actividad sísmica y volcánica, con un alto potencial geotérmico. En la figura 1.3 se muestra El Cinturón de Fuego del Pacífico.



● Placas Litosféricas ● Actividad Volcánica ● Zonas de subducción

Figura 1.3. Cinturón de Fuego del Pacífico.

Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2015

Las grandes diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y las existentes en su interior originan un flujo continuo de calor hacia la superficie, estimándose que la energía que llega cada segundo a la superficie terrestre, en forma de calor, por conducción, convección y radiación, es de 42×10^{12} J. De ese total 8×10^{12} J provienen de la corteza, la cual representa solo el 2% del volumen total del planeta, 32.3×10^{12} J provienen del manto, el cual representa el 82% del volumen total, y 1.7×10^{12} J provienen del núcleo, que representa un 16% en volumen. (Llopis & Angulo, 2008).

El gradiente geotérmico o aumento de la temperatura de la Tierra con la profundidad es una variable indicativa del potencial geotérmico de un sitio. Un valor normal de gradiente térmico corresponde a un aumento de entre 25 y 30 $^{\circ}\text{C}/\text{Km}$. En algunas regiones, especialmente en aquellas donde se presentan volcanes, el gradiente geotérmico es superior al normal. Comúnmente en estas zonas afloran manantiales de aguas termales que constituyen una evidencia de la presencia de rocas calientes, masas magmáticas o gases volcánicos en ascenso o cerca de la superficie y que provienen del calor del interior de la

Tierra. Las regiones con estas características son promisorias para desarrollos geotérmicos y especialmente, para generación de energía eléctrica.(Marzolf, 2015)

1.2 PROCESO GEOTÉRMICO

El aprovechamiento de la energía geotérmica está constituido por tres procesos principales:

1. Perforación de pozos para extraer el fluido geotérmico del reservorio.
2. Separación y transporte de fluidos en superficie.
3. Conversión de la energía geotérmica a energía eléctrica.

El primero de estos procesos se realiza en el área que se conoce como Campo Geotérmico; en el segundo una parte se lleva a cabo dentro de las instalaciones que se encuentran en el Campo Geotérmico y otras dentro del sitio que se denomina Planta Geotérmica, y el tercer proceso se realiza por completo dentro de la Planta Geotérmica. (Alvarenga, Amaya, & Sibrian, 2004)

Un campo geotérmico (ver figura 1.4), y más ampliamente un recurso geotérmico está situado en un lugar con unas características tectónicas especiales, en el cual ciertas condiciones típicas geológicas, hidrológicas, estructurales y físicas, coexisten, en este lugar se encuentran los siguientes elementos:

- a) Fuente de calor: Dentro de un sistema geotérmico, la transferencia de calor necesaria para la existencia de las características de alta presión y temperaturas en reservorio generalmente se produce a través de intrusiones magmáticas situadas a niveles relativamente profundos de la corteza terrestre (5-15 Km), generalmente presenta temperaturas mayores a 600 °C (Alvarenga, Amaya, & Sibrian, 2004). Esta fuente de calor puede ser una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo, una cámara magmática o gases calientes de origen magmático(Marzolf, 2015).

- b) **Reservorio Geotérmico:** Este estrato está generalmente formado por rocas calientes con baja permeabilidad y gran porosidad, con un volumen suficientemente grande que permiten la circulación de fluidos geotérmicos (agua y/o gases) y su almacenamiento a alta presión y temperatura, además tiene ciertas propiedades de retención que permiten al fluido calentarse en el reservorio cuando la convección ocurre, los coeficientes de viscosidad y dilatación del fluido, también se afectan y se tiene la máxima eficiencia en el sistema. El reservorio es la parte más importante del campo pues es el estrato que almacena el fluido de trabajo (vapor) utilizado para la generación de energía eléctrica. (Energetica, 2003).
- c) **Capa Sello:** Representa el estrato más superficial del sistema, compuesto por formaciones prácticamente impermeables como arcillas (esmectita o montmorillonita) producto de la alteración de las rocas por alta temperatura, estas actúan como un aislante que impide el escape, hacia la superficie, tanto del calor como de los fluidos geotérmicos (agua y/o vapor) almacenados por debajo de ella.
- d) **Reinyección:** La existencia de una formación que tenga capacidad de almacenamiento de fluidos geotérmicos requiere, necesariamente de una alimentación, la cual es generalmente el agua de lluvia, que se infiltra tanto en el campo como en las zonas aledañas al mismo a través de fallas geológicas, chimeneas de volcanes y cualquier otro tipo de permeabilidad que exista en el área.
- e) **Basamento:** Es la base del reservorio y está formado por rocas impermeables, por lo cual la transmisión de calor se produce principalmente, por mecanismo de conducción desde la fuente de calor.

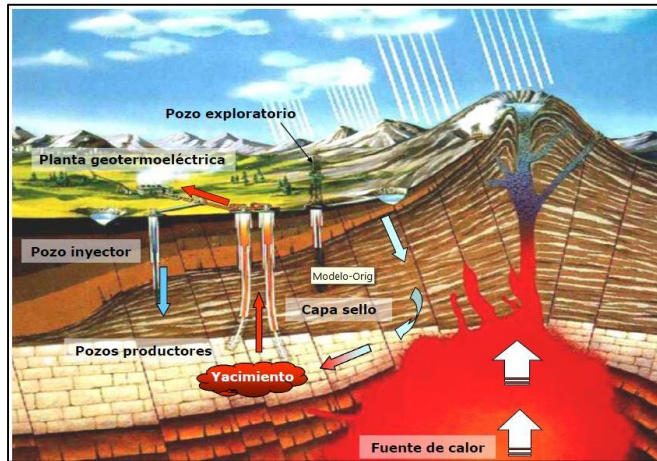


Figura 1.4. Estructura de un campo geotérmico.

Fuente: UNAM, 2015

Un parámetro común para clasificar los recursos geotérmicos es la entalpía de los mismos; ésta es usada para medir el estado de calor contenido por el fluido (energía térmica). Estos se pueden dividir en:

- a) Recursos con baja entalpía: estos son de uso directo, no se utilizan para generación de electricidad, por ser su temperatura inferior a 85°C , si no para sistemas en los que el calor generado, a partir del agua caliente geotérmica, se emplea en calefacción urbana o agrícola, aporte complementario a determinados procesos industriales, etc.
- b) Recursos con mediana entalpía: Cuando la temperatura del fluido sea menor de 150°C , por consiguiente, la conversión vapor-electricidad se realiza a un menor rendimiento, y debe utilizarse como intermediario un fluido volátil. Pequeñas centrales eléctricas pueden explotar estos recursos.
- c) Recursos con alta entalpía: El fluido se encuentra a temperaturas superiores a 150°C en zonas activas de la corteza, se dice que es de calidad eléctrica (alta entalpía). Se produce vapor en la superficie que enviando a sistemas de turbinas, genera electricidad. (Alvarenga, Amaya, & Sibrian, 2004)

1.3 TIPOS DE POZOS GEOTÉRMICOS

Los pozos geotérmicos se subdividen en productores y re inyectores. Los primeros son utilizados para extraer el vapor del reservorio, el cual es conducido hasta la turbina para generar electricidad. En cambio los segundos, conducen el agua residual del campo geotérmico para ser de vuelta al reservorio a través de ellos.

Los pozos suelen tener un diseño telescópico; ya que la perforación se va desarrollando por etapas, en las cuales hay distintos diámetros. En algunos casos se inicia perforando un agujero de 34 pulgadas de diámetro, hasta una profundidad de 100 m. Se corre tubería, se cementa para fijarla al subsuelo y luego se continúa perforando y corriendo tubería de 20 pulgadas y al llegar a la profundidad deseada, se coloca una tubería ranurada de 12 pulgadas de diámetro y es a través de esas ranuras que gracias a la presión del reservorio se extrae la mezcla de vapor y agua caliente hacia la superficie.

En el proceso de exploración de un campo geotérmico, los pozos que se perforan suelen conocerse como exploratorios, y por otro lado dependiendo de la profundidad de los mismos también se les suele conocer como someros o profundos.(Barbara, 2015). A continuación se presenta la clasificación de los pozos geotérmicos:

1.3.1 POZOS EXPLORATORIOS

La perforación de pozos exploratorios es una tarea que se hace en la última fase de la exploración geotérmica. El número, ubicación y profundidad de los mismos estará determinado por los resultados obtenidos en las etapas previas, esto es después de conocer la condición geológica estructural del campo, las zonas de mayor anomalía térmica, la probable ubicación del reservorio y el patrón tentativo de circulación del agua subterránea. El objetivo de estas perforaciones es: corroborar, ampliar y eventualmente modificar los

conocimientos obtenidos en la fase de exploración superficial. A continuación se presentan la clasificación de algunos tipos de pozos exploratorios:

- a) De Gradiente: Usualmente en el rango de 30 a 150 metros de profundidad, y unos 350 metros como máximo; diámetros pequeños en el rango de 2 a 4 pulgadas; se ha perforado con el fin principal de medir el gradiente de temperatura.
- b) De testigo continuo: Tiene como fin principal estudiar en detalle la litología, implicando mayor complejidad y costo. En este tipo de pozos resulta difícil realizar las mediciones y en la actualidad ya no es usual proponerlo debido sobre todo a los limitados alcances.
- c) Exploratorio de múltiple propósito: Se utilizan con el propósito de investigar litología, temperatura, permeabilidad, quimismo, etc. con diámetros alrededor de 12 pulgadas y profundidades máximas de 700 metros, normalmente corresponden a una etapa de pre factibilidad geotérmica.
- d) Exploratorio profundo: Estos son pozos de diámetros entre 8 ½ y 26 pulgadas y profundidades máximas de 1500 metros. Estos pozos dan resultados útiles a los fines de una evaluación del potencial energético y de una delimitación de la zona de mayor interés para extraer el recurso.

Durante la perforación de pozos exploratorios se efectúan tareas como:

1. **Reconstrucción de la secuencia estratigráfica.** El control de esta secuencia es muy importante para programación de las operaciones de perforación: elección de trépanos, fluido de perforación, programa de perforación, diseño del pozo, etc. Consiste en las siguientes operaciones:
2. **Muestreo del fluido.** Tiene por finalidad detectar todos los estratos productores atravesados durante la perforación con el fin de reconstruir el esquema hidrológico y su columna estratigráfica.
3. **Medidas de temperatura.** Las medidas de temperatura se realizan mediante el registro de temperatura dinámico y estático que permiten diferenciar las zonas del pozo en las cuales la transmisión de calor se hace por conducción (horizontes

impermeables) y otras en las que predominan los fenómenos convectivos (horizontes permeables).

4. **Medidas de presión.** Tiene como objetivo conocer el nivel del fluido en el pozo, presiones de formación de los fluidos y presión en el pozo en función de las condiciones de cabeza de pozo (durante la inyección o producción)-
5. **Registros eléctricos.** Se usa para conocer la verdadera resistividad de la formación y reconocer horizontes fracturados o variaciones litológicas en la secuencia estratigráfica.

1.3.2 POZOS DE EXPLOTACIÓN.

Los pozos de explotación permiten el uso completo de las técnicas de perforación. Este grupo comprende los pozos de explotación, de reinyección y de propósitos especiales, estos últimos en general combinados.

El término "explotación" engloba no solamente la acción principal de producción (extracción del fluido); sino también el caso más general en que ésta puede ser combinada con reinyección (retorno al subsuelo del líquido residual obtenido al haber separado el vapor utilizable para impulsar un turbogenerador), y otros propósitos o necesidades propias de una utilización, tales como la expansión o delimitación del campo (en área y en profundidad) o el perfeccionamiento en el manejo del mismo. De hecho algunos de estos últimos son posteriormente utilizados como productores, re inyectores o para observar el comportamiento de la explotación. Algunas características propias de cada uno de estos tipos de pozo son las siguientes:

- a) Pozo de Producción: Reúnen las máximas exigencias en todo sentido. Si resultan no productivos o con déficit en la calidad comercial, lo cual no es extraño dentro de la gran heterogeneidad de los reservorios geotérmicos, pueden eventualmente servir como re inyectores si su ubicación relativa dentro del campo lo permite. A veces se hacen pequeñas modificaciones al interior del pozo para adecuarlo al nuevo uso. En

otros casos, se utilizan como pozos de monitoreo para la presión y/o temperatura del reservorio.

- b) De reinyección: Se diseñan específicamente en relación a la profundidad y diámetro del agujero a reinyectar; pero su diseño mecánico satisface las mismas exigencias que un pozo productor. De hecho en algunos casos un pozo que fue previsto para reinyección puede operarse en producción si casualmente ese fue el resultado y la conveniencia final. La profundidad total depende de si el esquema previsto de reinyección es arriba, al mismo nivel o por abajo del reservorio principal.
- c) De propósitos especiales: Cuando se hacen para verificar la extensión del reservorio en profundidad pueden eventualmente ser más grandes que pozos productores existentes; pero su comportamiento mecánico sigue siendo esencialmente el mismo ya que requieren ser previstos como para operar en una eventual producción.

Las profundidades máximas de estos pozos son de 3000 metros, prácticamente la perforación de estos implica seguir la misma metodología para la perforación de un pozo de exploración con la diferencia en el diámetro de pozo, ya que lo de explotación o producción tienden a ser de mayor diámetro y por lo general, por razones económicas un pozo de exploración de acuerdo a las características o propiedades del fluido encontrado puede ser reorientado como un pozo de producción.

1.4 DESARROLLO DE LA GEOTERMIA EN EL SALVADOR

El desarrollo de la geotermia en El Salvador inicia en 1950 con un mapeo geológico realizado en aquel entonces por el Dr. Meyer Abich, lo cual causó que desde 1954, El Salvador iniciara su primera exploración geotérmica, donde se identificaron cinco sitios prioritarios por su potencial de energía geotérmica. Estos son Ahuachapán, Cuyanausal, San Vicente, Berlín y Chinameca. Posteriormente en 1963 la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL) con ayuda de las Naciones Unidas perforó los pozos exploratorios: AH-I, CH-I, TR-I, PL-I y SR-I. Es así como la perforación AH-I ayudó a

decidir el desarrollo del campo geotérmico de Ahuachapán antes que Berlín. Durante los años 1960 y 1970, se realizó un estudio de factibilidad para la instalación de 100MW, 18 áreas fueron atractivas y cinco de ellas fueron investigadas; Ahuachapán, Berlín, Chipilapa, Parras Lempa y Santa Rosa de Lima, realizando perforaciones en estas áreas y sincronizando la red nacional.(Barrios, 2015)

Las estimaciones del Departamento de Energía de los Estados Unidos indican que hasta 1999 se contaba con un total de 2,210 - 4,140 MW como potencial energía geotérmica El Salvador. En 2002, sólo 119MW de la 161MW de la capacidad instalada de generación geotérmica en El Salvador estaba disponible. La energía generada a partir de recursos geotérmicos totalizó 940 GWh, que comprendía en ese entonces el 24% del total nacional. Para el 2003 los dos campos geotérmicos principales se encontraban en Berlín, con una capacidad instalada de 66MW, y Ahuachapán, con una capacidad instalada de 95MW. (Kenty-Joan, 2004).

2 PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS.

Finalizada la fase exploratoria (la cual tiene por objeto: estimar el volumen del reservorio, la temperatura del fluido, predecir el potencial de generación de energía eléctrica en un tiempo mínimo de 20 años, etc.), se prosigue con la fase de explotación (DiPippo, 2012), la cual a su vez tiene por objetivo construir un pozo útil, es decir, un conducto desde el reservorio hasta la superficie, que permita su explotación racional en forma segura y al menor costo posible.

La perforación de pozos pertenece al pequeño grupo de actividades de ingeniería que están tan influenciadas por factores locales y quizás por condiciones subterráneas desconocidas, que rara vez existe una ubicación que invite a la aplicación de un método preciso de perforación y de construcción de pozos(Hofkes & Huisman, 1983). Por lo que el tipo de perforación se escoge en función de diferentes factores tales como: el tipo de roca a perforar, profundidad del agujero, abastecimiento de agua, etc. A continuación se presentan los tipos más comunes de perforación que se utilizan en la perforación de pozos geotérmicos.

2.1 TÉCNICAS DE PERFORACIÓN.

Existen dos técnicas básicas de perforación que se utilizan en la fase de explotación de pozos geotérmicos, la primera de ellas es la perforación por percusión de cable y la segunda es la perforación rotatoria, sin embargo, es importante mencionar que solo existe un tipo de perforación por percusión, caso contrario al sistema rotatorio, el cual puede tener diversas variantes (Culver, 1998). A continuación se exponen los conceptos básicos de cada uno de estos tipos de perforación.

2.1.1 PERFORACIÓN POR PERCUSIÓN (HERRAMIENTA DE CABLE).

La perforación de percusión con herramienta de cable es un método muy antiguo; ya que se le usaba hace más de 1,000 años en China. Básicamente el método no ha cambiado, pero se ha mejorado enormemente las herramientas. Es adecuado para la perforación tanto de excavaciones pequeñas como de excavaciones grandes de hasta 300-500 m. La perforación por percusión de cable utiliza un equipo barato, sin embargo su mayor desventaja es ser un método muy lento (Culver, 1998). Esto constituye una limitación en su uso en países en vías de desarrollo, en donde a menudo se necesita perforar un gran número de pozos lo más rápido posible.

En la perforación de percusión con herramienta de cable, se levanta y se deja caer una pesada barrena o trépano de perforación para quebrar la roca y así abrir camino dentro de la formación. Un juego de herramientas se encuentra suspendido de un cable de acero que se hace pasar por una polea cabecera con un sistema de amortiguación formado por resortes y soportes de caucho, en la parte superior del equipo de perforación y bajo una polea tensora al extremo de un balancín. Luego pasa encima y sobre una polea posterior para enrollarse en un tambor de freno conocido como carrete de giro o carrete principal (Figura. 2.1).

Una varilla de conexión transmite movimiento desde una manivela de carrera variable hasta el extremo libre del balancín, el que imparte en sí mismo una acción recíproca al cable y a las herramientas suspendidas.

El juego de herramientas (Figura. 2.2) consiste en una barrena o trépano de perforación (cortadora) bajo un vástago de perforación, luego un porta cable giratorio conteniendo un mandril dentro del cual se asegura el cable.

Los perforadores se funden en acero de alto carbono y se requiere que penetren, trituren, mezclen y ensanchen. Los perforadores para formaciones duras tienen un ángulo directo de penetración, una gran área transversal (para proporcionar mayor fuerza) y tienen pequeños canales de agua a los lados; los perforadores para un estrato de arcilla suave tienen un borde

filoso, ángulos amplios y grandes canales de agua con un área pequeña para permitir una reciprocidad a través de una lechada viscosa.

Originalmente casi todos los equipos de herramientas de cable estaban equipados con un soplador para proveer aire a una forja para el afilamiento y reformación de la barrena o trépanos, pero actualmente la mayoría de los equipos cuentan con máquinas de soldadura eléctrica portátiles con las cuales se puede aplicar una soldadura por pasos transversales moderadamente fuerte en el lado del trabajo.

La barra de perforación está ubicada sobre la barrena o trépano para proveer peso y más estabilidad direccional. Asimismo, mediante su acción de bombeo, mueve el material cortado hacia arriba, lejos de la barrena.

El objeto que se encuentra más al extremo en el juego de herramientas es el portacable giratorio. Éste tiene la doble función de adherir el cable metálico a las herramientas e impartir una rotación continua. Dentro del casquillo se encuentra un mandril en el cual se asegura la línea de perforación. El hombro del mandril consiste en una superficie lisa, endurecida, que se localiza dentro del porta cable y lleva todo el peso del juego de herramientas.

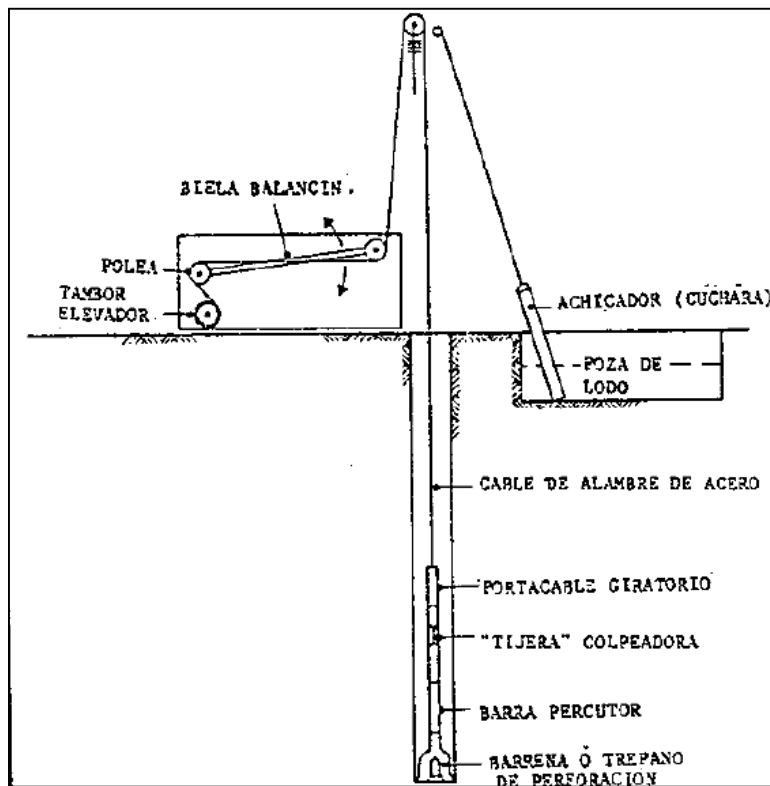


Figura 2.1. Equipo de perforación por percusión
Fuente: Hofkes & Huisman, 1983.

La línea de perforación es una varilla de cable de acero no pre moldeado, de torsión izquierda. Cuando se inicia la perforación, el peso de la herramienta desarrolla en el cable una rotación en sentido de las agujas del reloj y transmite esta tensión a través de la cara del mandril hacia las herramientas, oponiéndose a cualquier tendencia de que las uniones de herramientas puedan desenroscarse hacia la mano derecha. Entonces las herramientas comienzan lentamente a rotar, moviendo la barrena a una nueva posición con cada golpe, asegurando así la perforación de un pozo circular, a continuación se ingresa agua al pozo en cantidades pequeñas hasta que alcance un abastecimiento natural. El propósito del agua es producir lechada del material cortado y suspender este material sobre y fuera de la cara de la barrena. Enfriar y lubricar el juego de herramientas son funciones menores.

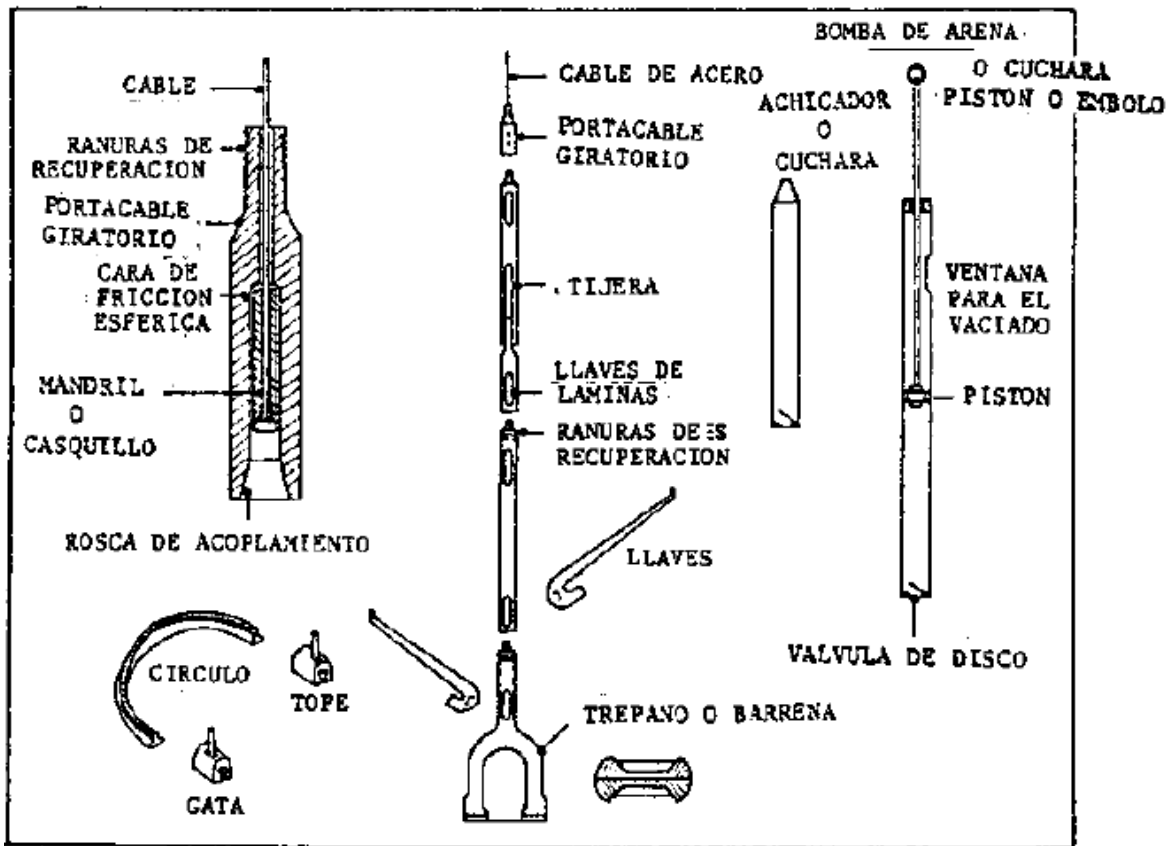


Figura 2.2. Herramientas de percusión.
Fuente: Hofkes & Huisman, 1983.

Ahora el equipo de perforación está en operación y, suponiendo que no haya ningún cambio de estrato, continuará hasta que el operario sienta literalmente, que el desplazamiento de la lechada demora las herramientas. Entonces el operario disminuirá los golpes del equipo para ponerlo al ritmo de las herramientas por un momento, o limpiara la perforación, una operación inevitable tarde o temprano.

Para este propósito, se utiliza un achicador (o cuchara). Se retira las herramientas y se hace ingresar el achicador al pozo de una línea separada llamada cable de cuchara. El achicador consiste en un tubo de acero con una válvula de disco en el fondo. La lechada llena el achicador y es levantada a la superficie y vertida en la poza de la lechada repitiéndose la operación hasta que se limpie la perforación (Hofkes & Huisman, 1983, págs. 371-379).

La perforación de percusión de cable tiene varias ventajas ante métodos rotativos, entre las cuales destacan (Culver, 1998):

- No hay posibilidad de estancamiento en las formaciones con el fluido de perforación.
- El equipo es más barato, fácil de mantener y puede ser operado por una o dos personas.
- Los datos tanto cualitativos como cuantitativos pueden ser obtenidos durante la perforación, incluyendo medidas de flujo, temperaturas, nivel estático del agua, etc.

Por otro lado las desventajas pueden ser las siguientes.

- Los rangos de profundidad de penetración son limitados.
- Los preventores de fugas son difícilmente adaptables.
- El método está limitado a agujeros verticales.
- El un método muy lento de realizar.

2.1.2 PERFORACIÓN ROTATORIA.

La perforación rotatoria (Figura 2.3) es el método de perforación más común tanto en pozos de agua así como también en pozos geotérmicos, principalmente en países en vías de desarrollo en la que la velocidad de ejecución es un factor crucial (Hofkes & Huisman, 1983). Existen varias variantes, cada uno con sus ventajas y desventajas, las cuales se presentan a continuación.

2.1.2.1 CIRCULACIÓNDIRECTA.

En este sistema se realiza la perforación mediante una barrena o trépano giratorio llamado comúnmente trícorno, desgastadora y trituradora que muele o rompe la formación mientras que el material cortado y el suelo aflojado son retirados de la perforación mediante una circulación continua de un fluido de lavado. La perforación rotatoria es particularmente

adecuada en formaciones de terreno suelto y roca suave. Se puede hacer perforaciones de gran diámetro a profundidades considerables. La más grande desventaja es el requerimiento de cantidades sustanciales de agua, donde puede ser un serio problema principalmente en las áreas donde escasea. La figura 2.4 muestra los elementos básicos de una plataforma de perforación rotativa convencional.

El fluido usualmente basado en arcilla, es mezclado en poza de lodo o tanque y es bombeado a presión elevada a través de una manguera flexible hasta la parte superior de una columna giratoria de herramientas llamada columna de perforación. Entonces fluye a través de las herramientas hasta el fondo del pozo y regresa a la superficie y nuevamente hacia dentro del pozo de lodo.

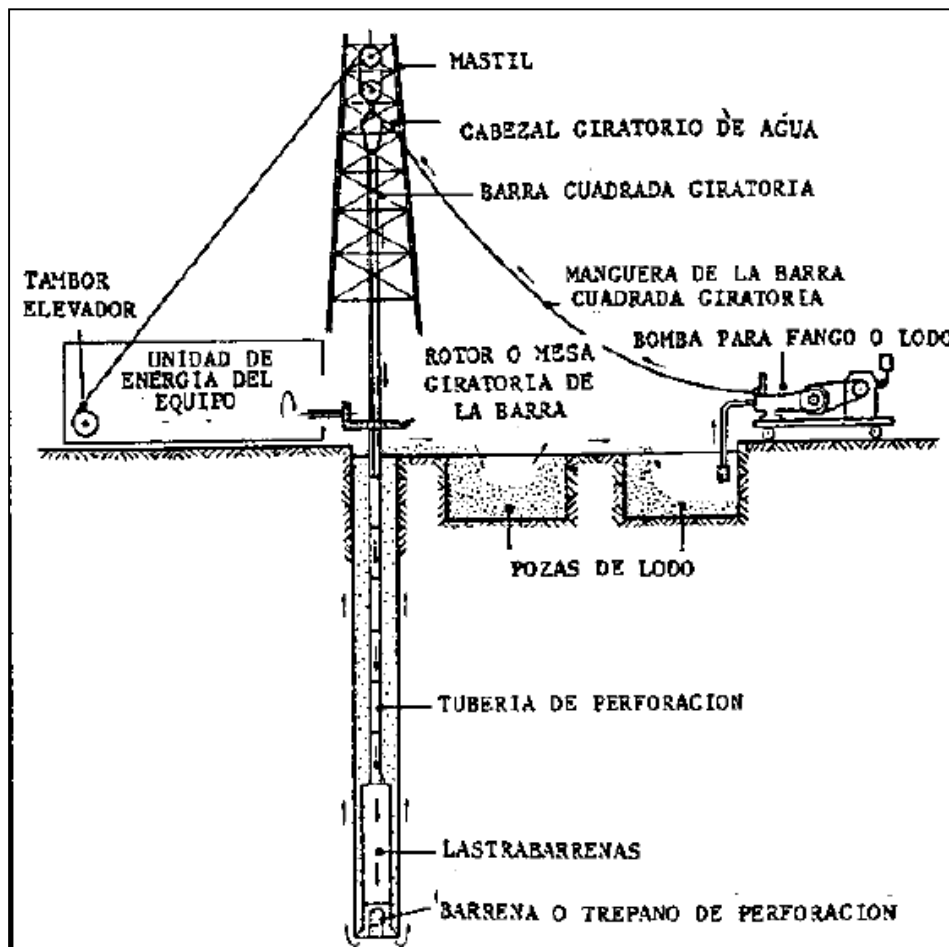


Figura 2.3. Perforador rotatorio de circulación directa normal.

Fuente: Hofkes & Huisman, 1983

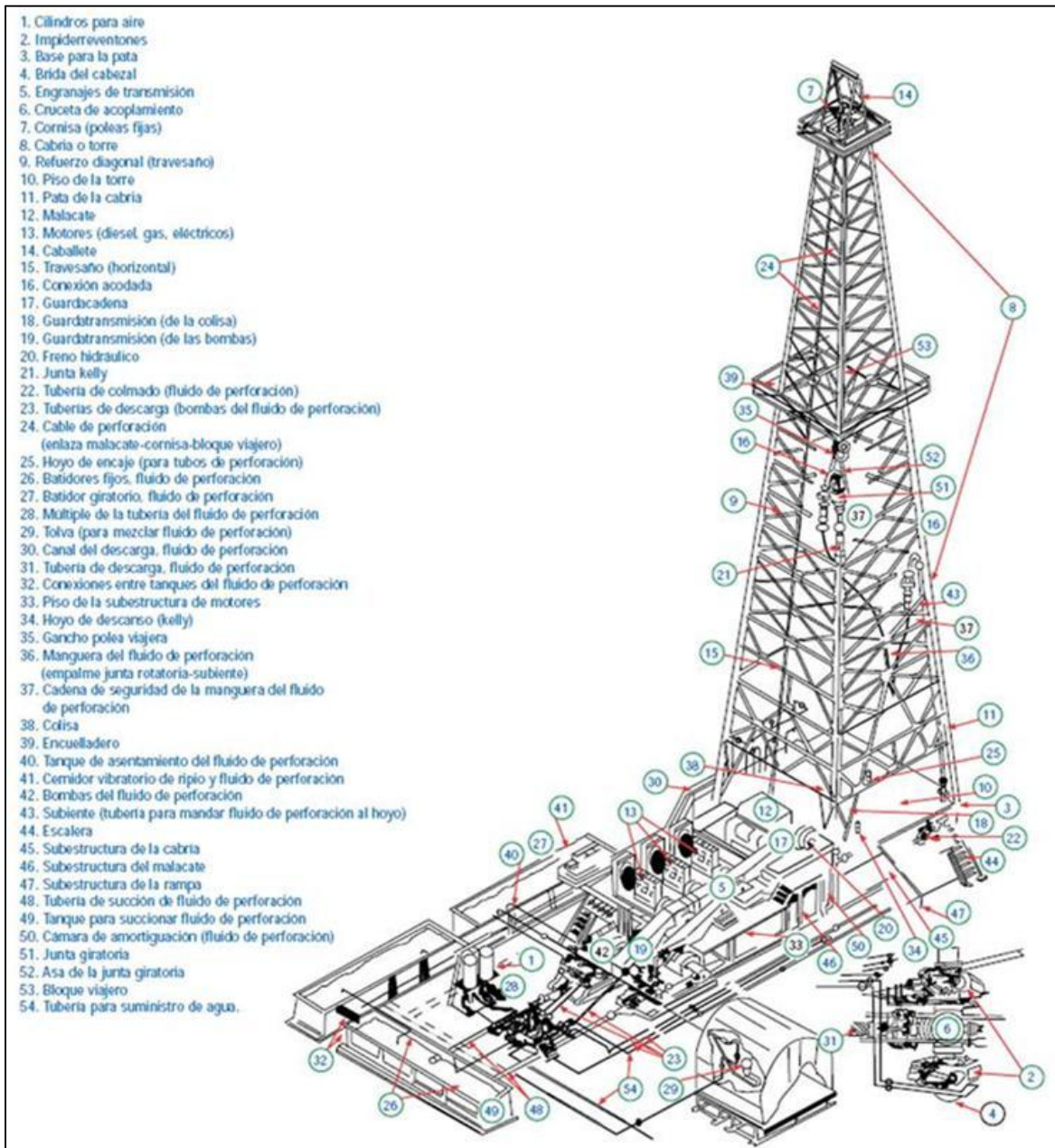


Figura 2.4. Equipo de perforación rotatoria.

Fuente: Culver, 1998.

En la base de columna de perforación se encuentra la barrena o trépano que es del tipo rodillo cortador (tríconos) o, menos comúnmente el tipo de barrena de aleta plana. Una barrena de rodillo para roca lleva tres o cuatro cortadores dentado de acero duro que tienen vías de paso para conducir el fluido que enfría y lubrica a los rodillos; limpia los dientes y evita el material cortado.

Se aplica la barrena al fondo de la perforación y gira a velocidades de 3-30 rpm (dependiendo del diámetro y del estrato) y se aplica un peso dentro de una escala de 250-2,750 kg por 25 mm de diámetro.

Las restricciones de versatilidad y rectitud mencionadas para perforaciones hechas con percusión, se aplican igualmente a los pozos rotatorios, pero la perforación rotatoria sufre una desventaja en cuanto a que se debe colocar un peso continuo en la barrena y consecuentemente la gravedad tiene menos efecto en la columna de herramientas. Sin embargo, generalmente se puede lograr una perforación libre de ensortijados debido a la influencia estabilizadora de los drill collar de perforación. Los drill collar de perforación son tuberías extra pesadas que se colocan sobre la barrena para proveer el peso necesario y para ayudar a una perforación recta. Además, como son de gran diámetro en relación al pozo, resultan en un anillo más pequeño provocando una velocidad aumentada de fluido que aparta rápidamente el material cortado de la vecindad de la barrena. Lo ideal es que la mayor parte de la longitud de la columna de herramientas esté tensa desde el trepano de ruedas de corona (tríconos) del equipo de perforación, pero esto no siempre es posible y alguna veces se añade peso por medio de un mecanismo hidráulico o de un mecanismo de cadenas conocido como un “tira-abajo”, (mecanismo para ejercer presión, empuje en forma descendiente de la columna).

La longitud principal de la columna de perforación consiste en tuberías de perforación que se agregan conforme aumenta la profundidad, se extienden desde la parte superior de los drill collar de perforación hasta la superficie. Por lo general tienen longitudes de 3-10 m y se selecciona el diámetro para que esté de acuerdo a las condiciones de perforación, por ejemplo, el diámetro libre a través de la tubería y uniones debe ser tal que resulte en la

pérdida mínima de carga en el fluido descendente y la tubería de perforación debe ser lo suficientemente grande para promover una velocidad de fluido suficientemente elevada para un tamaño dado de bomba de lodo.

La longitud última de la tubería es de construcción especial y se le llama barra cuadrada rotatoria. Su propósito es transmitir conducción rotatoria desde el rotor o mesa rotatoria y, por lo tanto, es una sección cuadrada, hexagonal o redonda con ranuras para caber en una abertura correspondiente en la mesa rotatoria. Esto facilita el movimiento vertical libre y así permite que la barra cuadrada rotatoria alimente la perforación, conforme se procede a la perforación, o que se le retire.

Conforme avanza la perforación y se lleva a la superficie el material cortado, la barra cuadrada rotatoria pasara a través del rotor hasta que la unidad del cabezal giratorio llegue a éste. Entonces se detiene la alimentación, se puede disminuir la rotación y se permite al fluido circulante continuar llevando, por corto tiempo, el material cortado más reciente fuera de la barrena y de los drill collar de fisura. Entonces se detiene la bomba, se retira la barra cuadrada giratoria y se desenrosca de la tubería de perforación, mientras la segunda es sostenida en los rines de la mesa giratoria. Se añade otra tubería de perforación y se le hace descender con la columna de la tubería hasta que esté al nivel de la mesa, cuando se adhiere nuevamente la barra cuadrada rotatoria y se reinicia la circulación. Se engancha la rotación y finalmente se aplica la barrena una vez más al fondo de la perforación. Se repite el procedimiento anterior hasta que se alcance la profundidad final o se retire las herramientas para cambiar las barrenas (Hofkes & Huisman, 1983, págs. 379-382).

2.1.2.2 CIRCULACIÓN INVERSA.

Este método difiere del sistema más común de circulación directa en que se hace circular el fluido de perforación en dirección invertida. Básicamente, el equipo es similar en arreglo general pero considerablemente más grande; por ejemplo, el camino del agua a través de las

herramientas, tuberías de perforación, cabezal giratorio y barra cuadrada rotatoria, rara vez es menor a 150 mm de diámetro (Figura 2.5). El diámetro de perforación mínimo práctico está en el orden de 400 mm pero se conocen tamaños que exceden los 1.8 m.

Las barrenas o trépanos tricónicos convencionales de la escala del diámetro anterior no serían prácticas y, por lo tanto, es usual colocar una barrena de rodillo de roca. Sobre la barrena se atornilla un tubo de bridas de diámetro máximo. Éste contiene un tubo central del mismo diámetro interior de la tubería de perforación. Las aberturas al extremo del tubo exterior permiten que el agua limpia de flujo descendente pase sin obstáculos. A este conjunto se le llama estabilizador y evita que las herramientas deriven lateralmente.

Se descarga agua y el material cortado en una gran laguna temporal cuyo tamaño es determinado por el método práctico de que el volumen no debe de ser inferior a tres veces el volumen de la perforación excavada. Un pozo de 750 m² excavado a 60 m requeriría una laguna de 12 m de largo, 8 m de ancho y 1 m de profundidad. A menudo se divide o se desvía la laguna para favorecer el asentamiento del material cortado en una área bastante distante del canal que hace regresar el agua limpia a la perforación.

Rara vez se usa el lodo debido a que una de las ventajas de la perforación con circulación invertida es que se impone agua relativamente limpia sobre el acuífero y, por lo tanto, no hay invasión de formación.

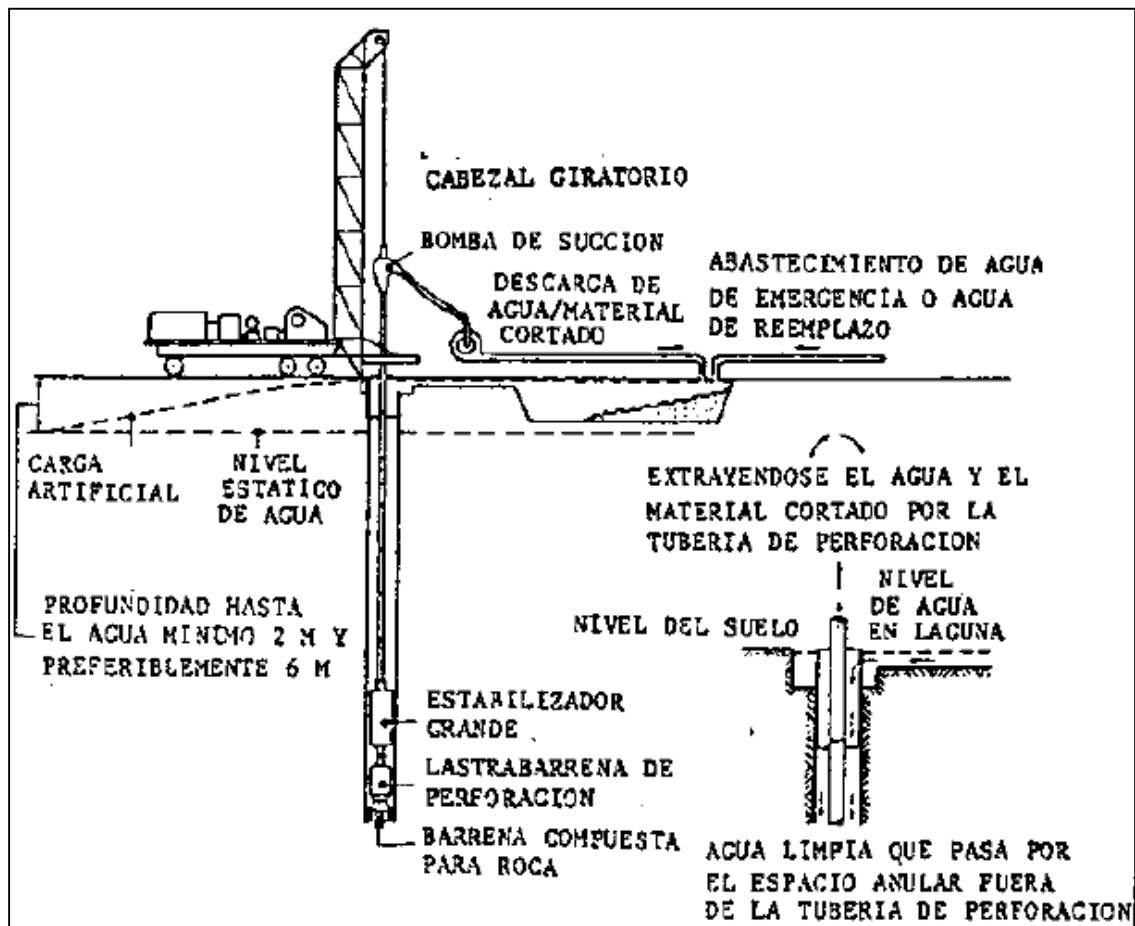


Figura 2.5. Perforador rotatorio de circulación invertida.

Fuente: Hofkes & Huisman, 1983

La principal ventaja de este método es el ritmo muy rápido de perforación en diámetros grandes, especialmente en gravas y arenas no consolidadas, a su vez, es obvio que una carga de agua impuesta sobre un estrato no consolidado implica pérdidas de agua. En vista de esto, uno de los requisitos de la perforación de circulación inversa es la fácil y cercana disponibilidad de un abastecimiento sustancial de agua para propósitos de limpieza (Hofkes & Huisman, 1983, págs. 382-384).

Las ventajas y desventajas de la circulación inversa son las siguientes (Culver, 1998)

Ventajas:

- La reducción en la velocidad del espacio anular reduce la probabilidad de erosión del pozo.
- Disminución en el uso de fluido de perforación, evitando de esta manera daños en la formación por la invasión del fluido

Desventajas:

- Mayor demanda de agua.
- La química del fluido de perforación puede alterarse debido a las grandes cantidades de aire que efectivamente remueve el dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno y otras especies.

2.1.3 PERFORACIÓN POR MARTILLO PERCUSOR (MARTILLO NEUMÁTICO).

Uno de los métodos más populares en la perforación de pozos geotérmicos es el método del martillo neumático. Es particularmente útil cuando se trata de perforar rocas metamórficas (Culver, 1998). No se trata de un método rotatorio, sino de un método de percusión adaptado a una herramienta rotatoria (Figura. 2.6).

La introducción de la perforación por martillo marcó un paso significativo en el desarrollo de herramientas de perforación adecuadas para suelo duro, la principal ventaja de este método es su gran velocidad, ya que, generalmente toma 2 días perforar hasta 100 m de granito o gneis. Más aun, el equipo de perforación es muy ligero, comparados con los equipos de herramienta de cable (percusión) y de perforación rotatoria (Hofkes & Huisman, 1983). No se requiere agua para el lavado con chorro, lo que hace que este método sea especialmente adecuado para áreas con escasas de agua.

Un martillo que actúa con aire y con un solo pistón, que funciona con el mismo principio del martillo perforador de carreteras, se coloca debajo de un juego de tuberías de perforación. Además, se anexa al martillo un juego de barrena de tungsteno-carbono.

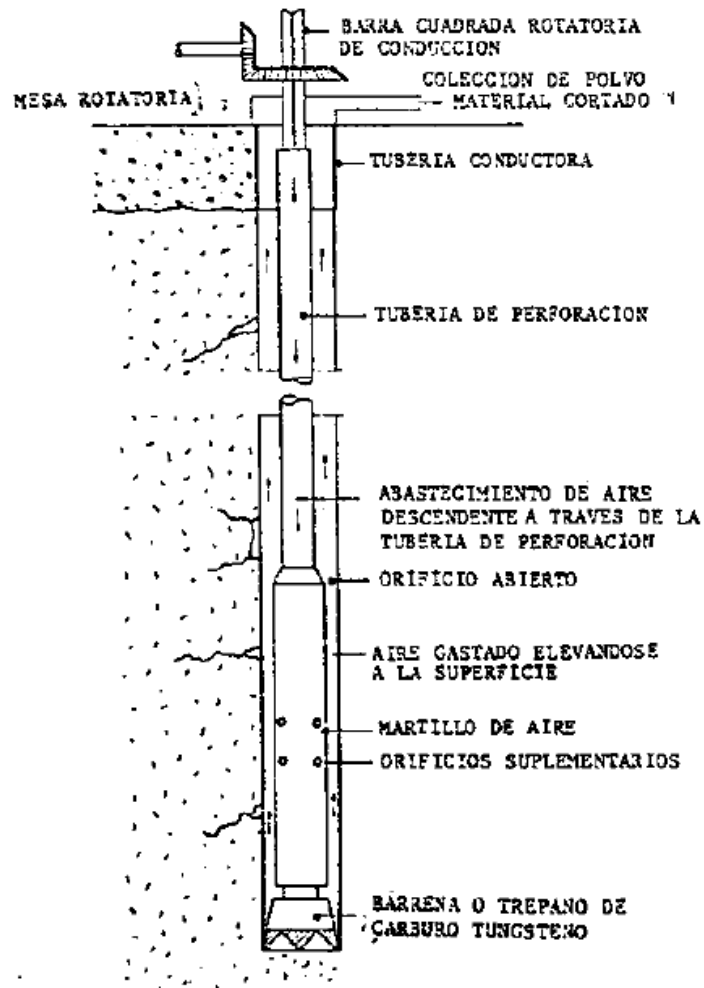


Figura 2.6. Perforador de martillo neumático.

Fuente: Hofkes & Huisman, 1983

3 SISTEMAS DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN

Como se mencionó en el capítulo anterior, la perforación del tipo rotatoria es la que se utiliza en la perforación de pozos geotérmicos, por lo que este capítulo hace referencia a los sistemas del equipo de dicho tipo de perforación.

Las diferentes bibliografías que describen a los sistemas de perforación, los nombran de diversas maneras, sin embargo en general el concepto es el mismo (Cruz, 2011) establece a los sistemas del equipo de perforación de la siguiente forma: “Los equipos de perforación están compuestos por cinco sistemas básicos los cuales son:

1. Sistema de Levantamiento
2. Sistema de Rotación.
3. Sistema de Circulación
4. Sistema de Potencia.
5. Sistema de Seguridad “

El Instituto Americano del Petróleo (2001), agrega un sistema más, para la perspectiva esquemática de un equipo de perforación rotatoria; el sistema de tuberías y equipo de manejo de tuberías (p.6).

Una descripción breve de cómo interactúan los sistemas de perforación rotatoria anteriormente mencionados sería la siguiente:

El término rotaria proviene del movimiento físico de la *sarta de perforación y la broca* (2), el cual va aplicando una fuerza rotaria de corte a la roca en el fondo del pozo. La rotación puede ser aplicada en superficie a toda la sarta o bien por un motor en fondo a una parte del ensamblaje de fondo (Bottom hole assembly, BHA). La sarta de perforación consiste en un sistema de tuberías de acero el cual conduce en su interior el fluido de perforación hasta la broca de perforación. Esta sarta de perforación es una combinación de tuberías; tubería de

perforación (standard), tubería de perforación más pesada (Heavy Weight Drill Pipe HWDP), de mayor diámetro y calibre, y lastrabarrenas (Drill collars) aún más pesadas.

Toda esta sarta es montada en la torre de perforación que tiene un sistema para el movimiento vertical (hacia adentro y hacia fuera) de dicha sarta (1). Este sistema está compuesto de: el *malacate*, el conjunto de poleas en la *corona*, el *bloque viajero* y la *línea de perforación*. La rotación de la sarta en superficie es aplicada a la sarta por una de dos maneras: Por medio de un sistema de *kelly*, o por medio de un *Top Drive*.

El fluido de perforación, comúnmente llamado *lodo de perforación*, se almacena en *tanques* o *piscinas*, y desde allí el lodo puede ser bombeado a través del *standpipe* a la *swivel* donde entra a la *kelly* o al *Top Drive*, luego por toda la sarta de perforación hasta la broca, antes de regresar a la superficie a través del *anular*, (el espacio entre la sarta de perforación y las paredes del hueco). Y al regresar a la superficie el lodo es pasado por varios elementos del equipo de control de sólidos para que le sean retirados los *cortes de la perforación*, antes de regresar a los tanques de lodo y completar el ciclo completo (3).

Las formaciones en la sección superficial de un pozo, generalmente están aisladas por tubo conductor de acero de diámetro grande, llamado *revestimiento* o *casing*, El cual ha sido cementado en su sitio. El espacio anular por el cual el lodo regresa a la superficie es ahora el espacio entre el interior del revestimiento y el exterior de la sarta de perforación. A este revestimiento se conectan las *válvulas preventoras* o *BOPs* (Blow Out Preventors) (5), una serie de válvulas y sellos que pueden ser usados para cerrar el anular o la boca completa del pozo con el fin de controlar altas presiones de fondo cuando se presentan.

Todo el equipo descrito anteriormente se opera con un sistema central de energía (4), el cual también suministra la energía para el alumbrado eléctrico, para las compañías de servicio, etcétera. Además de las bombas utilizadas para movilizar el fluido de perforación. Normalmente, esta fuente de energía es una planta eléctrica movida por un motor diésel. (Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001)).

A continuación se realizará una breve descripción de la funcionalidad de cada uno de estos sistemas, en un equipo de perforación:

3.1 SISTEMA DE LEVANTAMIENTO

El sistema de levantamiento tiene como función: “proveer un medio para bajar o levantar sartas de perforación o de revestimiento y otros equipos de subsuelo (Garvizú & Martínez, 2015). Proporciona tanto el equipo necesario como las áreas de trabajo.

Los equipos de perforación deben tener mucha potencia para levantar y suspender el peso de largas columnas de perforación y tuberías de revestimiento. Este sistema de levantamiento debe tener suficiente capacidad para superar cualquier resistencia causada por tramos estrechos dentro del agujero y “sacudir” o tirar de la tubería atascada (Instituto Americano del Pétroleo, 2001)

Los componentes del sistema de levantamiento se pueden identificar en dos secciones; La estructura soportante y el equipo para el izaje o levantamiento de cargas

La estructura soportante está compuesta por tres elementos: la sub estructura, el piso del equipo de perforación y la torre de perforación (Schlumberger, 2006). En la siguiente figura se pueden observar dichos componentes:

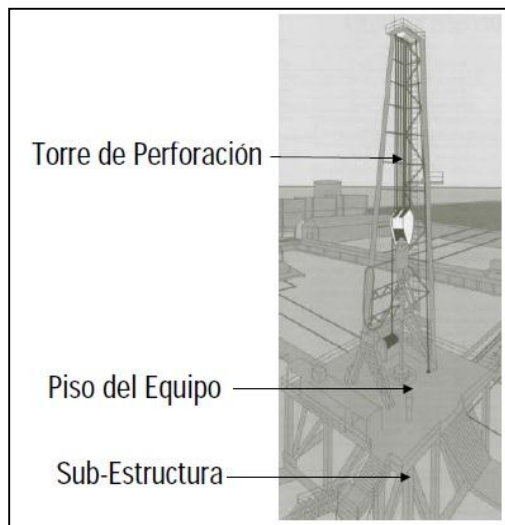


Figura 3.1. Componentes de la estructura soportante del sistema de levantamiento del equipo de perforación

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

El *equipo de izaje* está compuesto comúnmente por los siguientes elementos:

- ✓ Malacate
- ✓ Corona
- ✓ Bloque viajero
- ✓ Gancho
- ✓ Elevador
- ✓ Mástil o torre (Schlumberger, 2006).

En la figura 3.2 se muestran algunos de los componentes antes mencionados:

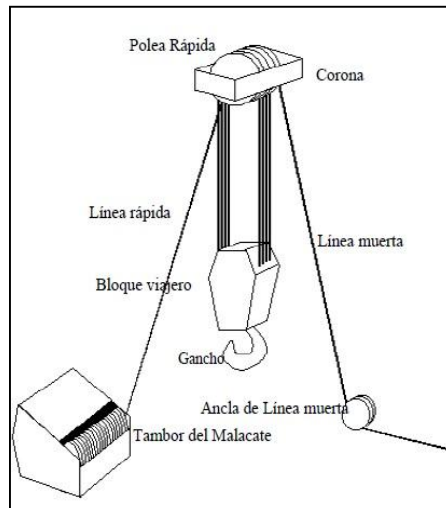


Figura 3.2. Componentes del equipo de izaje.

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

Sobre la mesa del taladro siempre se estará soportando todo el peso de la sarta de perforación, ya si la sarta está en cuñas o bien si la sarta está colgada en la torre de perforación. El tamaño y la capacidad de carga del taladro es el factor limitante para el peso de tubería que puede soportar un taladro y por lo tanto la profundidad hasta la cual puede perforar.

La altura de la torre determinará el tamaño de las paradas de tubería que podrán ser almacenadas sobre la mesa del taladro cuando la tubería se saque del pozo. Durante esta operación, la tubería será quebrada en *paradas dobles* o *triples* (de dos o tres juntas).

Durante las operaciones de perforación, la sarta y la Kelly o el Top Drive serán soportadas por el bloque viajero por medio del gancho, a su vez sostenidos al malacate con la línea de perforación por un sistema simple de poleas.

La *línea de perforación* se enrolla y desenrolla en tambor del malacate, según se suba o se baje el bloque viajero. Desde el malacate, la línea va hasta el conjunto fijo de poleas en la corona, y desde allí a las poleas en el bloque viajero, el cual queda suspendido de la torre por un número de líneas, generalmente 8, 10 o 12, y por último por la línea muerta donde el cable está debidamente asegurado.

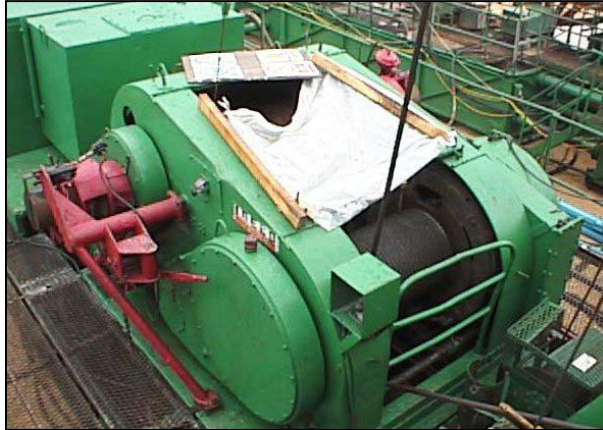


Figura 3.3. Tambor del malacate y línea rápida a la corona

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

Esta sección, llamada línea muerta, llega al ancla, situada a un lado de la torre. Del ancla la línea pasa a un carrete de almacenamiento, donde se almacena para irlo reemplazando a medida que se vaya desgastando. El otro extremo de la línea, el cual está asegurado al malacate se le llama línea rápida, pues se mueve a mayor velocidad que las otras secciones entre poleas y del malacate sale a la polea rápida.

El malacate tiene un sistema de freno de alta capacidad, lo cual permite controlar la velocidad de la sarta de perforación. Durante la perforación, el malacate permite controlar y ajustar la parte del peso de la sarta que es soportado por la torre y por consiguiente el restante es aplicado a la broca. Este peso es llamado peso sobre la broca, se ajusta según la dureza de la roca y la fuerza requerida para producir fractura física de la formación, permitir la penetración y continuación de la profundización del pozo.(Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001)

3.2 SISTEMA DE ROTACIÓN

El sistema de rotación es el encargado de proporcionar la rotación necesaria a la sarta para que la mecha pueda penetrar la corteza terrestre hasta las profundidades donde se

encuentran los reservorios. Este sistema lo conforman: El ensamblaje rotatorio, la sarta de perforación y la barrena. (Garvizú & Martínez, 2015).

El Instituto Americano del Petróleo (2001) hace referencia a que el ensamblaje rotatorio se puede realizar mediante tres métodos:

1. La mesa rotatoria y el kelly hacen girar la columna de perforación y la barrena.
2. Un motor de rotaria viajera (“top drive”) hace girar la columna de perforación y la barrena.
3. Sólo se hace girar la barrena con un motor hidráulico de lodo en la columna de perforación. (La columna de perforación puede permanecer estática o girar mientras se usa un motor de fondo, de la manera deseada) (p. 9).

Un sistema convencional de rotación tiene los siguientes tres sub-componentes principales:

1. Ensamblaje de mesa rotatoria

Entre los principales constituyentes del ensamblaje rotatorio según Garvizú y Martínez (2013) se encuentran:

- ✓ *Mesa rotatoria o colisa:* La colisa va instalada en el centro del piso de la cabria. Descansa sobre una base muy fuerte, constituida por vigas de acero que conforman el armazón del piso reforzado con puntales adicionales.
- ✓ *La junta giratoria:* La junta giratoria tiene tres puntos importantes de contacto con tres de los sistemas componentes del taladro. Por medio de su ada, cuelga del gancho del bloque viajero. Por medio del tubo conector encorvado, que lleva en su parte superior, se une a la manguera del fluido de perforación, y por medio del tubo conector que se proyecta de su base se enrosca a la junta kelly.
- ✓ *La junta Kelly:* Generalmente tiene configuración cuadrada, hexagonal o redonda y acanalada, y su longitud puede ser de 12, 14 o 16.5 metros. Su diámetro nominal tiene rangos que van de 6 cm hasta 15 cm y diámetro interno de 4 cm a 9 cm. El peso de esta junta varía de 395 kg a 1.6 tonealadas (p. 6).

2. Columna de perforación

Comenzando en el fondo, una columna de perforación básica para la perforación rotatoria consta de (1) la barrena, (2) portamechas y Conjuntos de Fondo (BHA Botón-Hole Assembly), y (3) tuberías de perforación. El Conjunto de Fondo está ubicado justo encima de la barrena y se compone de portamechas combinados con uno o varios estabilizadores de aletas (para mantener el Conjunto de Fondo y la barrena concéntricos), posiblemente un ensanchador (para evitar el ahusamiento del pozo a medida que el diámetro de la barrena se desgasta) y otras herramientas. (Instituto Americano del Pétroleo, 2001)

Tuberías de perforación

Las tuberías de perforación que se utilizan en las operaciones de pozo son las siguientes;

- Tubería de perforación (TP)
- Tubería de revestimiento
- Drill collar (DC)
- Heavy Weight (tubería pesada, KW)

La *tubería de perforación* es aquella que se utiliza para realizar viajes al fondo del pozo con el objetivo de perforar, circular, reparar y otros, también es llamada tubería de trabajo, normalmente mide 9 metros.



Figura 3.4. Fotografía de tuberías de perforación

Fuente:[http://www.shiruida.com/en/productshow2.asp?tID=20081048683958&nam=Drill
%20pipes](http://www.shiruida.com/en/productshow2.asp?tID=20081048683958&nam=Drill%20pipes)

La *lingada y/o parada* es aquel grupo de tubería de perforación formado por dos o tres tubos, la lingada de tres por lo general mide veintisiete metros.

La *tubería de revestimiento* es aquella tubería que es introducida a un pozo y cementada con el objetivo de aislar zonas débiles o formaciones deleznable.

El *drill collar (DC)* es la tubería de mayor diámetro exterior a la tubería de perforación y de menor diámetro interior a la tubería de perforación, utilizada para darle peso a la barrena y se coloca arriba de ella.



Figura 3.5. Fotografía de tuberías del tipo drill collar (DC)

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

La *heavy Wright drill pipe (HWDP)* es del mismo diámetro exterior que la tubería de perforación pero de menor diámetro interior, por lo tanto su peso unitario es mayor a la tubería de perforación, pero menor al del *drill collar (DC)*, se coloca arriba de los DC (Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001).



Figura 3.6. Fotografía de las tuberías tipo HWDP

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

Barrena

Al girar bajo el peso de la columna de perforación, la barrena rompe o raspa la roca que está por debajo. Las primeras barrenas rotatorias eran “barrenas de arrastre” porque raspaban la roca. Como se parecían a la cola de un pez, recibieron el nombre de “barrenas cola de pescado”. Estas barrenas eran eficaces para perforar formaciones blandas, pero sus aletas se desgastaban rápidamente en rocas duras. Por lo tanto se necesitaba una mejor barrena rotatoria, y a principios de 1900 se introdujo la barrena de rodillos.

Barrenas de rodillos (para rocas). Una barrena de rodillos también llamada barrena para rocas, tiene dos o tres fresas cónicas que ruedan a medida que se hace girar la barrena. La superficie del rodillo cónico tiene dientes que entran en contacto con la mayor parte del fondo del agujero a medida que los conos ruedan sobre la superficie. Estas barrenas perforan fracturando las rocas duras y ranurando las rocas más blandas. También se produce una acción de raspado, porque los ejes de los conos están descentrados en relación con el eje de rotación. El peso sobre la barrena, la velocidad de rotación, la dureza de la roca, la presión diferencial, y la velocidad y viscosidad del fluido de perforación afectan la velocidad de penetración de las barrenas. Las toberas contenidas dentro del cuerpo de la barrena aumentan la velocidad del lodo, produciendo un chorro cuando el lodo sale de la barrena.

Esto contribuye a una perforación más rápida. Las barrenas para rocas se clasifican según los tipos de cojinetes y dientes que tienen. Los tipos de cojinetes incluyen (1) cojinetes de rodillos no sellados, (2) cojinetes de rodillos sellados y (3) cojinetes lisos. Cuando se hace referencia a las barrenas en base a los tipos de dientes que tienen, se usan los siguientes términos: (1) dientes de inserto y (2) barrenas de carburo de tungsteno (TCI – Tungsten Cabida Insert). El diseño del cojinete es importante para la vida útil de una barrena; los cojinetes sellados y los cojinetes lisos proporcionan una vida útil más larga que los cojinetes no sellados, pero son más costosos. Los dientes de una barrena para rocas - su forma, tamaño, número y colocación - son importantes para asegurar la eficacia de la perforación en diferentes formaciones. Las barrenas de dientes fresados tienen dientes que son maquinados a partir del mismo lingote metálico que el cono. En algunos casos, los dientes son revestidos con metal duro para aumentar la vida útil.

Este tipo está diseñado para formaciones suaves a medianamente duras donde los dientes largos pueden ranurar la roca. Los dientes de las barrenas de dientes de insertos son en realidad espárragos de carburo de tungsteno insertados en agujeros perforados dentro de los conos

Las barrenas TCI perforan generando una acción de trituración para formaciones más duras y más abrasivas. Algunas barrenas de dientes de insertos son mejoradas con insertos especiales caracterizados por la aplicación de una capa de diamante policristalino sobre el carburo de tungsteno. Esto les proporciona una vida útil aún más larga que el carburo de tungsteno solo.

Barrenas de diamante y PDC. Las barrenas de cortadores fijos con superficies cortantes de diamante son usadas para la perforación de formaciones medianamente duras a duras, cuando se requiere una vida útil extra larga de la barrena, o para operaciones especiales de extracción de núcleos. Las barrenas de cortadores fijos de una pieza usan fragmentos de diamante natural o pastillas de diamante sintético como cortadores.

Las barrenas de diamante natural usan diamantes naturales de calidad industrial dispuestos en una matriz de acero, de la manera indicada en la barrena saca núcleos de diamantes naturales

Durante la rotación, los diamantes naturales expuestos raspan y trituran el pozo. Los cortadores de diamantes sintéticos, llamados Cortadores de Diamantes Policristalinos (PDC), están configurados de manera que los cortadores rompan por esfuerzo cortante la roca que está por debajo de la barrena, produciendo recortes de gran tamaño y grandes velocidades de penetración. Las barrenas de PDC tienen gran demanda para perforar en muchos tipos de rocas, pero especialmente en largas secciones de formaciones medianamente duras a duras. Las barrenas de PDC son muy durables y eficaces, ofreciendo mayores velocidades de penetración y una larga vida útil. Se fabrican barrenas de PDC de distintos diseños para optimizar la perforación en formaciones particulares. Típicamente, las barrenas de PDC perforan con mayor rapidez en las lutitas que en las areniscas, y se usan con mayor frecuencia para perforar largas secciones de lutita. Ambos tipos de barrenas de diamante funcionan de una manera similar a las antiguas barrenas de arrastre “cola de pescado”, porque perforan raspando la roca (Instituto Americano del Petróleo, 2001, p.1.6).

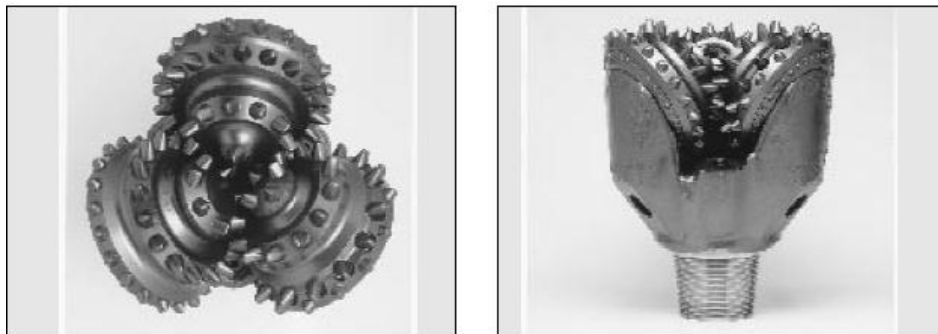


Figura 3.7. Barrena para rocas tipo (TCI)

Fuente: Instituto Americano del Petróleo, 2001

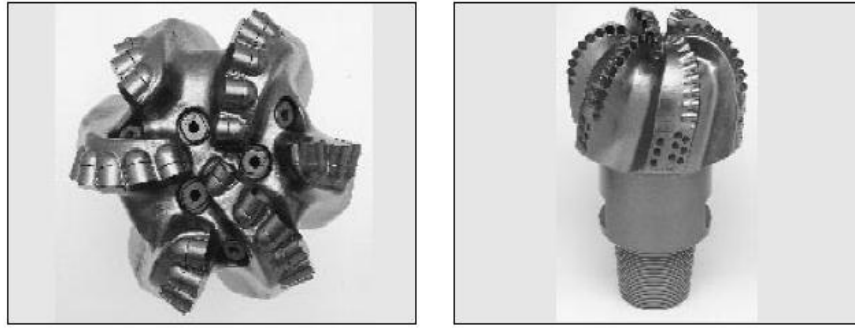


Figura 3.8. Barrena de PDC (cortadores de diamante policristalino)

Fuente: Instituto Americano del Pétroleo, 2001

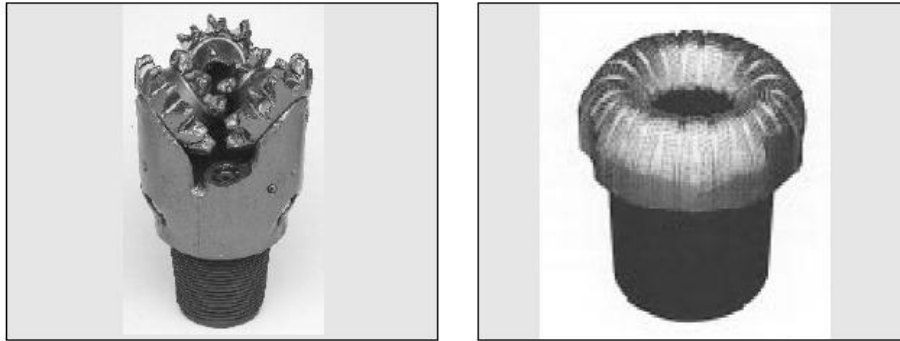


Figura 3.9. Barrena para rocas de dientes fresados y barrena saca núcleos de diamantes naturales

Fuente: Instituto Americano del Pétroleo, 2001

Estabilizadores (Conjunto de fondo)

Entre los elementos de Conjunto de Fondo (BHA) más importantes se encuentran los estabilizadores. Estos son unos tramos cortos de tubería (Subs.) posicionados entre los drillcollars con el fin de mantenerlos centrados dentro del hueco, mantener el pozo derecho y por medio de la acción de corte mantener el diámetro correcto en las paredes del pozo. El diámetro completo del pozo se consigue con unas ‘Cuchillas’ montadas en el cuerpo del estabilizador, las cuales pueden estar hechas de aluminio o caucho macizo, o más

comúnmente, de acero con insertos de carburo de tungsteno dispuestos en la caras cortantes. Los estabilizadores se pueden clasificar como de cuchillas rotantes o no rotantes, o como de cuchillas espirales o rectas. (Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001)

3.3 SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL LODO Y ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS

Este sistema es el encargado de mover el fluido de perforación en un círculo cerrado de circulación, succionándolo de los tanques activos y enviándolo por medio de las líneas de descarga hacia la cabría, y pasando luego a través de las conexiones superficiales, de la sarta de perforación, de las boquillas de la mecha y de los espacios anulares hasta retornar nuevamente a los tanques activos, pasando por los equipos separadores de sólidos. Los componentes del sistema de circulación son: El fluido de perforación, espacios anulares, línea de retorno y equipos separadores de sólidos (Garvizú y Martínez, 2013).

En lo que se refiere a la descripción de un sistema de circulación de lodo, resulta lógico comenzar con las bombas de lodo. Estas bombas y los motores que las accionan representan el “corazón” del sistema de lodo, de la misma manera que el lodo en circulación constituye el alma de la operación de perforación. Las bombas de lodo son bombas de desplazamiento positivo, algunas de las cuales producen hasta 5.000 psi (libras por pulgada cuadrada). Estas bombas son accionadas por motores diésel o eléctricos. (Instituto Americano del Petróleo, 2001).

Las *bombas de lodo* son el componente más importante de un sistema de circulación así como la potencia mecánica suministrada por ésta, ya que de esto dependerá el gasto y la presión requeridos para una buena limpieza del pozo. Se compone de dos partes: Mecánica e Hidráulica.

En la perforación rotatoria se utilizan dos tipos de bombas:

- ✓ *Bombas dúplex:* Estas bombas se caracterizan por estar constituidas de dos pistones y manejar altos gastos pero baja presión de descarga. Son de doble acción, o sea que bombean el fluido en dos sentidos. En la actualidad estas bombas se utilizan en los equipos que reparan pozos o en perforación somera. La presión máxima recomendada de trabajo para estas bombas es de $3,000 \text{ lb/plg}^2$.
- ✓ *Bombas triplex:* Están constituidas por tres pistones de acción simple y se caracterizan por manejar altas presiones de descarga y altos gastos y son de fácil mantenimiento. Estas bombas son las más utilizadas para la perforación de pozos. Está compuesta por dos partes:

El *extremo mecánico* que es la parte de la bomba donde se recibe el impulso de potencia por los motores eléctricos o mecánicos, está formado por la biela, flecha impulsora, piñón y catararinas.

La *parte hidráulica* que consiste en el cuerpo de la bomba en el que se alojan las camisas, vástagos, pistones, asientos, válvulas de asiento, resortes, empaques, tapas, tornillos, tuercas y prensa estopa. Todos los elementos en conjunto e internos de la bomba, realizan la tarea de succionar el fluido de las presas y descargarlo a presión por las líneas de descarga a donde sea dirigido (Frías, 2008, p. 68).



Figura 3.10. Fotografía de una bomba triplex

Fuente: Hawker, Vogt, & Allan, Procedimientos y Operaciones de Pozo, 2001

Para producir la presión y el caudal requeridos para un conjunto específico de condiciones de perforación, será necesario seleccionar los tamaños correctos de émbolo y camisa para las bombas, y especificar los tamaños apropiados de tobera para la barrena. Este proceso se llama optimización de la hidráulica y constituye un factor clave en la perforación eficaz.

Después de salir de la bomba de lodo a alta presión, el fluido de perforación sube por el tubo vertical, un largo tubo vertical atado al pie de la torre de perforación, pasa a través de la manguera del kelly (manguera de perforación) (cuello de cisne) y luego fluye hacia abajo dentro del kelly. Después, el lodo viaja a través de la columna de perforación hasta alcanzar la barrena. En general, una barrena tiene dos o más toberas (chorros) que aceleran el lodo para obtener un chorro de gran velocidad. Este chorro de lodo de gran velocidad lava el fondo del pozo para mantener limpios los cortadores de la barrena y proporcionar una nueva superficie de roca a la barrena.

A partir del fondo del pozo, el lodo sube por el espacio anular que existe entre la columna de perforación y el pozo, transportando los recortes generados por la barrena. El lodo y su carga de recortes fluyen fuera del “niple de campana”, pasando a través de una tubería inclinada de gran diámetro (línea de flujo) hasta llegar sobre una o varias mallas vibratorias de tela metálica montadas sobre la zaranda. Este concepto consiste en hacer caer el lodo a través de las mallas, separando la mayoría de los recortes (de tamaño más grande que la apertura de la tela metálica de la malla) del sistema de circulación. Después de pasar a través de la malla, el lodo cae dentro de un tanque de asentamiento. Éstos son tanques metálicos rectangulares de gran tamaño, conectados por tuberías o canales.

El tanque de asentamiento (trampa de arena) no es agitado, de manera que los sólidos residuales de gran tamaño puedan sedimentarse por separado del lodo. A partir del tanque de asentamiento, el lodo pasa dentro de fosos de lodo agitados, ubicados corriente abajo, donde se separa el gas, la arena y el limo. Después de eso, el lodo entra en el tanque de succión, donde las bombas lo extraen para hacerlo circular de nuevo dentro del agujero. El tanque de succión también se usa para agregar productos químicos de tratamiento y aditivos acondicionadores del lodo. En este tanque se usa una tolva de lodo provista de un medidor

Venturi para agregar aditivos secos tales como las arcillas y los agentes densificantes (Instituto Americano del Petróleo, 2001, p. 1.12).

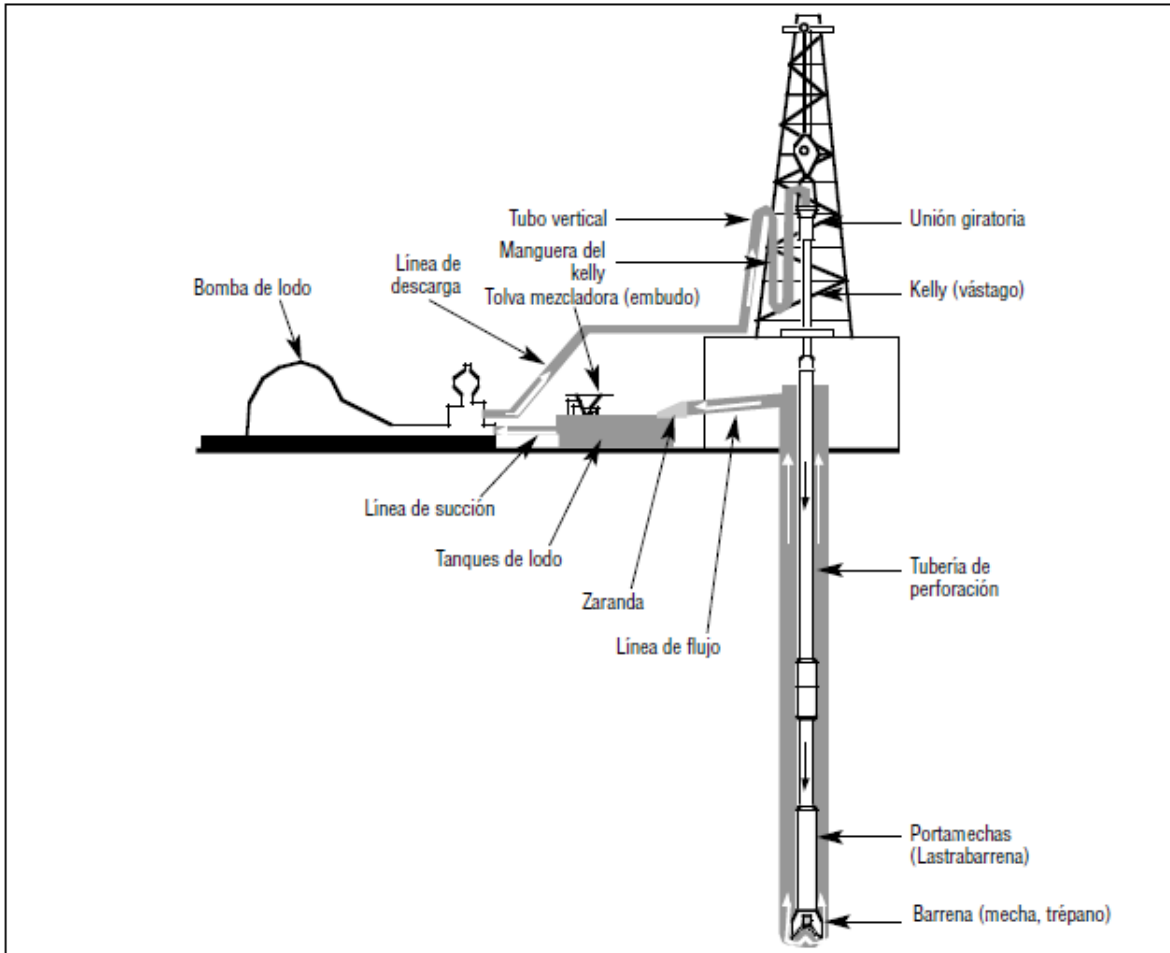


Figura 3.11. Esquema de un sistema de circulación en perforación rotatoria

Fuente: Instituto Americano del Petróleo, 2001

3.4 SISTEMA DE POTENCIA

La potencia generada por los motores primarios debe transmitirse a los equipos para proporcionarle movimiento. Si el taladro es mecánico, esta potencia se transmite directamente del motor primario al equipo. Si el taladro es eléctrico, la potencia

mecánica del motor se transforma en potencia eléctrica con los generadores. Luego, esta potencia eléctrica se transmite a motores eléctricos acoplados a los equipos, logrando su movimiento. Existen tres formas básicas en las cuales un taladro distribuye o transmite potencia:

- ✓ *Sistemas de potencia AC a DC o SCR (silicium controller rectifier).* En un sistema eléctrico AC a DC el motor diésel alimenta un generador AC también llamado alternador. Desde el generador AC la corriente eléctrica es enviada al SCR (Silicon Controller Rectifier). Un SCR es un instrumento electrónico de estado sólido de alta tecnología. El SCR convierte AC en DC, accionando equipo como:- Bomba de Lodo.- Malacate.- Mesa Rotaria. El equipo auxiliar como las bombas pequeñas y el alumbrado necesitan corriente alterna de menor voltaje, se usa un transformador para reducir el voltaje para el equipo eléctrico auxiliar del taladro.
- ✓ *Sistemas de potencia DC a DC.* En esta clase de sistema, los motores diésel le transmiten potencia a generadores de corriente directa. Desde el generador, la corriente DC va a un panel de control y a los motores de corriente directa que accionan:-Las Bombas de Lodo.-Malacate.-Rotaria. Un pequeño generador de corriente alterna también es parte del sistema. Se usa para suministrar corriente alterna al equipo que funciona mejor con este tipo de corriente, como la bomba para mezclar químicos.
- ✓ *Sistema de potencia mecánica:* Los taladros mecánicos usualmente son más pequeños que los taladros eléctricos. Los motores le transmiten energía al compound, y de allí la energía pasa a las bombas de lodo, malacate y sistema de la rotaria. Los motores accionan una transmisión mecánica compuesta la cual transmite potencia al malacate, sistema de la mesa rotaria y a las bombas de lodo. El equipo auxiliar como motores pequeños recibe corriente alterna de un alternador conectado al prime mover o motor principal. Motores DC: Usualmente grandes motores DC le suministran potencia a las bombas de lodo, malacate y mesa rotaria o top drive. Algunas

veces el malacate acciona mecánicamente la mesa rotaria, pero en algunos equipos la rotaria tiene su propio motor. El perforador puede controlar la velocidad del motor DC con mucha precisión, por ello se prefieren los motores DC sobre los AC. Con un control preciso de la velocidad, el perforador puede manipular mejor el malacate, la bomba de lodo y la mesa rotaria.

3.4.1 MOTORES AC

Algunos elementos pequeños del taladro también necesitan potencia. Por ejemplo las bombas centrífugas mueven lodo desde un tanque para súper cargar la entrada de las bombas de lodo. En este caso es más eficiente usar pequeños motores para alimentarlas en lugar de usar los motores principales, fluido hidráulico o aire. Otro motor AC suministra potencia a las aspas de un agitador de lodo en los tanques de mezcla. Los motores AC generalmente le suministran energía al equipo que no requiere mucha potencia, por ello usan una potencia de 1 hP (0.75 KW) a 150 hP (100KW).

3.4.2 MOTOR DIÉSEL Y GENERADOR AC

Los propietarios de taladros prefieren usar generadores AC porque pueden construirse para ser muy poderosos con respecto a su tamaño, lo cual es una ventaja sobre los generadores DC. El equipo del taladro también puede distribuir la corriente AC más fácil que la DC. Pero la corriente DC tiene ciertas ventajas cuando se accionan grandes equipos; Los motores DC producen mucho torque a bajas RPM y a baja velocidad, lo cual puede controlar fácilmente el perforador. Los generadores AC son muy poderosos para su tamaño. AC es más fácil de distribuir que DC. Usando los controles en su consola para controlar el panel del SCR el perforador puede seleccionar y obtener la potencia desde varios generadores cuando lo requiera (Garvizú y Martínez, 2013, p. 11).

3.5 SISTEMA DE SEGURIDAD (PREVENTORES DE REVENTONES).

Durante las operaciones normales de perforación, la presión hidrostática a una profundidad dada, ejercida por la columna de fluido de perforación dentro del pozo, debe superar la presión de los fluidos de la formación a esa misma profundidad. De esta forma se evita el flujo de los fluidos de formación (influjo, patada o kick) dentro del pozo.

Puede ocurrir sin embargo que la presión de los fluidos de formación supere la presión hidrostática de la columna de lodo. El fluido de formación, sea agua, gas o aceite entrará dentro del pozo, y esto se conoce como patada de pozo.

Una patada de pozo se define como un influjo controlable en superficie de fluido de formación dentro del pozo. Cuando dicho flujo se torna incontrolable en superficie esta patada de pozo se convierte en reventón (Hawker, Vogt, y Allison, 2002, p. 46).

Para el caso de perforaciones de pozos geotérmicos los reventones no son tan peligrosos como si fueran perforaciones de pozos de gas o petróleo.

Sin embargo para la protección necesaria que conlleva evitar dicho reventón los equipos de perforación cuentan con un conjunto de Preventores de Reventones, un sistema de válvulas preventoras (Blow Out Preventers) –BOPs-, el cual es un conjunto de válvulas preventoras y cierres anulares (spools) directamente conectado a la cabeza del pozo.

El conjunto de BOPs debe poder:

- ✓ Cerrar la cabeza del pozo para evitar que haya fluido que escape hacia la superficie y exista el riesgo de una explosión.
- ✓ Poder dejar salir fluidos del pozo bajo condiciones controladas seguramente

- ✓ Habilitar que pueda ser bombeado fluido de perforación hacia el pozo, bajo condiciones controladas, para balancear las presiones del pozo y evitar influjo mayor (matar el pozo)
- ✓ Permitir movimiento de la sarta.

El tamaño y distribución de la BOP será determinado por los riesgos previstos, por la protección requerida, además del tamaño y tipo de tuberías y revestimientos usados. Los requerimientos básicos para una BOP son:

- ✓ Debe haber suficiente revestimiento en el pozo que de un anclaje firme a la BOP.
- ✓ Debe ser posible cerrar el pozo completamente, haya o no tubería dentro de él.
- ✓ Cerrar el pozo debe ser un procedimiento simple y rápido, fácilmente realizable y comprensible por el personal de perforación
- ✓ Deben de existir líneas controlables a través de las cuales la presión pueda ser aliviada en forma segura.
- ✓ Deben de existir maneras de circular fluido a través de la sarta de perforación y a través del anular en forma que se pueda sacar el fluido de formación del pozo, y de esta manera circular lodo de mayor densidad para balancear la presión de formación y controlar el pozo (Hawker, Vogt, y Allison, 2002, p. 46).

Según la profundidad del pozo y otras circunstancias, varias unidades de BOP pueden estar ensambladas unas a otras, y luego a la brida del revestimiento de superficie. Se puede accionar uno o varios de estos BOPs para obturar el agujero cuando ocurre algún amago de reventón. La presencia de múltiples BOPs en el conjunto proporciona la flexibilidad y redundancia del sistema en caso de falla.

Un preventor anular (“bag-type preventer”) comúnmente conocido como *Hydri*™, está instalado en la parte superior del conjunto de BOP. Esta unidad contiene un inserto elastomérico con aletas de acero que puede ser ensanchado hidráulicamente para obturar el espacio anular. Debajo de los preventores anulares se instalan preventores de reventones de ariete, los cuales están provistos de arietes accionados hidráulicamente que se cierran contra la tubería o contra sí mismos, empujando hacia dentro, a partir de los lados opuestos de la tubería. Estos preventores pueden constar de arietes anulares, arietes ciegos o arietes cortadores. Los arietes anulares tienen cabezas de forma cóncava para agarrar la tubería y formar un sello alrededor de ésta; estos preventores desempeñan la misma función que los preventores anulares pero están clasificados para presiones más altas. Los arietes ciegos encajan unos en otros sobre el pozo, formando entre ellos un sello hermético a los fluidos, en caso de que la tubería no esté en el pozo o que se desprenda y caiga dentro de él. Los arietes cortadores cortan la tubería antes de cerrarse para formar un sello.

Debajo de los preventores de reventones se encuentra el carrete de perforación. Éste tiene un orificio en su lado para permitir el bombeo del lodo de perforación y de los fluidos del amago de reventón. Una línea de estrangulador de alta presión está conectada al carrete con una válvula de contrapresión especial (el estrangulador) en la línea.

Durante los procedimientos de control de pozo, se usa el estrangulador para mantener la contrapresión en el espacio anular mientras que se bombea lodo más pesado dentro de la columna de perforación para dominar el amago de reventón. Si el fluido invasor contiene gas, el gas debe ser separado del lodo que sale del pozo. Se envía el lodo cortado por gas del estrangulador a un recipiente separador de lodo-gas. Se quema el gas por antorcha y se devuelve el lodo a los tanques para reacondicionarlo (Instituto Americano del Petróleo, 2001, p. 1.13).

4 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

4.1 GENERALIDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Como se mencionó anteriormente el fluido de perforación es el principal componente del sistema de circulación de un equipo de perforación. Para los intereses del presente trabajo se presenta un capítulo aparte para realizar una descripción más detallada de dicho componente.

Aludido a menudo como “lodo”, el fluido de perforación fue introducido por primera vez alrededor del año 1913 para el control de la presión del subsuelo. Las décadas de 1920 y 1930 fueron testigo del surgimiento de las primeras compañías estadounidenses especializadas en la distribución, desarrollo e ingeniería de fluidos y componentes de perforación. En las décadas siguientes, las compañías de fluidos de perforación introdujeron desarrollos en materia química, mediciones e ingeniería de procesos, que produjeron mejoras significativas en la eficiencia de la perforación y la productividad de los pozos. (Schlumberger, 2013, pág. 67)

Algunas definiciones de fluido de perforación que pueden ser encontradas en la bibliografía son las siguientes:

“El fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos”.(PDVSA, 2002, pág. 7)

“Un fluido de perforación o lodo, es cualquier fluido que se utiliza en una operación de perforación en el que el fluido se hace circular o se bombea desde la superficie,

por la sarta de perforación, a través de la broca, y de nuevo a la superficie a través del espacio anular”(ASME Shale Shaker Committee, 2005, pág. 15)

Las composiciones de los fluidos de perforación varían según las exigencias del pozo, las capacidades de los equipos de perforación y los asuntos ambientales. Los ingenieros diseñan los fluidos de perforación para controlar las presiones del subsuelo, minimizar el daño de la formación, minimizar el daño de la formación, minimizar la posibilidad de pérdida de circulación, controlar la erosión del pozo y optimizar los parámetros de perforación, tales como la velocidad de penetración y la limpieza del pozo. Además, dado que un gran porcentaje de los pozos modernos está representado por pozos altamente desviados, los sistemas de fluidos de perforación deben ayudar a manejar los problemas de limpieza y estabilidad específicos de estos pozos. (Schlumberger, 2013, pág. 67)

PDVSA (2006) establece ciertas especificaciones que un fluido de perforación debe de cumplir, como las de que el fluido no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas. Agrega que el fluido debe mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones y que debe ser inmune al desarrollo de bacterias.

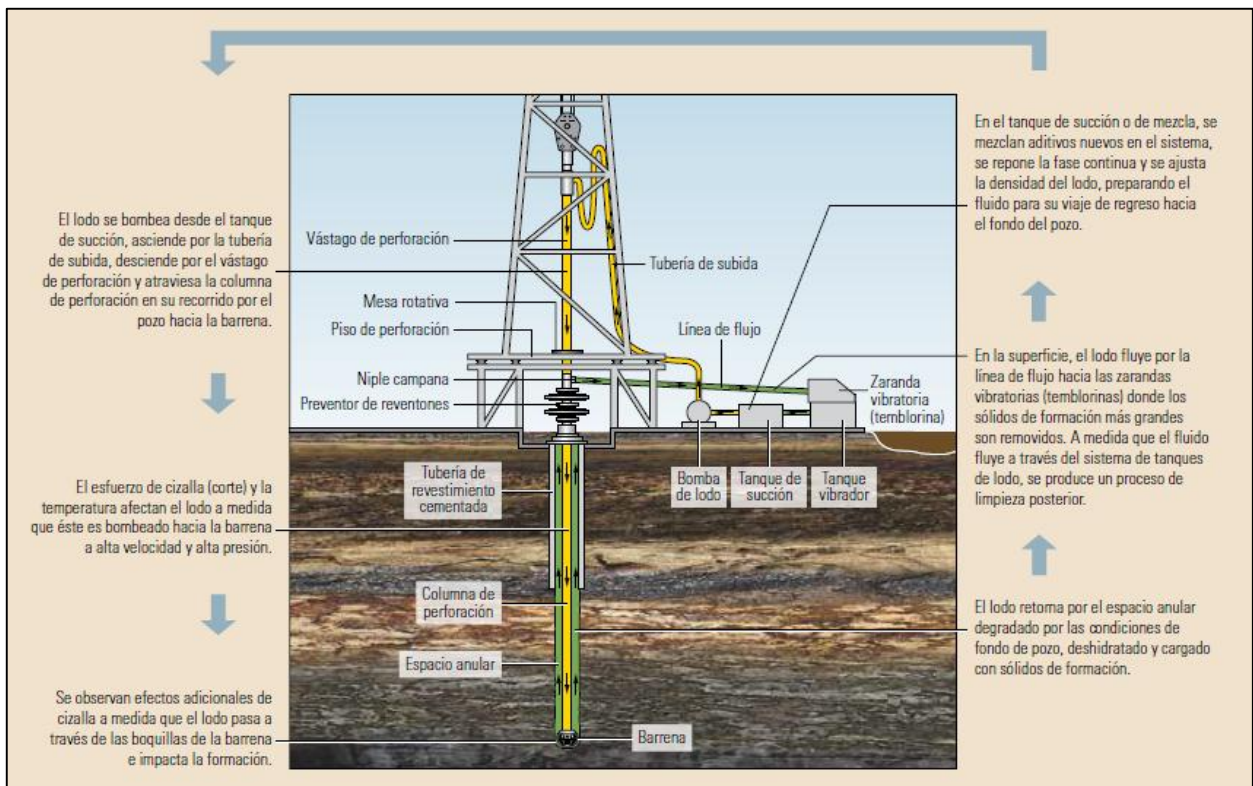


Figura 4.1 Ciclo de vida de los fluidos de perforación

Fuente: Schlumberger, 2013

4.2 FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que el fluido de perforación es capaz de desempeñar, aunque algunas de éstas no sean esenciales en cada pozo. La remoción de los recortes del pozo y el control de las presiones de la formación son funciones sumamente importantes.

Aunque el orden de importancia sea determinado por las condiciones del pozo y las operaciones en curso, las funciones más comunes del fluido de perforación son las siguientes:

1. Retirar los recortes del pozo.
2. Controlar las presiones de la formación.
3. Suspender y descargar los recortes.
4. Obturar las formaciones permeables.
5. Mantener la estabilidad del agujero.
6. Minimizar los daños al reservorio.
7. Enfriar, lubricar y apoyar la barrena y el conjunto de perforación.
8. Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la barrena.
9. Asegurar una evaluación adecuada de la formación.
10. Controlar la corrosión.
11. Facilitar la cementación y la completación.
12. Minimizar el impacto al ambiente.

4.2.1 REMOCIÓN DE LOS RECORTES DEL POZO

Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la barrena. A este fin, se hace circular un fluido de perforación dentro de la columna de perforación y a través de la barrena, el cual arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de los recortes (limpieza del agujero) depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, unidos a la Velocidad de Penetración (ROP); de la rotación de la columna de perforación; y de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación.

La viscosidad y las propiedades reológicas de los fluidos de perforación tienen un efecto importante sobre la limpieza del pozo. Los recortes se sedimentan rápidamente en fluidos de baja viscosidad (agua, por ejemplo) y son difíciles de circular fuera del pozo. En general, los fluidos de mayor viscosidad mejoran el transporte de los recortes.

La mayoría de los lodos de perforación son tixotrópicos, es decir que se gelifican bajo condiciones estáticas. Esta característica puede suspender los recortes mientras que se

efectúan las conexiones de tuberías y otras situaciones durante las cuales no se hace circular el lodo. Los fluidos que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte y que tienen altas viscosidades a bajas velocidades anulares han demostrado ser mejores para una limpieza eficaz del pozo.

Velocidad. En general, la remoción de los recortes es mejorada por las altas velocidades anulares. Sin embargo, con los fluidos de perforación más diluidos, las altas velocidades pueden causar un flujo turbulento que ayuda a limpiar el agujero, pero puede producir otros problemas de perforación o en el agujero. La velocidad a la cual un recorte se sedimenta en un fluido se llama velocidad de caída. La velocidad de caída de un recorte depende de su densidad, tamaño y forma, y de la viscosidad, densidad y velocidad del fluido de perforación. Si la velocidad anular del fluido de perforación es mayor que la velocidad de caída del recorte, el recorte será transportado hasta la superficie.

Densidad. Los fluidos de alta densidad facilitan la limpieza del pozo aumentando las fuerzas de flotación que actúan sobre los recortes, lo cual contribuye a su remoción del pozo. En comparación con los fluidos de menor densidad, los fluidos de alta densidad pueden limpiar el agujero de manera adecuada, aun con velocidades anulares más bajas y propiedades reológicas inferiores. Sin embargo, el peso del lodo en exceso del que se requiere para equilibrar las presiones de la formación tiene un impacto negativo sobre la operación de perforación; por lo tanto, este peso nunca debe ser aumentado a efectos de limpieza del agujero.

Rotación de la columna de perforación. Las altas velocidades de rotación también facilitan la limpieza del pozo introduciendo un componente circular en la trayectoria del flujo anular. Este flujo helicoidal (en forma de espiral o sacacorchos) alrededor de la columna de perforación hace que los recortes de perforación ubicados cerca de la pared del pozo, donde existen condiciones de limpieza del pozo deficientes, regresen hacia las regiones del

espacio anular que tienen mejores características de transporte. Cuando es posible, la rotación de la columna de perforación constituye uno de los mejores métodos para retirar camaras de recortes en pozos de alto ángulo y pozos horizontales (Instituto Americano del Pétroleo, 2001, pág. 2.3)

4.2.2 CONTROL DE LAS PRESIONES DE LA FORMACIÓN

Como se mencionó anteriormente, una función básica del fluido de perforación es controlar las presiones de la formación para garantizar una operación de perforación segura. Típicamente, a medida que la presión de la formación aumenta, se aumenta la densidad del fluido de perforación agregando barita para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del agujero. Esto impide que los fluidos de formación fluyan hacia el pozo y que los fluidos de formación presurizados causen un reventón. La presión ejercida por la columna de fluido de perforación mientras está estática (no circulando) se llama presión hidrostática y depende de la densidad (peso del lodo) y de la Profundidad Vertical Verdadera (TVD) del pozo. Si la presión hidrostática de la columna de fluido de perforación es igual o superior a la presión de la formación, los fluidos de la formación no fluirán dentro del pozo.

Mantener un pozo “bajo control” se describe frecuentemente como un conjunto de condiciones bajo las cuales ningún fluido de la formación fluye dentro del pozo. Pero esto también incluye situaciones en las cuales se permite que los fluidos de la formación fluyan dentro del pozo – bajo condiciones controladas. Dichas condiciones varían – de los casos en que se toleran altos niveles de gas de fondo durante la perforación, a situaciones en que el pozo produce cantidades comerciales de petróleo y gas mientras se está perforando. El control de pozo (o control de presión) significa que no hay ningún flujo incontrolable de fluidos de la formación dentro del pozo.

La presión hidrostática también controla los esfuerzos adyacentes al pozo y que no son ejercidos por los fluidos de la formación. En las regiones geológicamente activas, las

fuerzas tectónicas imponen esfuerzos sobre las formaciones y pueden causar la inestabilidad de los pozos, aunque la presión del fluido de la formación esté equilibrada. Los pozos ubicados en formaciones sometidas a esfuerzos tectónicos pueden ser estabilizados equilibrando estos esfuerzos con la presión hidrostática. Igualmente, la orientación del pozo en los intervalos de alto ángulo y horizontales puede reducir la estabilidad del pozo, lo cual también se puede controlar con la presión hidrostática.

Las presiones normales de formación varían de un gradiente de presión de 0,433 *psi/pie* (equivalente a 8,33 *lb/gal* de agua dulce) en las áreas ubicadas tierra adentro, a 0,465 *psi/pie* (equivalente a 8,95 *lb/gal*) en las cuencas marinas. La elevación, ubicación, y varios procesos e historias geológicas crean condiciones donde las presiones de la formación se desvían considerablemente de estos valores normales. La densidad del fluido de perforación puede variar desde la densidad del aire (básicamente 0 *psi/pie*) hasta más de 20,0 *lb/gal* (1,04 *psi/pie*).

Las formaciones con presiones por debajo de lo normal se perforan frecuentemente con aire, gas, niebla, espuma rígida, lodo aireado o fluidos especiales de densidad ultra baja (generalmente a base de petróleo).

El peso de lodo usado para perforar un pozo está limitado por el peso mínimo necesario para controlar las presiones de la formación y el peso máximo del lodo que no fracturará la formación. En la práctica, conviene limitar el peso del lodo al mínimo necesario para asegurar el control del pozo y la estabilidad del pozo. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.4)

4.2.3 SUSPENSIÓN Y DESCARGA DE RECORTES

Los lodos de perforación deben suspender los recortes de perforación, los materiales densificantes y los aditivos bajo una amplia variedad de condiciones, sin embargo deben permitir la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. Los recortes de perforación que sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos, los cuales, por su parte, pueden producir el atascamiento de la tubería o la pérdida de

circulación. El material densificante que se sedimenta constituye un asentamiento y causa grandes variaciones de la densidad del fluido del pozo. El asentamiento ocurre con mayor frecuencia bajo condiciones dinámicas en los pozos de alto ángulo donde el fluido está circulando a bajas velocidades anulares.

Las altas concentraciones de sólidos de perforación son perjudiciales para prácticamente cada aspecto de la operación de perforación, principalmente la eficacia de la perforación y la velocidad de penetración (ROP). Estas concentraciones aumentan el peso y la viscosidad del lodo, produciendo mayores costos de mantenimiento y una mayor necesidad de dilución. También aumentan la potencia requerida para la circulación, el espesor del revoque, el torque y el arrastre, y la probabilidad de pegadura por presión diferencial.

Se debe mantener un equilibrio entre las propiedades del fluido de perforación que suspenden los recortes y las propiedades que facilitan la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. La suspensión de los recortes requiere fluidos de alta viscosidad que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte con propiedades tixotrópicas, mientras que el equipo de remoción de sólidos suele funcionar más eficazmente con fluidos de viscosidad más baja. El equipo de control de sólidos no es tan eficaz con fluidos de perforación que no disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, los cuales tienen un alto contenido de sólidos y una alta viscosidad plástica.

Para lograr un control de sólidos eficaz, los sólidos de perforación deben ser extraídos del fluido de perforación durante la primera circulación proveniente del pozo. Al ser circulados de nuevo, los recortes se descomponen en partículas más pequeñas que son más difíciles de retirar. Un simple método para confirmar la remoción de los sólidos de perforación consiste en comparar el porcentaje de arena en el lodo en la línea de flujo y en el tanque de succión. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.4)

4.2.4 OBTURACIÓN DE LAS FORMACIONES PERMEABLES

La permeabilidad se refiere a la capacidad de los fluidos de fluir a través de formaciones porosas (...). Cuando la presión de la columna de lodo es más alta que la presión de la

formación, el filtrado invade la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo. Los sistemas de fluido de perforación deberían estar diseñados para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos problemas de perforación y producción. Los posibles problemas relacionados con un grueso revoque y la filtración excesiva incluyen las condiciones de pozo “reducido”, registros de mala calidad, mayor torque y arrastre, tuberías atascadas, pérdida de circulación, y daños a la formación.

En las formaciones muy permeables con grandes gargantas de poros, el lodo entero puede invadir la formación, según el tamaño de los sólidos del lodo. Para estas situaciones, será necesario usar agentes puenteantes para bloquear las aberturas grandes, de manera que los sólidos del lodo puedan formar un sello. Para ser eficaces, los agentes puenteantes deben tener un tamaño aproximadamente igual a la mitad del tamaño de la abertura más grande. Los agentes puenteantes incluyen el carbonato de calcio, la celulosa molida y una gran variedad de materiales de pérdida de por infiltración u otros materiales finos de pérdida de circulación.

Según el sistema de fluido de perforación que se use, varios aditivos pueden ser aplicados para mejorar el revoque, limitando la filtración. Estos incluyen la bentonita, los polímeros naturales y sintéticos, el asfalto y la gilsonita, y los aditivos desfloculantes orgánicos. (Instituto Americano del Pétroleo, 2001, pág. 2.5)

4.2.5 MANTENIMIENTO DE LA ESTABILIDAD DEL AGUJERO

La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánicos (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinar para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento (...). La inestabilidad del pozo suele ser indicada por el derrumbe de la formación, causando condiciones de agujero reducido, puentes y relleno durante las maniobras. Esto requiere generalmente el ensanchamiento del pozo hasta la profundidad original. (Se debe tener en cuenta que estos mismos síntomas también indican problemas de

limpieza del pozo en pozos de alto ángulo y pozos difíciles de limpiar). La mejor estabilidad del pozo se obtiene cuando éste mantiene su tamaño y su forma cilíndrica original. Al desgastarse o ensancharse de cualquier manera, el pozo se hace más débil y es más difícil de estabilizar. El ensanchamiento del pozo produce una multitud de problemas, incluyendo bajas velocidades anulares, falta de limpieza del pozo, mayor carga de sólidos, evaluación deficiente de la formación, mayores costos de cementación y cementación inadecuada. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.6)

La estabilidad de las formaciones permeables se logra con peso y revoque de calidad, y las impermeables con peso, cuando se trata de lutitas presurizadas, y con inhibición o con fluido cien por ciento aceite, cuando se trata de lutitas reactivas. (PDVSA, 2002, pág. 4).

4.2.6 MINIMIZACIÓN DE LOS DAÑOS A LA FORMACIÓN

La protección de reservorios contra daños que podrían perjudicar la producción es muy importante. Cualquier reducción de la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño a la formación. Estos daños pueden producirse como resultado de la obturación causada por el lodo o los sólidos de perforación, o de las interacciones químicas (lodo) y mecánicas (conjunto de perforación) con la formación. El daño a la formación es generalmente indicado por un valor de daño superficial o por la caída de presión que ocurre mientras el pozo está produciendo (diferencial de presión del reservorio al pozo).

La posibilidad de daños a la formación puede ser determinada a partir de los datos de pozos de referencia y del análisis de los núcleos de la formación para determinar la permeabilidad de retorno. Fluidos de perforación diseñados para minimizar un problema en particular, fluidos de perforación del reservorio diseñados especialmente, o fluidos de rehabilitación y completación pueden ser usados para minimizar los daños a la formación. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.7)

4.2.7 ENFRIAMIENTO, LUBRICACIÓN Y SOSTENIMIENTO DE LA BARRENA Y DEL CONJUNTO DE PERFORACIÓN.

Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor por fricción en la barrena y en las zonas donde la columna de perforación rotatoria roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la barrena y el conjunto de perforación, alejando este calor de la fuente y distribuyéndolo en todo el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la columna de perforación hasta temperaturas más bajas que la temperatura de fondo. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por fricción. Las barrenas, los motores de fondo y los componentes de la columna de perforación fallarían más rápidamente si no fuera por los efectos refrigerantes y lubricantes del fluido de perforación.

La lubricidad de un fluido en particular es medida por su Coeficiente de Fricción (COF), y algunos lodos proporcionan una lubricación más eficaz que otros. Por ejemplo, los lodos base de aceite y sintético lubrican mejor que la mayoría de los lodos base agua, pero éstos pueden ser mejorados mediante la adición de lubricantes. En cambio, los lodos base agua proporcionan una mayor lubricidad y capacidad refrigerante que el aire o el gas.

El fluido de perforación ayuda a soportar una porción del peso de la columna de perforación o tubería de revestimiento mediante la flotabilidad. Cuando una columna de perforación, una tubería de revestimiento corta o una tubería de revestimiento está suspendida en el fluido de perforación, una fuerza igual al peso del lodo desplazado la mantiene a flote, reduciendo la carga del gancho en la torre de perforación. La flotabilidad está directamente relacionada con el peso del lodo; por lo tanto, un fluido de 18-lb/gal proporcionará el doble de la flotabilidad proporcionada por un fluido de 9-lb/gal. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.8)

4.2.8 TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA A LAS HERRAMIENTAS Y A LA BARRENA.

Las pérdidas de presión en la columna de perforación son mayores cuando se usan fluidos con densidades, viscosidades plásticas y contenidos de sólidos más altos (...). Los fluidos de perforación que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, de bajo contenido de sólidos, o los fluidos que tienen características reductoras de arrastre, son más eficaces para transmitir la energía hidráulica a las herramientas de perforación y a la barrena.

En los pozos someros, la potencia hidráulica disponible es generalmente suficiente para asegurar la limpieza eficaz de la barrena. Como la presión disponible en la columna de perforación disminuye a medida que se aumenta la profundidad del pozo, se alcanzará una profundidad a la cual la presión será insuficiente para asegurar a limpieza óptima de la barrena. Se puede aumentar esta profundidad controlando cuidadosamente las propiedades del lodo (Instituto Americano del Pétroleo, 2001, pág. 2.8).

4.2.9 ASEGURAR LA EVALUACIÓN ADECUADA DE LA FORMACIÓN.

La evaluación correcta de la formación es esencial para el éxito de la operación de perforación, especialmente durante la perforación exploratoria. Las propiedades químicas y físicas del lodo afectan la evaluación de la formación. Las condiciones físicas y químicas del agujero después de la perforación también afectan la evaluación de la formación.(Instituto Americano del Pétroleo, 2001, pág. 2.9)

El fluido debe tener una alta calidad para facilitar la toma de núcleos y la evaluación de las formaciones perforadas, sobre todo cuando se trata de la zona productora.(PDVSA, 2002, pág. 4)

4.2.10 CONTROL DE LA CORROSIÓN

Los componentes de la columna de perforación y tubería de revestimiento que están constantemente en contacto con el fluido de perforación están propensos a varias formas de corrosión. Los gases disueltos tales como el oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno pueden causar graves problemas de corrosión, tanto en la superficie como en el fondo del pozo. En general, un pH bajo agrava la corrosión. Por lo tanto, una función importante del fluido de perforación es mantener la corrosión a un nivel aceptable. Además de proteger las superficies metálicas contra la corrosión, el fluido de perforación no debería de dañar los componentes de caucho o elastómeros.

El sulfuro de hidrógeno puede causar una falla rápida y catastrófica de la columna de perforación. Este producto también es mortal para los seres humanos, incluso después de cortos periodos de exposición y en bajas concentraciones. Cuando se perfora en ambientes de alto contenido de H_2S , se recomienda usar fluidos de alto pH, combinados con un producto químico secuestrador desulfuro, tal como el cinc (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.10).

4.2.11 FACILITAR LA CEMENTACIÓN Y COMPLETACIÓN

Resulta más fácil introducir la tubería de revestimiento dentro de un pozo liso de calibre uniforme, sin recortes, derrumbes o puentes. El lodo debería tener un revoque fino y liso. Para que se pueda cementar correctamente la tubería de revestimiento, todo el lodo debe ser desplazado por los espaciadores, los fluidos de limpieza y el cemento. El desplazamiento eficaz del lodo requiere que el pozo tenga un calibre casi uniforme y que el lodo tenga una baja viscosidad y bajas resistencias de gel no progresivas. Las operaciones de completación tales como la perforación y la colocación de filtros de grava también requieren que el pozo tenga un calibre casi uniforme y pueden ser afectadas por las características de lodo. (Instituto Americano del Petróleo, 2001, pág. 2.11)

4.2.12 MINIMIZAR EL IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Con el tiempo, el fluido de perforación se convierte en un desecho y debe ser eliminado de conformidad con los reglamentos ambientales locales. Los fluidos de bajo impacto ambiental que pueden ser eliminados en la cercanía del pozo son los más deseables. La mayoría de los países han establecido reglamentos ambientales locales para los desechos de fluidos de perforación. Los fluidos a base de agua, a base de petróleo, anhidros y sintéticos están sujetos a diferentes consideraciones ambientales y no existe ningún conjunto único de características ambientales que sea aceptable para todas las ubicaciones. Esto se debe principalmente a las condiciones complejas y cambiantes que existen por todo el mundo, la ubicación y densidad de las poblaciones humanas, la situación geográfica local (costa afuera o en tierra), altos o bajos niveles de precipitación, la proximidad del sitio de eliminación respecto a las fuentes de agua superficiales y subterráneas, la fauna y flora local, y otras condiciones (Instituto Americano del Pétroleo, 2001, pág. 2.11).

4.3 SISTEMAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los sistemas de fluidos de perforación poseen una *fase continua*, que es líquida, y una *fase discontinua* compuesta por sólidos. En ocasiones, también exhiben una *fase gaseosa*; ya sea por diseño o como resultado del arrastre de gas de formación. La fase continua puede ser utilizada para clasificar los tipos de fluidos de perforación en gaseosos, fluidos acuosos o sistemas no acuosos. Estos fluidos son una mezcla de componentes líquidos y sólidos, cada uno de los cuales está diseñado para modificar una propiedad específica del fluido de perforación, tal como su viscosidad y su densidad (Schlumberger, 2013)

En geotermia y para protección del medio ambiente se usan los lodos bentoníticos base agua, en tanto los base aceite son utilizados en las perforaciones en campos petroleros.

(Hawker, Vogt, & Allison, Procedimientos y operaciones en el pozo, 2002)Hace una clasificación de fluidos de perforación más comunes de la siguiente manera:

- ✓ Aire-gas
- ✓ Espuma/fluidos aireados
- ✓ Lodos en base agua
- ✓ Lodos en emulsión de aceite
- ✓ Lodos en base aceite (pág.59).

4.3.1 AIRE GAS

Tiene ventajas económicas usar aire comprimido, gas natural, gas inerte o mezclas de aire y agua en áreas de rocas duras cuando hay pocas posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua.

Ventajas:

- ✓ Velocidad de perforación más alta que con cualquier otro fluido de perforación.
- ✓ Más pies por broca.
- ✓ Hueco de diámetro más exacto y menos desviado.
- ✓ Continuas pruebas de formación (excluyendo formaciones a alta presión)
- ✓ Corazonamientos sin contaminación.
- ✓ Mejores trabajos de cementación.
- ✓ Mejores trabajos de completamiento.
- ✓ Sin peligro de pérdidas de circulación.

Desventajas:

- ✓ No hay propiedades estructurales que transporten los cortes de perforación.
- ✓ La mezcla puede ser explosiva con otros gases.(Posibilidad de explosiones en fondo e incendio)
- ✓ Corrosión de la tubería.

- ✓ Cortes muy finamente pulverizados y separados irregularmente del fluido.
 - ✓ Sin control de la presión.
 - ✓ Sin Torta de lodo.
 - ✓ Influjos de Fluidos de formación (Creando anillos de lodo y ocasionando pegajos)
 - ✓ No hay efecto de boyancia (incrementando el peso en el gancho)
- No hay enfriamiento ni lubricación (Hawker et al., 2002, p.60).

4.3.2 ESPUMA O FLUIDOS AIREADOS

Los fluidos en espuma se hacen inyectando agua y agentes espumantes en el aire o en una corriente de gas para crear una espuma viscosa y estable. También puede hacerse inyectando aire en un lodo con base en gel que contenga un agente espumante. La capacidad de transporte de las espumas viscosas depende más de la viscosidad que de la velocidad anular.

Los fluidos aireados se hacen inyectando aire o gas en un lodo con base gel. Se usan para reducir la presión hidrostática (y así evitando la pérdida de circulación en presiones con baja presión) y para incrementar la tasa de penetración (Hawker et al., 2002, p.60).

4.3.3 LODOS BASE AGUA

Los lodos base agua presentan las siguientes fases:

- ✓ *Fase líquida:* Agua dulce principalmente.
- ✓ *Fase sólida:* Material densificante y viscosificante (barita y bentonita).
- ✓ *Fase química:* Productos químicos (García y Vásquez, 2013, p.10).

En la fase líquida están suspendidas arcillas y otros sólidos (reactivos e inertes). Lo más usual es agua dulce, se consigue normalmente, es barata y fácil de controlar aunque esté con sólidos, y es el mejor líquido para evaluar formaciones. El agua salada se usa en perforación marina dada su fácil accesibilidad.

Los sólidos inertes son sólidos químicamente inactivos, los cuales están suspendidos en la fase agua. Estos sólidos incluyen sólidos inertes provenientes de la perforación (como caliza, dolomita y arena) y sólidos para controlar la densidad del lodo como barita y galena. (Hawker et al., 2002, p.60)

Los lodos base agua se clasifican según el tipo de dispersante utilizado. Algunos ejemplos de tipos de lodos base agua son los siguientes:

- ✓ *Lodos calados*. Se obtienen por adición de cal apagada $Ca(OH)_2$ y yeso en altas concentraciones. De esta forma la arcilla bentonítica sódica se transforma en arcilla cálcica (lodos calados)
- ✓ *Lodos dispersos*: Se utilizan para perforar grandes profundidades o en formaciones altamente problemáticas. Presentan como característica principal, la dispersión de arcillas constitutivas (adición de lignitos que disminuyen la viscosidad)
- ✓ *Lodos salinos*: Son aquellos cuya fase continua es agua salada. Con una concentración mínima de 10,000 ppm de $NaCl$ (1% en peso). Utiliza como fase dispersa la arcilla atapulguita. Se usan para perforar formaciones salinas o formaciones afectadas por la presencia de agua dulce.
- ✓ *Lodos salinos*: se clasifican en salobres (con una concentración entre 10,000 y 35,000 ppm) y salados (con una concentración entre 35,000 y 350,000 ppm). (Contreras, 2002, p. 5)

(ASME Shale Shaker Committee, 2005) Establece una clasificación de los lodos base agua, la cual se presenta en la siguiente figura:

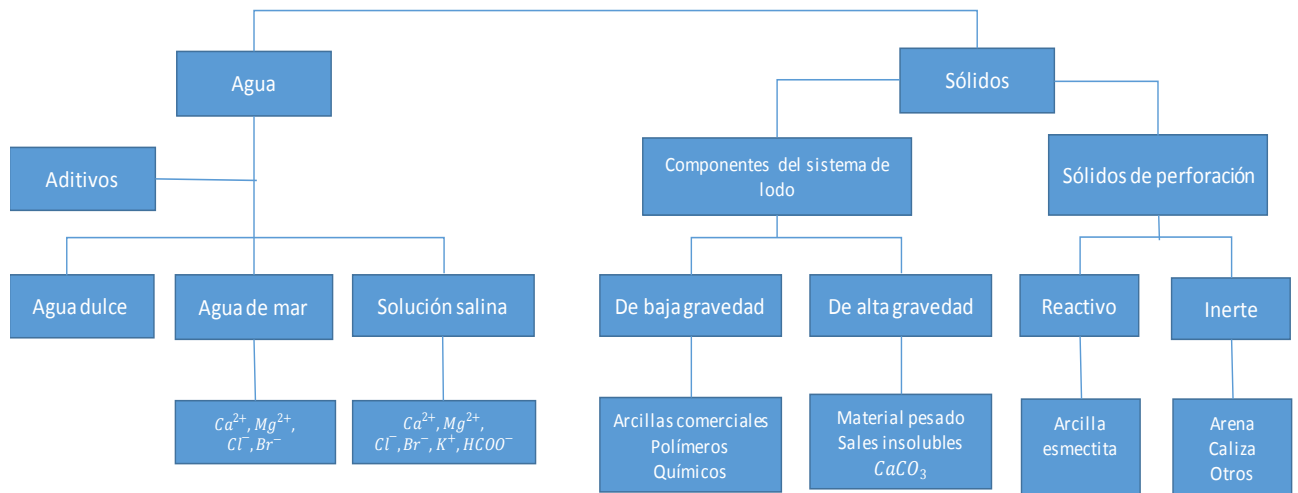


Figura 4.2. Tipos de lodo base agua

Fuente: Traducido de Hawker 2002

Entre las ventajas que ofrecen los lodos base agua se encuentran:

- ✓ Mayor facilidad de perforación cuando se usa agua dulce (La perforabilidad se incrementa con la pérdida de agua y con la disminución de densidad y viscosidad)
- ✓ Menos caro que los lodos base aceite.

Algunas de sus desventajas son:

- ✓ Daño potencial a la formación.
- ✓ Sujeto a la contaminación.
- ✓ Afectado adversamente por las altas temperaturas (Hawker et al., 2002, p.61)

4.3.4 LODOS EMULSIONADOS

Estos lodos son lodos en base agua que contienen aceite emulsificado disperso o suspendido en una fase continua de agua. Los lodos en emulsión son menos costosos que los lodos en base aceite, y poseen muchos de los beneficios de estos (Hawker et al., 2002, p.61).

Los lodos base agua emulsionados requieren en su preparación aceite, diésel o crudo en cantidad de 5 a 10% del volumen total del lodo (García y Vásquez, 2013, p.10).

4.3.5 LODOS BASE ACEITE

Son llamados también lodos de emulsión inversa. El contenido de agua en estos lodos es de entre el 1% y el 15%. (Contreras, 2002, p. 12).

Los lodos base aceite presentan las siguientes fases:

- ✓ *Fase líquida:* Compuesta por una fase continua (aceite) y una fase discontinua o dispersa (Agua salada).
- ✓ *Fase sólida:* Material densificante y (barita).
- ✓ *Fase química:* Emulsificantes (García y Vásquez, 2013, p.10).

Los lodos base aceite son usados en operaciones especiales de perforación, como perforando en temperaturas extremadamente altas, en formaciones muy sensibles al agua donde no se pueden usar lodos en base agua, y en la penetración de zonas productivas que podrían ser dañadas por lodos base agua (Hawker et al., 2002, p.61).

De similar manera que para los fluidos base agua, la (ASME Shale Shaker Committee, 2005) establece una clasificación de los lodos base aceite, la cual se presenta en la siguiente figura:

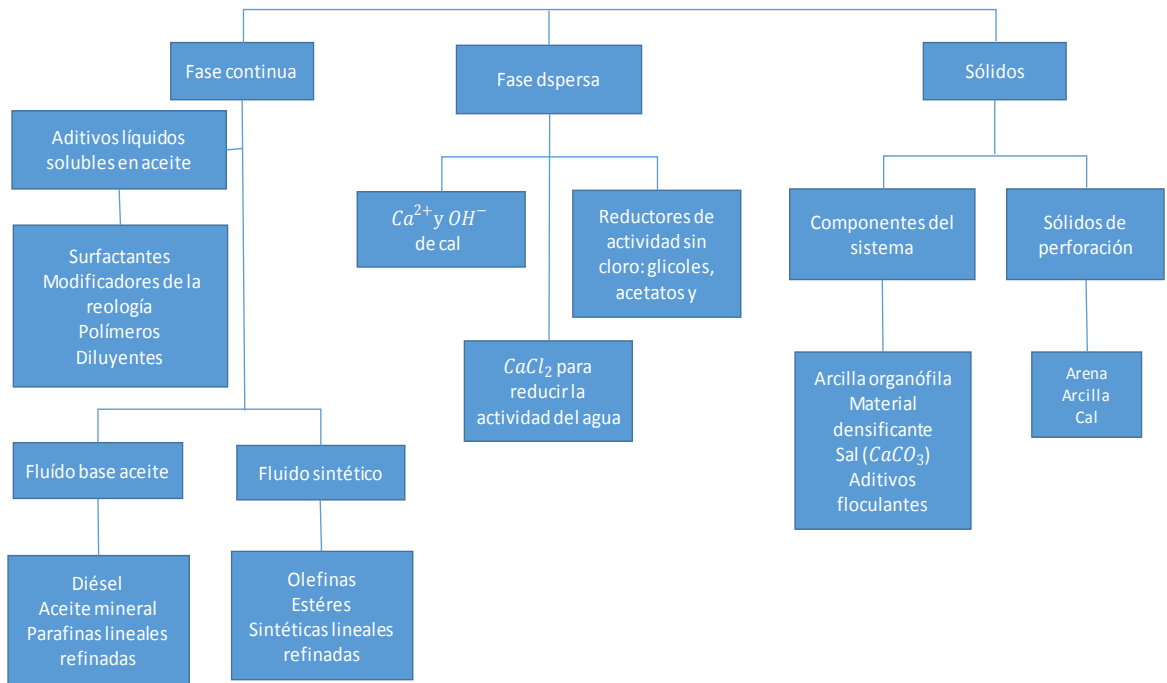


Figura 4.3. Tipos de lodos de emulsión invertida o base aceite

Fuente: Traducido de Hawker et al., 2002

Entre las ventajas de utilizar fluidos de perforación base aceite se encuentran:

- ✓ Minimiza el daño a la formación
- ✓ Evita la hidratación de las arcillas.
- ✓ Provee mejor lubricación (Reduce el torque, el arrastre y la pega de tubería)
- ✓ Minimiza la corrosión de la tubería
- ✓ Estabilidad en altas temperaturas.

Algunas de las desventajas del uso de estos fluidos son los siguientes:

- ✓ Susceptible a contaminación con agua, aireamiento y espumamiento.
- ✓ Inflamable.
- ✓ Significativamente más caro que los lodos en base agua.
- ✓ Ensuciador y peligroso.
- ✓ No amistoso ambientalmente (En caso de derrame y cuando se descarta)

En años recientes, los aceites minerales han ido reemplazando al petróleo como la base para estos lodos. Proveen muchas de las mismas propiedades y ventajas para la perforación, son amistosos con el medio ambiente y con el personal del taladro que tiene que manejarlo (Hawker et al., 2002, p.62).

4.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

Las propiedades de los fluidos de perforación son variadas, una clasificación general define dos tipos: las propiedades físicas y las propiedades químicas. Hay ciertas propiedades que son de interés para el equipo de perforación controlar. Esto se hace mediante la realización de diferentes pruebas, las cuales serán explicadas más adelante. En esta sección sólo se hará una breve descripción de las propiedades físicas y químicas de los fluidos de perforación.

4.4.1 PROPIEDADES FÍSICAS

PDVSA (2002), resume en una tabla resumen las propiedades físicas de los fluidos de perforación la cuales se muestra a continuación:

Tabla 4.1 Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos.

Propiedad	Descripción
Densidad o peso	Es la propiedad del fluido que tiene por función principal mantener en sitio los fluidos de la formación. La densidad se expresa por lo general en <i>lbs/gal</i> , y es uno de los dos factores, de los cuales depende la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. Durante la perforación de un pozo se trata de mantener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de la formación, para evitar en lo posible una arremetida, lo cual dependerá de las características de la formación.

Fuente:(PDVSA, 2002)

Tabla 4.2 Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación

Propiedad	Descripción
Viscosidad API	<p>Es determinada con el Embudo Marsh, y sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. A la viscosidad embudo se le concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, y el único beneficio que aparentemente tiene, es el de suspender el ripio de formación en el espacio anular, cuando el flujo es laminar. Por esta razón, generalmente no se toma en consideración para el análisis riguroso de la tixotropía del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Un fluido contaminado exhibe alta viscosidad de embudo</p>
Viscosidad plástica	<p>Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre:</p> <ul style="list-style-type: none"> Sólidos Sólidos y líquidos Líquido y líquidos <p>Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de control de Sólidos. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP). Una baja viscosidad plástica aunada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración.</p>

Fuente:(PDVSA, 2002)

Tabla 4.3 Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación.

Propiedad	Descripción
Punto cedente	Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación. Un fluido floculado exhibe altos valores de punto cedente. La floculación se controla de acuerdo al causante que lo origina. Se usan adelgazantes químicos cuando es causada por excesos de sólidos arcillosos y agua cuando el fluido se deshidrata por altas temperaturas.
Filtrado API y a HP –HT (Alta presión – Alta temperatura)	El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Esta característica es afectada por los siguientes factores: Se mide en condiciones estáticas, a baja temperatura y presión para los fluidos base agua y a alta presión (HP) y alta temperatura (HT) para los fluidos base aceite. Su control depende del tipo de formación. En formaciones permeables no productoras se controla desarrollando un revoque de calidad, lo cual es posible, si se tiene alta concentración y dispersión de sólidos arcillosos que son los verdaderos aditivos de control de filtración. Por ello, es práctica efectiva usar bentonita pre hidratada para controlar el filtrado API.

Fuente:(PDVSA, 2002)

Tabla 4.4 Cuadro resumen sobre las propiedades físicas de los fluidos. Continuación.

pH	El pH indica si el lodo es ácido o básico. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH.
% Arena	La arena es un sólido no reactivo indeseable de baja gravedad específica. El porcentaje de arena durante la perforación de un pozo debe mantenerse en el mínimo posible para evitar daños a los equipos de perforación. La arena es completamente abrasiva y causa daño considerable a las camisas de las bombas de lodo.
% Sólidos disueltos	El porcentaje de sólidos y líquidos se determina con una prueba de retorta. Los resultados obtenidos permiten conocer a través de un análisis de sólidos, el porcentaje de sólidos de alta y baja gravedad específica. En los fluidos base agua, se pueden conocer los porcentajes de bentonita, arcilla de formación y sólidos no reactivos de formación, pero en los fluidos base aceite, no es posible conocer este tipo de información, porque resulta imposible hacerles una prueba de MBT (pp. 4-6)

Fuente:(PDVSA, 2002).

4.4.2 PROPIEDADES QUIMICAS.

PDVSA (2002), resume en una tabla resumen las propiedades físicas de los fluidos de perforación la cuales se muestra a continuación:

Tabla 4.5 Cuadro resumen sobre las propiedades químicas de los fluidos de perforación

Propiedad	Descripción
Dureza	Es causada por la cantidad de sales de calcio y magnesio disuelta en el agua o en el filtrado del lodo. El calcio por lo general, es un contaminante de los fluidos base de agua.
Cloruros	Es la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo. Una alta concentración de cloruros causa efectos adversos en un fluido base de agua.
Alcalinidad	La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la prueba de alcalinidad se pueden estimar la concentración de iones OH^- , $CO_3^{=}$ y HCO_3
MBT(Prueba de azul de metileno)	Es una medida de la concentración total de sólidos arcillosos que contiene el fluido. (p. 7)

Fuente:(PDVSA, 2002)

5 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

Las pérdidas de circulación (ver figura 5.1) son un fenómeno que ocurre cuando el fluido de perforación fluye en una o más formaciones geológicas en vez de retornar a la superficie por el espacio anular (Datwani, 2012). Desde el punto de vista histórico, la pérdida de circulación ha sido uno de los actores que más contribuye a los altos costos del lodo. Otros problemas del pozo, como la inestabilidad del pozo, la tubería pegada, e incluso los reventones, son consecuencias de la pérdida de circulación. Además de las ventajas claras que se obtienen al mantener la circulación, la necesidad de impedir o remediar las pérdidas de lodo es importante para otros objetivos de la perforación, como la obtención de una evaluación de la formación de buena calidad y el logro de una adherencia eficaz del cemento primario sobre la tubería de revestimiento (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

5.1 FUNDAMENTOS DEL FENÓMENO DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

Los incidentes de pérdidas de circulación se producen con más frecuencia como consecuencia del método utilizado para perforar un pozo. Tradicionalmente, los pozos se perforan en condiciones de sobre balance en las que el fluido o el lodo de perforación se hacen circular por la sarta de perforación, a través de la barrena, y en forma ascendente hacia el espacio anular.

La densidad del lodo es la fuente principal de presión hidrostática en un pozo. Durante su circulación, el lodo contribuye a la generación de una presión en el pozo que puede expresarse en términos de la densidad de circulación equivalente (ECD). En un estado de sobre balance, esta ECD ayuda a generar una presión hidrostática en el pozo que es mayor que la presión poro de la formación expuesta. Un fluido de perforación de densidad insuficiente puede dar lugar a una presión hidrostática que es menor que la presión de poro. Esto puede traducirse en un golpe de presión: un influjo no planificado de fluidos de formación en el pozo. La mayoría de los golpes de presión se maneja utilizando operaciones establecidas de ahogo del pozo, pero existen casos aislados en los que un golpe

de presión incontrolado puede manifestarse en forma de reventón, con los riesgos asociados para el equipamiento de boca de pozo y el daño potencial del personal que opera el equipo de perforación(Cook, Growcock, Guo, Hodder, & Van Oort, 2012).

Otros obstáculos para la seguridad y la viabilidad económica del pozo pueden presentarse si la presión hidrostática es demasiado baja para sustentar la pared del pozo. El lodo de perforación debe ser suficientemente pesado para contrarrestar la inestabilidad que se genera en el pozo cuando se remueve la roca a través del proceso de perforación. Si el perforador selecciona un lodo de perforación de densidad insuficiente, el resultado puede ser la inestabilidad del pozo y, en casos extremos, su colapso. Por el contrario, un fluido de perforación con una densidad de lodo excesivamente alta ejerce una presión hidrostática que puede exceder la integridad mecánica de la formación, lo cual causa la penetración del fluido de perforación en las fracturas naturales. Las fracturas naturales pueden estar presentes en cualquier tipo de formación, pero son más frecuentes en los marcos geológicos con actividad tectónica en curso.

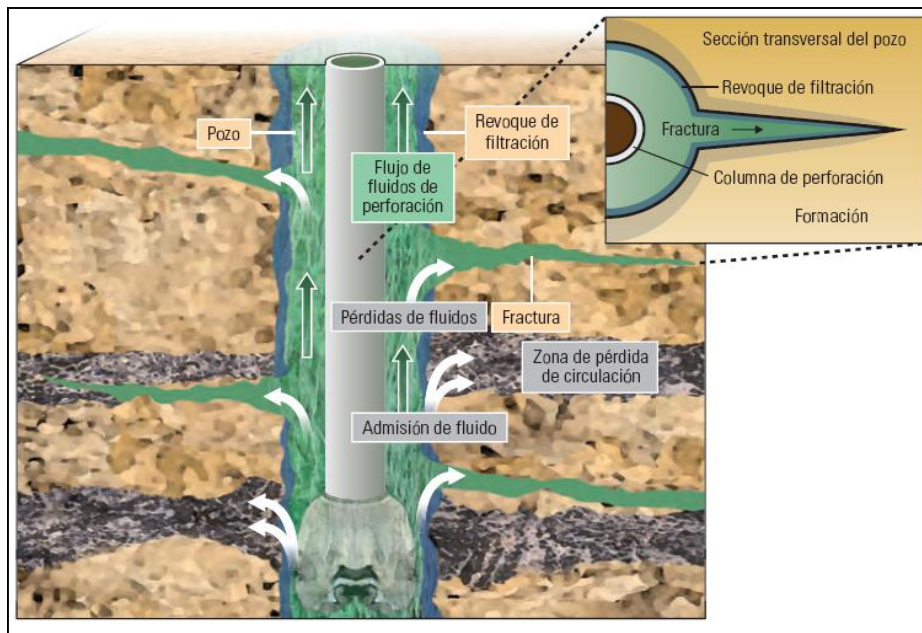


Figura 5.1 Mecanismos de egreso del fluido de perforación en el pozo.

Fuente: Cook, Growcock, Guo, Hodder, & Van Oort, 2012.

El manejo de los problemas de pérdidas de circulación también puede plantear desafíos considerables cuando se inducen fracturas durante el proceso de perforación. Las fracturas se generan como resultado del fenómeno de falla por tracción, que tiene lugar cuando el esfuerzo ejercido sobre la formación excede el esfuerzo tangencial alrededor del pozo y la resistencia a la tracción de la roca, debido en general a una excesiva densidad del lodo o presión del pozo (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Cook, Growcock, Guo, Hodder, & Van Oort, 2012) Independientemente de que la pérdida de circulación se produzca durante la perforación, la entubación, o la terminación y la cementación del pozo, su impacto sobre los costos de construcción del pozo es significativo ya que según el Departamento de Energía de EUA, en promedio, entre el 10% y el 20% del costo de perforación de pozos de alta presión y alta temperatura corresponde a pérdidas de lodo.

5.2 CAUSAS DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

La pérdida de circulación se puede dar de una de dos maneras básicas (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001):

1. Invasión: o pérdidas de lodo hacia las formaciones que son cavernosas fisuradas, fracturadas o no consolidadas.
2. Fracturación: es decir la pérdida del lodo causada por la fracturación hidráulica producida por presiones inducidas excesivas.

5.2.1 INVASIÓN.

En muchos casos, la pérdida de circulación no se puede evitar en las formaciones que son cavernosas, fisuradas, fracturadas o no consolidadas (ver figura 5.3). Las formaciones agotadas de baja presión (generalmente arenas) son similares en lo que se refiere al potencial de pérdida de circulación (Baroid, 2000).

Las siguientes formaciones geológicas son propensas a sufrir pérdidas de circulación por invasión (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Baroid, 2000; INTEQ, 1998):

- 1) Formaciones de grano grueso no consolidadas: Las formaciones de grano grueso no consolidadas pueden tener una permeabilidad suficientemente alta para que el lodo invada la matriz de la formación, resultando en la pérdida de circulación. Esta alta permeabilidad está frecuentemente presente en las arenas y los lechos de grava poco profundos. Las formaciones que eran arrecifes y bancos de ostras también tienen tendencias similares. También es importante impedir la pérdida de lodo en los intervalos poco profundos, ya que esto puede producir el socavamiento de estas formaciones no consolidadas, formando una gran cavidad menos estable que podría derrumbarse fácilmente bajo la acción de la sobrecarga y del peso del equipo de perforación.
- 2) Las formaciones agotadas: (generalmente arenas) constituyen otra zona de pérdida potencial. La producción de formaciones que están ubicadas en el mismo campo, o que están muy próximas las unas de las otras, puede causar una presión de la formación por debajo de lo normal (agotada), debido a la extracción de los fluidos de la formación. En tal caso, los pesos de lodo requeridos para controlar las presiones de las otras formaciones expuestas pueden ser demasiado altos para la formación agotada, forzando el lodo a invadir la formación agotada de baja presión (ver la Figura 5.2). Si se produjera esta situación, planes deberían ser formulados para impedir la pérdida de circulación y evitar la pegadura de la tubería en la formación agotada. Agentes obturantes y materiales de relleno especiales deberían ser usados para formar un buen sello y un buen revoque en la zona agotada.

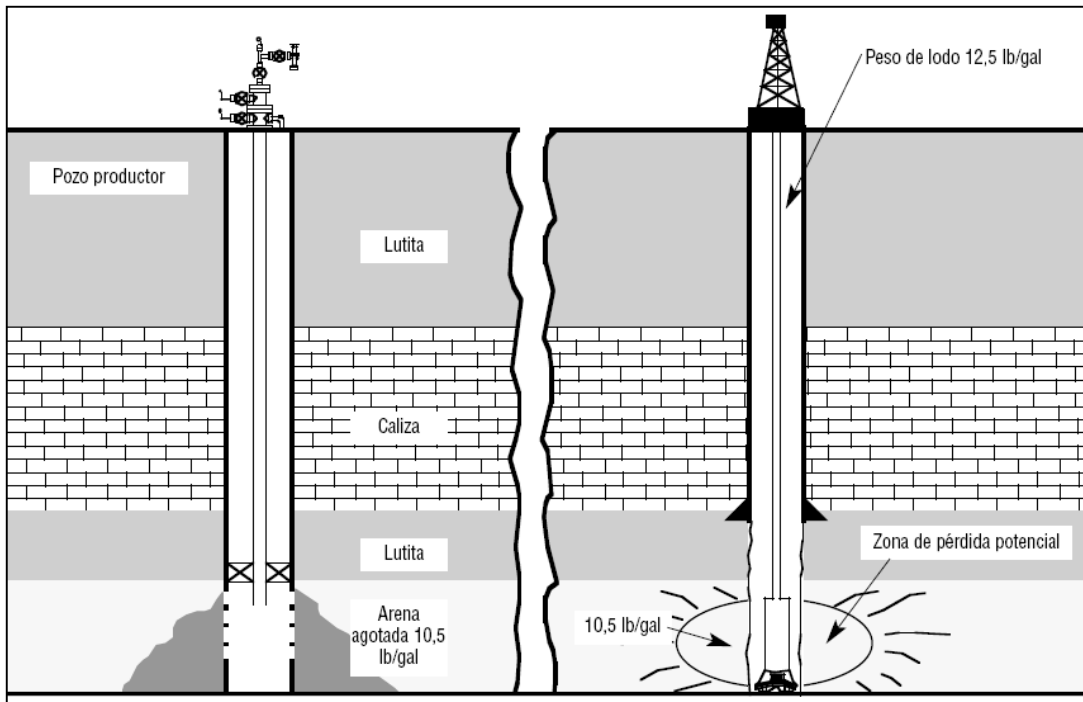


Figura 5.2 Arena agotada.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

- 3) Zonas cavernosas o fisuradas: Las zonas cavernosas o fisuradas están generalmente relacionadas con las formaciones volcánicas o de carbonatos (caliza y dolomita) de baja presión. En la caliza, las fisuras son creadas por el flujo continuo anterior de agua que disolvió parte de la matriz de la roca (lixiviación), creando un espacio vacío que suele llenarse ulteriormente de aceite. Cuando estas formaciones fisuradas son perforadas, la columna de perforación puede caer libremente a través de la zona vacía y se suele sufrir una pérdida rápida de lodo. El volumen y la persistencia de este tipo de pérdida depende del grado de interconexión entre las fisuras. Fisuras y cavernas similares pueden aparecer durante el enfriamiento del magma o ceniza volcánica. Las formaciones cavernosas y fisuradas son frecuentemente fáciles de localizar a partir de los pozos de referencia y predecir a partir de los registros de lodo y de la litología.

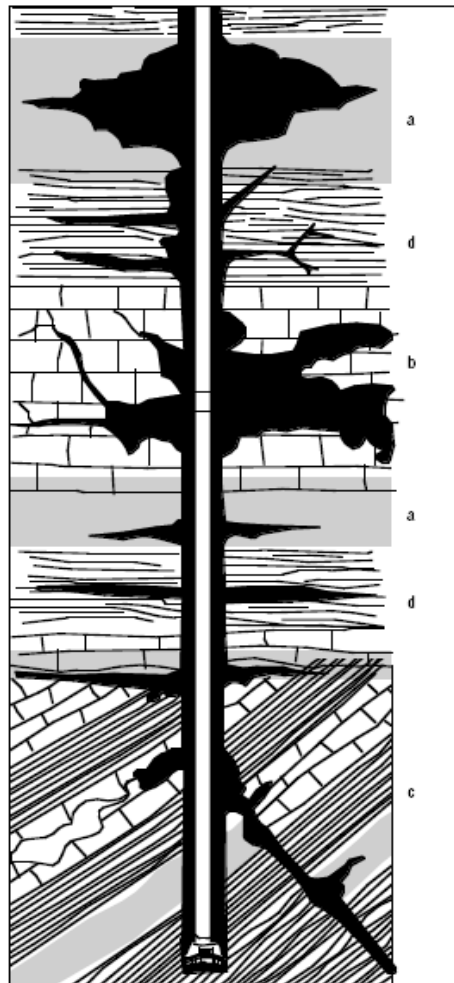


Figura 5.3 Secciones de pérdida de circulación:

a) Arenas no consolidadas y grava de alta permeabilidad. b) Zonas cavernosas o fisuradas en carbonatos (caliza o dolomita). c) Fracturas naturales, fallas y zonas de transición en carbonatos o lutitas duras. d) Fracturas inducidas por exceso de presión.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

5.2.2 FRACTURACIÓN.

La fracturación hidráulica comienza y la pérdida de circulación ocurre cuando se alcanza o se excede una determinada presión crítica de fractura (ver figura 5.4). Una vez que una fractura ha sido creada o abierta por una presión, puede que sea difícil repararla (“cerrarla”) y es posible que no se pueda restablecer la integridad original de la formación, como se demostrará a continuación en la figura 5.5. La pérdida de circulación puede persistir,

aunque la presión sea reducida más tarde. Ésta es una de las razones por las cuales es mejor pre tratar e impedir la pérdida de circulación que permitir que ocurra.

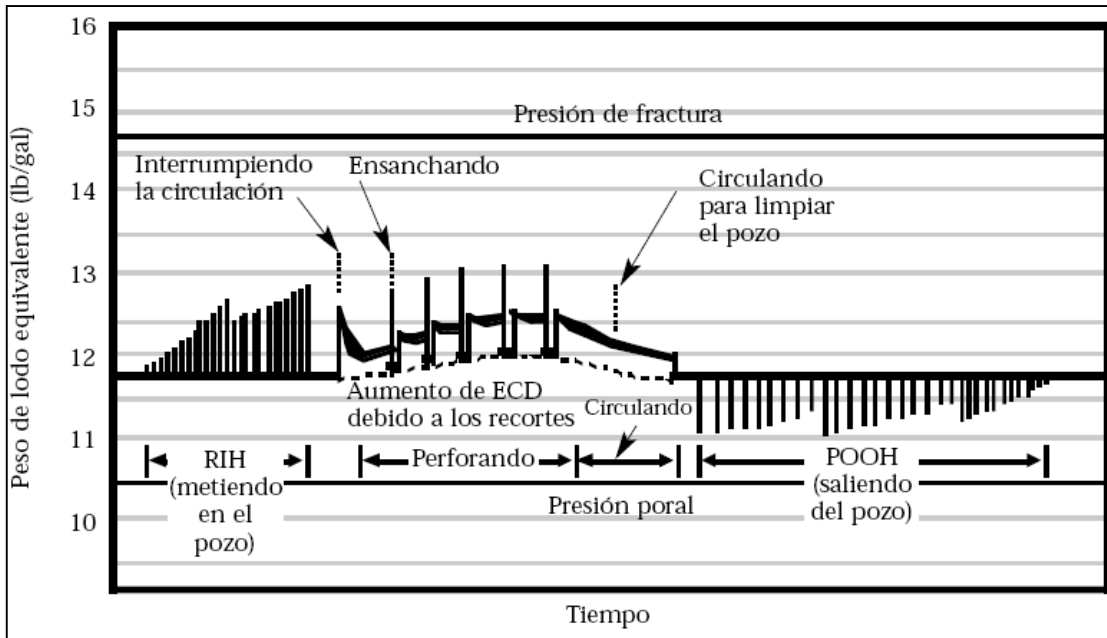


Figura 5.4 Presión de fondo para ciclo normal de perforación.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

La pérdida de circulación que resulta de la presión inducida suele ser causada por una de dos situaciones (API, 2001):

- 1) Colocación incorrecta de la tubería de revestimiento intermedia: Si se coloca la tubería de revestimiento encima de la zona de transición, pasando de presiones normales a presiones anormales, las presiones ejercidas por el lodo más pesado (requerido para balancear las presiones crecientes) inducirá frecuentemente la fracturación en el asiento débil de la zapata. Las pérdidas causadas por la fracturación ocurren generalmente cerca del asiento de la zapata anterior, y no a la profundidad de la barrena, aunque la tubería de revestimiento haya sido colocada correctamente.
- 2) Presiones de fondo excesivas: resultan de muchas condiciones, incluyendo:

a) Fuerzas mecánicas:

- Hidráulica inapropiada: Caudales y velocidades de bombeo excesivos, causando altas presiones de Densidad Equivalente de Circulación (ECD).
- Prácticas de perforación:
 - ✓ Aumento demasiado rápido de las velocidades de bombeo después de realizar las conexiones y los viajes. Esto puede ser extremadamente importante para tratar los fluidos base aceite. Si no se aumenta lentamente la velocidad de las bombas, las presiones de circulación impuestas sobre la formación pueden ser mucho más altas, ya que los lodos base aceite tienen tendencia a diluirse a las temperaturas más altas generadas durante la circulación, y a espesarse a las temperaturas más bajas producidas durante los viajes. No es raro que las presiones de circulación disminuyan en más de 100 psi mientras que el lodo se calienta hasta lograr la temperatura de circulación.
 - ✓ Subir o bajar la tubería demasiado rápido (suabeo/pistoneo).
- Velocidad de Penetración (ROP) excesiva: una ROP excesiva para un caudal determinado resultará en una alta concentración de recortes en el fluido anular, causando una alta ECD.

b) Condiciones del pozo.

- Desprendimiento de la lutita o aumento de la carga de sólidos en el espacio anular y alta densidad equivalente de circulación.
- Acumulación de recortes en una porción derrumbada del pozo o en el lodo.
- Camas de recortes o asentamiento de barita en la parte inferior de un pozo direccional, o posible caída.
- Amagos (surgencias imprevistas de presión) y procedimientos de control de pozo.

c) Propiedades del lodo.

- Viscosidades y esfuerzos de gel excesivos.
- Acumulación de sólidos perforados.
- Revoques gruesos que reducen el diámetro hidráulico del pozo.
- Densidad excesiva del ludo o aumento acelerado de la densidad del lodo.
- Columna de lodo desbalanceadas.

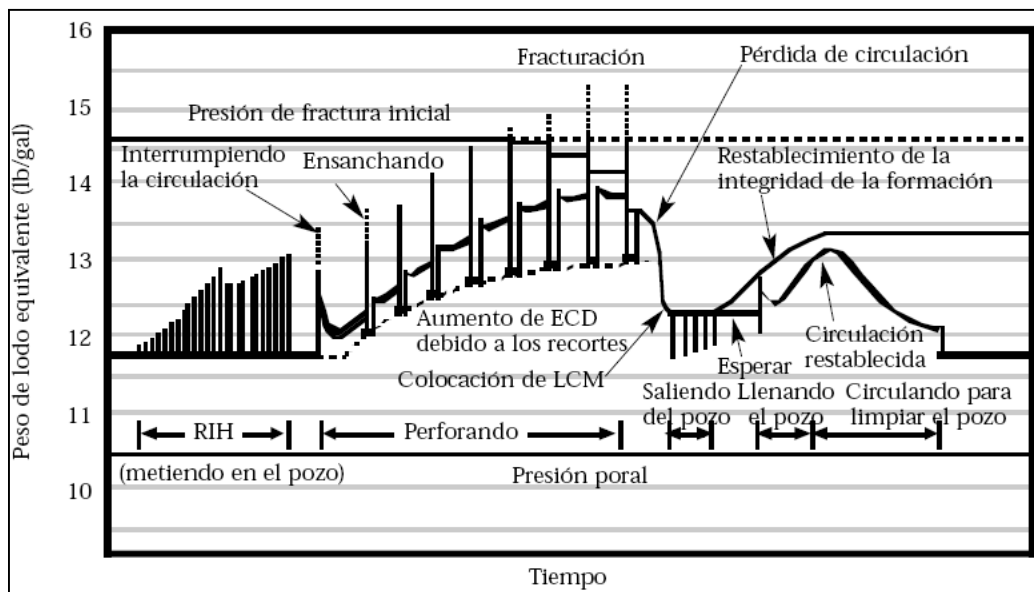


Figura 5.5 Ciclo de perforación y el restablecimiento subsiguiente de parte de la integridad de formación.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

5.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

La clasificación de las pérdidas de circulación está en función de factores tales como.

- 1) La cantidad de fluido de perforación perdido por unidad de tiempo.
- 2) El tipo de formación y profundidad a la que ocurre la pérdida.

En la tabla 5.1 se resume la clasificación de las pérdidas de circulación en función de los factores antes mencionados (API, 2001).

Tabla 5.1 Clasificación de pérdidas de circulación

Tipo de pérdida	Cantidad de fluido perdido (barriles/hr) (api, 2001)	Formación en las que ocurre
Pérdida leve	1 a 10	Zonas permeables
Pérdida parcial	10 - 500	Pequeñas fracturas naturales o inducidas, zonas permeables
Pérdida total	superior a 500	Cavernas, fracturas inducidas.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

5.3.1 MATERIALES PARA EL CONTROL DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN.

Una enorme cantidad de materiales han sido utilizados para poder mitigar los problemas relacionados a las pérdidas de circulación, los cuales en un principio se dividieron en tres categorías, granulares, laminares y fibrosos (Darley & Gray, 1988), sin embargo estudios recientes (Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014) revelan que la amplia gama de materiales obturantes puede ser clasificada en función de no solo su apariencia física sino también en función de sus propiedades químicas como: solubilidad en ácido, capacidad de adsorción de agua, reactividad, etc. Dicha clasificación se presenta a continuación (Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014):

1. Materiales fibrosos
2. Materiales laminares
3. Materiales granulares
4. Mezclas de materiales de pérdida de circulación (materiales obturantes o puenteantes).
5. Materiales solubles en ácido/solubles en agua.
6. Materiales de alta tasa de filtrado (HFLS, High Fluid Loss Squeeze)
7. Materiales hinchables/hidratable.
8. Nanopartículas

5.3.1.1 MATERIALES FIBROSOS.

Materiales fibrosos (tabla 5.2) tales como bagazo de caña, fibras de algodón, llantas en tiras ralladas, fibras de madera y pulpa de papel, tienen relativamente poca rigidez y tienden a ser forzados en largas aperturas. Si una gran cantidad de lodo conteniendo una alta concentración de material fibroso es bombeado en la formación, puede surgir un efecto sellador como producto de una resistencia de fricción (figura 5.6b). Si las aperturas son demasiado pequeñas como para que el material entre, se irá formando gradualmente una torta de filtrado en las paredes del pozo, la cual puede ser removida cuando el pozo es limpiado.

Tabla 5.2. Ejemplo de materiales fibrosos.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Fibra natural de celulosa	BAROFIBRE	Halliburton	Puede ser usado como tratamiento preventivo o en píldoras concentradas para mitigar desde filtraciones a pérdidas severas.
	M-I-X-II	MI SWACO	
	VINSEAL	MI SWACO	
	CHECK-LOSS	Baker Hughes	
	MESUCO-FIBER	Messina Chemicals	
	CyberSeal	NEWPARK	
	FIBER SEAL	GEO Drilling Fluids	
Fibra micro celulósica usada en fluidos base agua	DYNARED	Drilling Specialities	Utilizado como tratamiento correctivo de pérdidas por filtración o en píldoras concentradas para pérdidas parciales
Fibra micro celulósica usada en fluidos base aceite	DYNA-SEAL	Drilling Specialities	

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Fibras de cedro rallado	M-I-CEDAR FIBER	MI SWACO	Puede ser usado como tratamiento preventivo o como píldora de alta tasa de filtrado.
	FIBER PLUG	Anchor Drilling Fluids	
	PLUG-GIT	Halliburton	
	MIL-CEDAR	Baker Hughes	
Fibra mineral soluble en ácido	CAVI-SEAL-AS	Messina Chemicals	Puede ser utilizado como un pre tratamiento o como píldora concentrada.
	MAGMA FIBER	GEO Drilling Fluids/ Anchor Drilling Fluids	

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.2 MATERIALES ESCAMOSOS (LAMINADOS).

Materiales como celofán, mica y astillas de madera, son utilizados con el propósito de que se adhieran a la superficie de la formación y de esa forma cubran las aberturas. Si son lo suficientemente fuertes como para resistir la presión del lodo, estos materiales forman una torta de filtro externo, caso contrario, los materiales son forzados a entrar en las aberturas, teniendo de esa forma un efecto sellador parecido al de los materiales fibrosos (Darley & Gray, 1988; API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La tabla 5.3 muestra una lista de materiales escamosos distribuidos comercialmente

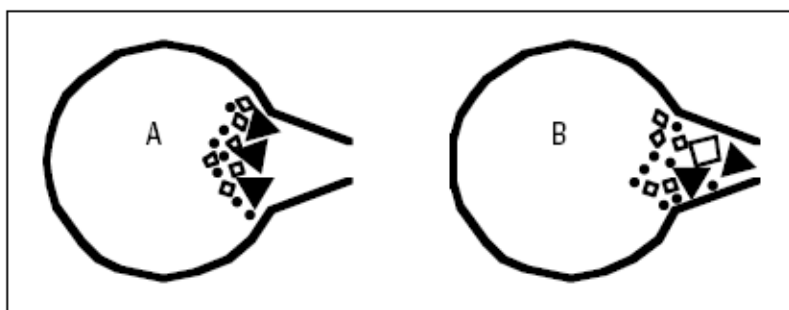


Figura 5.6a) Sello de la fractura en la cara del pozo. **b)** Sello de la fractura dentro de la formación.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

Tabla 5.3. Ejemplos de materiales laminares.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Celofán	MILFLAKE	Baker Hughes	Uso con otros materiales de pérdida de circulación, con respecto a la proporción está dependerá de la gravedad de la pérdida
	MESUCO-FLAKE	Messina Chemicals	
Mica	MILMICA	Baker Hughes	Usado como medida preventiva.
	MESUCO-MICA	Messina Chemicals	
Carbonato de calcio en laminas	SOLUFLAKE	Baker Hughes	Usado en pérdidas por filtración y en pérdidas severas.

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.3 MATERIALES GRANULARES

Entre los materiales granulares (tabla 5.4) podemos mencionar, cascara de nueces (finas, medianas y gruesas), grafito grueso y carbonato de calcio. Estos materiales poseen fuerza y rigidez y cuando el correcto tamaño de partícula es utilizado, ocurre un efecto sellador por interferencia dentro de las aberturas, es decir, se busca un material de tamaño similar al de los poros de la formación y de esa forma se establece una especie de puente (Darley & Gray, 1988).

Tabla 5.4. Ejemplos de materiales granulares.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Cáscara de nuez	WALL-NUT	Halliburton	Usado como píldora concentrada o como material de alta taza de filtrado. Es usado para mitigar pérdidas por filtración, y para pérdidas parciales y totales
	MIL-PLUG	Baker Hughes	
	NewPlug	NEWPACK	
	WALLNUT HULLS	GEO Drilling Fluids	
	NUTSHELL	Anchor Drilling Fluids	
	MESUCO-PLUG	Messina Chemicals	
Doble-Carbono resiliente angular basado en el tamaño del grafito.	STEELSEAL	Halliburton	Puede ser utilizado como pre tratamiento o como píldora dependiendo de la severidad de la pérdida. También es utilizado como material de fortalecimiento de las paredes del pozo
	G-SEAL	MI SWACO	
	C-SEAL	MI SWACO	
	LC-LUBE	Baker Hughes	
	NewSeal	NEWPARK	
Mezcla de partículas solubles en ácido	EZ-PLUG	Halliburton	Puede ser utilizado como pre tratamiento para pérdidas por filtración

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Mármol	BARACARB	Halliburton	Usados como agentes puenteantes para problemas de pérdidas de circulación. También es utilizado como material de fortalecimiento de las paredes del pozo.
	SAFE-CARB	MI SWACO	
	NewCarb	NEWPARK	
	FLOW-CARB	Baker Hughes	
	MIL-CARB	Baker Hughes	
	W.O.30	Baker Hughes	Utilizado para pérdidas severas

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014.

Experimentos realizados por Howard y Scott mostraron, que a una mayor concentración de materiales granulares, mayor es el efecto de puente en las aberturas, demostrando de esa forma que los materiales granulares eran (en su mayoría) superiores a los materiales escamosos y fibrosos (ver figura 5.7 y 5.8).

5.3.1.4 MEZCLA DE MATERIALES DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN.

Diferentes manuales de perforación sostienen que para tener éxito en el sello de una fractura lo correcto es utilizar una combinación de materiales obturantes (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; ASME Shale Shaker Committee, 2005; Baroid, 2000; INTEQ, 1998; PDVSA, 2002), esto es debido a la diversidad de propiedades y tamaños de partículas que presenta el hecho de usar mezclas de materiales obturantes (Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014). Una variedad de mezclas están disponibles para diferentes escenarios (tabla 5.5). Estas mezclas contienen una combinación óptima de partículas, las cuales han sido sometidas a diversas pruebas para probar su capacidad de sello, sin embargo la utilización de un tamaño inadecuado de partículas conduce a un pobre desempeño (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001).

Tabla 5.5. Ejemplos de mezclas de materiales obturantes.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Mezcla de materiales obturantes en un amplio rango de tamaño de partícula	STOPPIT	Halliburton	Son utilizados como una píldora concentrada.
	PRIMA SEAL	GEO Drilling Fluids	
	STOP-FRAC S	Halliburton	
	WELL-SEAL	Drilling Specialties	Empleado para mitigar pérdidas leves y parciales basadas en el tamaño de partícula.
	BARO-SEAL	Halliburton	Puede ser aplicado como tratamiento preventivo o como una píldora para
	STOP-FRAC D	Halliburton	
	M-I SEAL	MI SWACO	
	MIL-SEAL	Baker Hughes	

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
	CHEM-SEAL	Anchor Drilling Fluids	aminorar las pérdidas por filtración y pérdidas severas.
	KWIK-SEAL	Messina Chemicals	
	MESUCO-SEAL	Messina Chemicals	
Mezcla de partículas solubles en ácido	EZ-PLUG	Halliburton	Puede ser empleado como pre tratamiento para pérdidas por filtración o pérdidas severas.
Mezcla de partículas destinadas a ser usadas en espumas	QUIK-WEDGE	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Puede ser usado como pre tratamiento o en píldora concentrada
Mezcla de partículas que incluyen materiales naturales modificados u otros aditivos	STRESS-SHIELD	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Puede ser usado como pre tratamiento o en píldora concentrada

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.5 MATERIALES SOLUBLES EN ÁCIDO/SOLUBLES EN AGUA.

Los materiales utilizados convencionalmente tienen la clara desventaja de dañar la formación cuando son usados en la zona del reservorio, como consecuencia el estudio de materiales que no dañen la formación ha crecido. En ese sentido los materiales solubles en ácido/solubles (tabla 5.6) en agua son considerados como materiales de pérdida de circulación no dañinos que pueden ser utilizados para restablecer la circulación en la zona del reservorio. Ejemplos: carbonato de calcio y fibras minerales.

Tabla 5.6. Ejemplos de materiales obturantes solubles en ácido/solubles en agua.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Mezcla de partículas solubles en ácido	EZ-PLUG	Halliburton	Puede ser empleado como pre tratamiento para pérdidas por filtración o pérdidas severas.
Polímeros solubles en agua no dañinos a la formación combinados con fibras de celulosa de tamaño seleccionado.	N-SQUEEZE	Halliburton	Utilizado para pérdidas severas
Fibra mineral soluble en ácido	CAVI-SEAL-AS	Messina Chemicals	Puede ser utilizado como un pre tratamiento o como píldora concentrada.
	MAGMA FIBER	GEO Drilling Fluids/ Anchor Drilling Fluids	
	N-SEAL	Halliburton	
Sales tratadas	BARAPLUG	Halliburton	Usado como sello temporal en formaciones permeables
Mármol	BARACARB	Halliburton	Usados como agentes puenteantes para problemas de pérdidas de circulación. También es utilizado como material de fortalecimiento de las paredes del pozo.
	SAFE-CARB	MI SWACO	
	NewCarb	NEWPARK	
	FLOW-CARB	Baker Hughes	
	MIL-CARB	Baker Hughes	

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
	W.O.30	Baker Hughes	Utilizado para pérdidas severas
Carbonato de calcio en laminas	SOLUFLAKE	Baker Hughes	Usado en pérdidas por filtración y en pérdidas severas.

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.6 MATERIALES DE ALTA TASA DE FILTRADO.

Este tipo de combinación de materiales obturantes es por lo general utilizada para mitigar pérdidas graves en zonas fracturadas o de alta permeabilidad. El proceso de filtración forma un tapón que sella la zona de pérdida. Este tratamiento generalmente requiere procesos especiales con el objeto de inyectar los materiales en la zona de pérdida (Chevron Phillips Chemical Company, 2014).

En la tabla 5.7 se presenta una serie de materiales de alta tasa de filtrado con sus respectivos proveedores.

Tabla 5.7. Ejemplo de materiales de alta tasa de filtrado.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Inyección de alta tasa de pérdida de filtrado	GEO STOP LOSS	GEO Drilling Fluids	Utilizados como inyección de alta tasa de pérdida de filtrado
Inyección de alta tasa de pérdida de fluido y sólidos reactivos.	DIASEL M	Drilling Specialities	

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Formulación especial de inyección de alta tasa de pérdida de fluidos y sólidos.	DIAPLUG	Messina Chemicals	
Mezcla especial de materiales fibrosos y granulares	X-PRIMA	NEWPARK	
Mezcla de materiales fibrosos y granulares	NewBridge	NEWPARK	
Fibra de celulosa combinada con una mezcla de polímeros orgánicos	ULTRA SEAL	GEO Drilling Fluids	Utilizado como una píldora concentrada
Mezcla de partículas finas que promueven la alta filtración.	WEDGE-SET	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Empleado como inyección de alta tasa de pérdida de filtrado
Combinación de carbón resiliente y componentes maleables	DUO-SQUEEZE	Halliburton	Empleado como inyección de alta tasa de pérdida de filtrado o como píldora concentrada

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.7 MATERIALES HINCHABLES/HIDRATABLES.

Este tipo de tratamiento es básicamente una mezcla de materiales obturantes con un material altamente reactivo como son los polímeros. Estos tratamientos serán activados ya sea por agentes químicos o por el contacto con el fluido de perforación o fluidos de formación, como resultado se formará un sello en la zona de pérdida. En este tipo de prácticas el control del crecimiento de la partícula es fundamental puesto que lo ideal fuese que el material se hinchase cuando ya esté en la fractura de lo contrario su tamaño será excesivo y el rendimiento será pobre (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Chevron Phillips Chemical Company, 2014). En la tabla 5.8 se muestran una serie de materiales con las características antes mencionadas.

Tabla 5.8. Ejemplos de materiales hinchables/hidratables.

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Combinación de polímeros adsorbentes combinados con carbón resiliente y otros materiales	HYDRO-PLUG	Halliburton	Utilizado como una píldora hidratable para tapar fracturas y formaciones cavernosas.
Material granular seco y en polvo combinado con polímeros sintéticos, minerales inorgánicos, agentes químicos y estabilizadores orgánicos	SUPER-STOP	Messina Chemicals	Empleado como píldora adsorbente para pérdidas severas

Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Polímeros solubles en agua no dañinos a la formación combinados con fibras de celulosa de tamaño seleccionado.	N-SQUEEZE	Halliburton	Utilizado para pérdidas severas

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.1.8 NANOPARTÍCULAS.

Entre los ejemplos más comunes podemos mencionar el óxido de silicio, hidróxido de hierro y carbonato de calcio (ver tabla 5.9), este tipo de partículas pueden ser preparadas tanto ex-situ como in-situ, la preparación ex-situ consiste en la preparación de las nanopartículas en una solución acuosa cuyo destino será ser adicionada al lodo posteriormente, diferente de la preparación in-situ que es cuando se agregan las nanopartículas al lodo directamente. Para efectos prácticos se recomienda la adición in-situ con el objeto de no incrementar la cantidad de agua en el lodo en el sistema de circulación (Chevron Phillips Chemical Company, 2014). Otros tipos de nanopartículas son obtenidas del óxido de aluminio y el óxido de titanio, los cuales se han descubierto recientemente que disminuyen la permeabilidad de zonas porosas, a su vez se ha determinado que el carbón en un rango de gravedad específica de 1.9 a 2.1 es capaz de reducir el espesor del revoque y mitigar los problemas de atascamiento de tubería (Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014).

Tabla 5.9. Ejemplos de nanopartículas utilizadas como materiales de pérdida de circulación.

Nanopartículas			
Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Nanopartículas de hidróxido de hierro	Iron Hydroxide NP	nFluids, Inc.	Usado como tratamiento para

Nanopartículas			
Nombre genérico	Nombre comercial	Proveedor	Aplicación
Nanopartículas de carbonato de calcio	Calcium Carbonate NP	nFluids, Inc.	sellar micro fracturas y mejorar la estabilidad del pozo

Fuente: Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014

5.3.2 TAPONES DE REFUERZO (PÉRDIDAS TOTALES)

Cuando la pérdida del fluido de perforación supera los 10 metros cúbicos, se está en presencia de una pérdida total (García & Vásquez, 2013) dichas pérdidas son provocadas por lo general, cuando se perfora una zona cavernosa o una fractura inducida haciendo que la presión hidrostática descienda abruptamente ocasionando pérdidas considerables.

Para solucionar la situación, se recurre al uso de lechadas, cuya consistencia aumenta después de su colocación, entre las lechadas más comunes podemos mencionar: cemento hidráulico, mezcla de diésel – bentonita – lodo, aunque en el caso del cemento se debe tener especial cuidado, pues si se utiliza para sellar un canal en agujero abierto, la fuerza del cemento puede reducirse debido a la contaminación con el lodo (Darley & Gray, 1988).

El principio fundamental de la lechada diésel – bentonita – lodo (DOB) radica en que grandes cantidades de bentonita pueden ser instantáneamente mezcladas con diésel. Cuando la lechada de DOB es mezclada con agua y lodo, la bentonita se hidrata, y forma un denso tapón de plástico cuya fuerza depende de la relación lodo: DOB. Una lechada ajustada a un tapón duro puede ser obtenida adicionando cemento junto con bentonita y diésel (DOBC). También se recomienda utilizar mezclas de lodo y DOB en una relación 1:1 a 2:1, de tal forma que si se somete a una presión repentina durante subsecuentes operaciones de perforación, el tapón se deformara para mantener el sello (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001).

Otro tipo de lechada que engruesa el fondo del agujero está hecha, típicamente dispersando poliacrilamida en agua y después realizando una emulsión entre la dispersión y un aceite de parafina mineral; generalmente poliamina. La bentonita es después adicionada y permanece en la fase externa. En condiciones normales de velocidad de cizalla hay un pequeño contacto entre la bentonita y el agua, por lo que la suspensión permanece relativamente delgada mientras es bombeada en la tubería de perforación (Darley & Gray, 1988). Sin embargo a mayores velocidades de cizalla imperando sobre la barrena, se rompe la emulsión y la bentonita se mezcla con el agua, una vez rota la emulsión la poliacrilamida resulta en una masa semisólida capaz de sellar grietas y fisuras en la formación.

5.4 RECUPERACIÓN DE LA CIRCULACIÓN.

Cuando se observa inicialmente la pérdida de circulación, el primer paso siempre deberá ser el diagnóstico (Darley & Gray, 1988) es decir, responder en lo posible las siguientes interrogantes:

- 1) ¿Por qué ocurrió la pérdida?
- 2) ¿A qué profundidad está ubicada la pérdida?
- 3) ¿Cuáles son las características de la formación?

Las condiciones que existían en el momento en que la pérdida ocurrió deben ser registradas con precisión y estudiadas detalladamente.

5.4.1 DIAGNÓSTICO.

Se debería tomar en cuenta el momento del incidente (durante la perforación, circulación o los viajes), el tipo de pérdida (infiltración, parcial o completa) y la severidad de la pérdida respecto a las formaciones expuestas. Esta información ayudará a determinar la causa de la pérdida, la posición en el pozo donde ocurrió la pérdida y el mejor remedio para la situación. La posición probable de la zona de pérdida puede ser determinada a partir de la información disponible en el equipo de perforación (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Baroid, 2000; Darley & Gray, 1988) Por ejemplo:

1. Información sobre la formación.
 - a) Las formaciones de carbonato contienen zonas cavernosas y fisuradas. Este tipo de pérdida sería indicado por una pérdida rápida, grande y acompañada por una caída de la columna de perforación.
 - b) Las formaciones de lutita tienden a fracturarse de una manera que puede construir un tipo de pérdida más lenta. Esta pérdida debe ser controlada rápidamente, ya que si no lo es, causara la ampliación de la fractura y perjudicará la integridad de la formación.
 - c) Un cambio de la velocidad de perforación puede indicar un cambio de formación, posiblemente acompañado de un cambio de la integridad de la formación.
2. Información sobre las operaciones
 - a) Algún tipo de pérdida de circulación inducida por la presión hidráulica sería indicado por el aumento del peso del lodo en el momento de la pérdida. Este tipo de pérdida puede sellarse por sí misma (infiltración) o requerir un tratamiento (fractura inducida), según la severidad de la pérdida.
 - b) El movimiento rápido de la columna de perforación causará aumentos bruscos de la presión que pueden causar fracturas o abrir de nuevo las zonas de pérdidas previamente selladas. A menos que una zona de pérdida previamente sellada haya sido sometida a una prueba de presión, siempre se debe suponer que esta área sigue siendo una fuente potencial de pérdida. La velocidad a la cual la tubería se mueve durante los viajes y durante el ensanchamiento debería ser ajustada para compensar esta debilidad.

Al contar con la información descrita anteriormente, se puede tomar una decisión mejor fundada, en lo que se refiere a las medidas apropiadas para eliminar las pérdidas.

5.4.2 LOCALIZACIÓN DE LA PÉRDIDA.

Es muy importante restablecer la circulación lo antes posible, ya que la pérdida de circulación aumenta el costo del lodo y puede causar otros problemas del pozo que resultan en costos adicionales de operación.

En esta etapa lo que se pretende es (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Darley & Gray, 1988):

- 1) Localizar el punto exacto de la pérdida de circulación. Contrariamente a la opinión común, la mayoría de las pérdidas no ocurren en el fondo del pozo. Se ha determinado que más de la mitad de las pérdidas ocurren justo debajo de la zapata de la última tubería de revestimiento. Varios métodos están disponibles para localizar el punto de la pérdida de circulación. Éstos incluyen:
 - a) Estudio de la ubicación de la zona de pérdida. El estudio de la ubicación de la zona de pérdida se lleva a cabo introduciendo un pequeño girador en el pozo con un cable monofilar, de tal manera que el rotor de aletas girará o rodará si hay algún movimiento horizontal del lodo. La velocidad (RPM) del rotor se registra en una película mediante una serie de rayas o espacios. La velocidad será muy lenta hasta que se alcance el punto de pérdida. La velocidad del rotor aumentará claramente al punto de pérdida. Este método tiene dos inconvenientes:
 - i. Requiere la pérdida deliberada de grandes volúmenes de lodo.
 - ii. No es eficaz cuando el lodo ya contiene material obturante.
 - b) Estudio de temperaturas: El estudio de temperaturas depende de un termómetro sub superficial para medir la diferencia entre la temperatura del lodo y la temperatura de la formación. Este estudio se lleva a cabo introduciendo en el pozo un elemento sensible que cambia su resistencia a medida que la temperatura cambia. Se realizan dos estudios. El primero tiene por objeto establecer el gradiente de temperatura del pozo una vez que el lodo está en equilibrio con la formación. El segundo estudio se realiza inmediatamente después de añadir nuevo lodo frío al pozo. Esto producirá una marcada discrepancia entre las temperaturas al punto de pérdida (Ver figura 5.9).

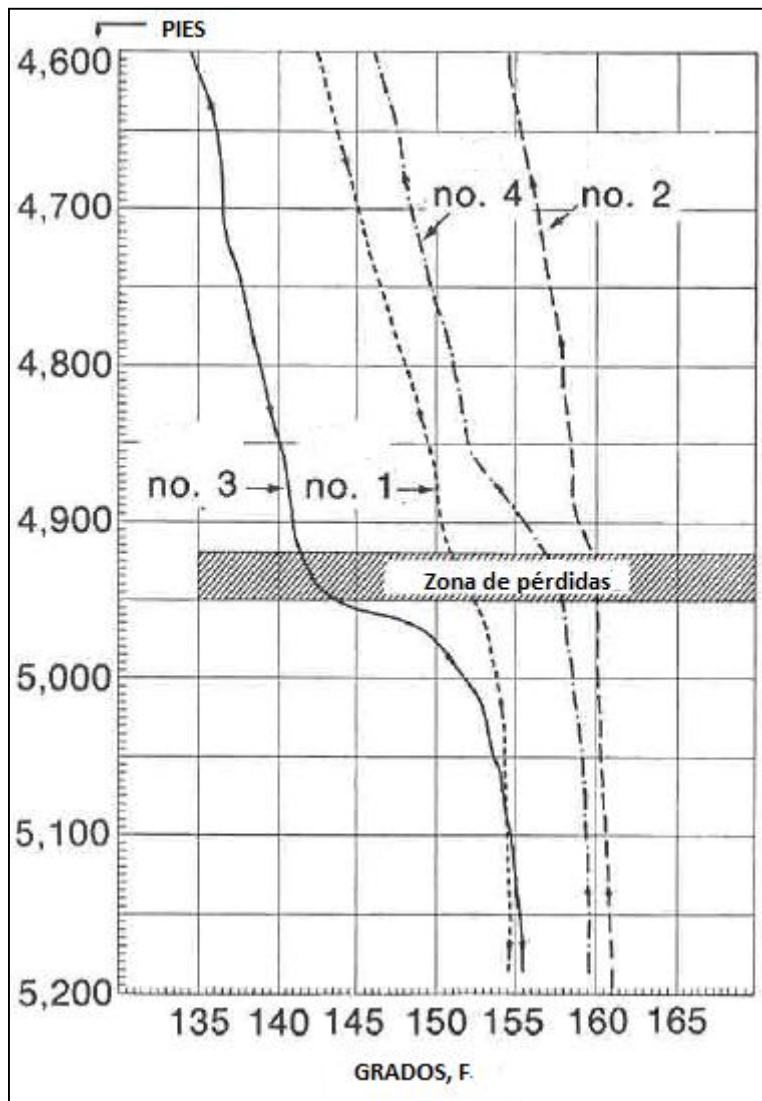


Figura 5.9. Localización de zona de pérdida de circulación mediante el estudio de temperaturas.

Fuente: Darley & Gray, 1988.

- c) Estudio con temperatura de cable: La herramienta estudio de temperatura con cable se compone esencialmente de una resistencia de alambre calibrada que es sensible a los cambios de temperatura. Se introduce la herramienta hasta el punto deseado en el pozo y se registra la resistencia. Luego se bombea lodo dentro del pozo. Si la herramienta está ubicada encima del punto de pérdida, el lodo circulará a través de ésta, produciendo un cambio de la resistencia. Si la

resistencia no cambia, la herramienta está ubicada debajo del punto de pérdida. La herramienta puede ser usada en cualquier tipo de lodo, pero se requiere una gran cantidad de lodo para realizar este estudio.

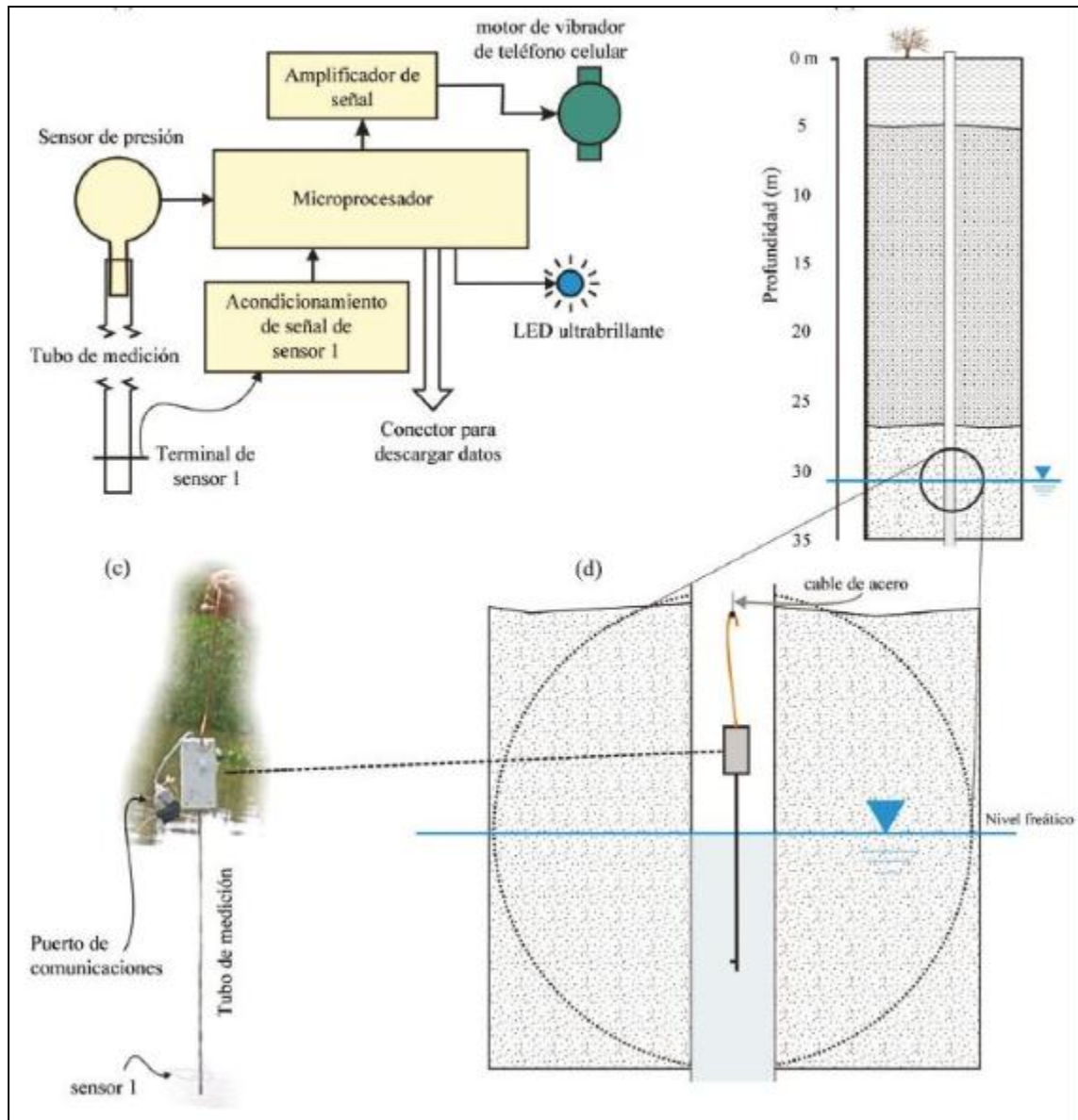


Figura 5.10 Esquema simplificado del funcionamiento de un transductor para medir presiones.

Fuente: Chevron Phillips Chemical Company, 2014.

d) Estudio con transductor para medir presiones. Este tipo de estudio incluye el uso de un cilindro corto, abierto en su parte superior y con diámetro reducido en su parte inferior para restringir el flujo de lodo a través del tubo (Figura 5.10). Se instala una ventana provista de un diafragma de neopreno en un lado del tubo. Un electrodo realiza un movimiento de vaivén entre los dos electrodos fijos en el diafragma. La diferencia de presiones a través del diafragma produce una variación del potencial (voltaje) en el circuito eléctrico, indicando la velocidad de flujo del lodo y el punto en que el lodo se vuelve estático. Este método parece ofrecer ciertas ventajas:

- i. Se trata de un método de construcción y operación simple.
- ii. No queda fácilmente obturado por material de pérdida de circulación.
- iii. Puede ser utilizado prácticamente en cualquier tipo de lodo.
- iv. Puede ser utilizado para localizar un agujero dentro de la tubería de revestimiento

Por otro lado posee 2 inconvenientes:

- i. Se requiere un flujo de lodo importante.
- ii. Puede que no sea fácil conseguir el equipo necesario.

Aunque sea generalmente aconsejable localizar la zona de escape, varios factores hacen que los estudios no sean realizados con más frecuencia:

- i. Se pierde mucho tiempo para hacer llegar los equipos necesarios al equipo de perforación, y estos estudios requieren una pérdida deliberada de lodo.
- ii. A veces los resultados de estos estudios son difíciles de interpretar.
- iii. Las condiciones no son siempre propicias para la introducción de las herramientas, debido a presiones sub superficiales anormales.

2) Determinar la severidad de la pérdida. Los mejores indicadores de la severidad de la pérdida son la cantidad de pérdida y la altura de la columna de lodo estático. Si la altura de la columna de lodo estática no es visible, puede ser determinada mediante la introducción de un pedazo de madera (4 pulg. x 4 pulg. x 4 pies) con un cable de alambre. Otra opción consiste en usar un dispositivo de medición por eco sónico.

a) Las zonas de pérdidas pueden ser clasificadas como:

- i. Zonas de pérdida por filtración (1 a 10 bbl/hora).
 - ii. Zonas de pérdida parcial (10 a 500 bbl/hora).
 - iii. Zona de pérdidas totales (pozo lleno hasta el nivel del lodo de 200 a 500 pies).
 - iv. Zona de pérdida parcial o total hacia fracturas inducidas profundas.
 - v. Zonas de pérdida total grave (pozo lleno hasta el nivel del lodo 500 a 100 pies).
- 3) Determinar el tipo de pérdida. Este será determinado principalmente por la litología. La pérdida de circulación, en lo que se refiere a la litología, se describió anteriormente en la sección sobre “Causas de la Pérdida de Circulación”. Estas clasificaciones pueden ser relacionadas con los cuatro tipos de formación donde se producen las pérdidas de lodo.
- a) Formaciones poco profundas no consolidadas. Características de identificación:
 - i. Registro de pozos vecinos que identifican la zona y sus características.
 - ii. Reducción gradual del nivel del lodo en los tanques.
 - iii. La pérdida puede ser total si se sigue perforando.
 - b) Formaciones que tienen fracturas naturales como la caliza y algunas formaciones de lutita dura. Características de identificación.
 - i. Registros de pozos vecinos e indicadores geológicos.
 - ii. Pueden ocurrir en cualquier tipo de roca dura, quebradiza.
 - iii. Pérdida marcada por la disminución gradual del nivel del lodo en los tanques.
 - iv. La pérdida puede ser total si se sigue perforando.
 - c) Fracturas inducidas por esfuerzos mecánicos o hidráulicos. Características de identificación:
 - i. Registro de pozos vecinos que incluyen una hidráulica anular excesiva.
 - ii. Podrían ocurrir en cualquier tipo de roca, pero serían anticipadas en las formaciones que tienen planos típicamente débiles, como las lutitas blandas.
 - iii. La pérdida suele ser repentina y total.

- iv. La pérdida puede seguir cualquier aumento del peso del lodo o aumento brusco de la presión.
 - v. Pueden ocurrir en formaciones competentes o incompetentes.
- d) Zonas cavernosas normalmente limitadas a calizas. Características de identificación.
- i. Normalmente limitadas a caliza y a dolomita.
 - ii. La pérdida de retorno suele ser repentina y total.
 - iii. La barrena puede caer desde unas cuantas pulgadas hasta unos cuantos pies justo antes de la pérdida.

5.4.3 MEDIDAS CORRECTIVAS.

La mejor manera de enfocar el control de pérdida de circulación es evaluando la severidad de una zona de pérdida y estableciendo una correlación entre ésta y la técnica y el material de remediación, en lo que se refiere al tamaño del material y a su función. A continuación se presentan las medidas correctivas para casos específicos de pérdidas de circulación (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001).

Caso 1: Pérdidas por filtración

Las pérdidas por infiltración pueden producirse en cualquier tipo de formación cuando los agentes puenteantes no son lo suficientemente grandes para formar un sello (Darley & Gray, 1988; Baroid, 2000; API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001), o cuando no hay partículas finas para completar el sello. Los pasos son los siguientes:

- a) Sacar la tubería y esperar debería ser la primera técnica usada para tratar de restablecer los retornos completos.
- b) Si el pozo no permanece lleno durante el tiempo de espera, se debería considerar la técnica de mezclar una lechada de LCM que contiene agentes puenteantes finos a medianos o el uso de una inyección de presión de lechada de alta pérdida de filtrado.
- c) Reducir el peso del lodo, si es posible.

Caso 2: Pérdidas parciales que ocurren en grava, pequeñas fracturas naturales y fracturas inducidas levemente abiertas. En este caso las medidas que deben aplicarse son las mismas que en las pérdidas por filtración.

Caso 3: Pérdidas totales. Estas pérdidas ocurren en secciones de grava larga y abierta, intervalos largos de pequeñas fracturas naturales, grandes fracturas naturales o fracturas inducidas abiertas.

Procedimiento:

- a) La técnica de sacar la tubería y esperar debería ser la primera técnica usada para tratar de restablecer retornos completos.
- b) Si lo anterior no resuelve la dificultad, se recomienda el uso de lechadas (tapones duros o blandos).
- c) Reducir el peso del lodo, si es posible.

Caso 4: Pérdida parcial o total a fracturas inducidas profundas. Procedimiento:

- a) La técnica de sacar la tubería y esperar (4 a 8 horas) debería ser la primera técnica usada para tratar de restablecer retornos completos.
- b) Aplicar una inyección de presión de tapón blando.
- c) Si el pozo no permanece lleno durante el tiempo de espera, se debería considerar la técnica de mezclar una lechada de LCM que contiene una mezcla de agentes puenteantes grandes o el uso de una inyección de presión de lechada de alta pérdida de filtrado.
- d) Reducir el peso del lodo, si es posible.

Caso 5: Pérdidas totales graves que ocurren en grandes fracturas naturales abiertas, cavernas y fracturas inducidas.

- a) Inyectar una lechada de alta pérdida de filtrado o grandes cantidades de lechadas de aceite diésel-bentonita-cemento.

- b) Si las pérdidas totales graves siguen ocurriendo al penetrar en otras cavernas o fracturas naturales abiertas, la técnica de perforación ciega o con lodo aireado y colocación de la tubería de revestimiento debería ser considerada.
- c) Reducir el peso del lodo, si es posible.

Técnica de sacar la tubería y esperar.

Esta técnica debería ser usada contra las pérdidas por infiltración y las pérdidas parciales, así como las pérdidas a fracturas inducidas(Baroid, 2000). Excepto en el caso de pérdidas totales y repentinas en las formaciones de caliza que contienen grandes fracturas, fisuras o cavernas, la perforación y la circulación deberían ser interrumpidas en cuanto se observe la primera indicación de pérdida de circulación.

La barrena debería ser retirada hasta un punto seguro y el pozo debería permanecer estático durante un periodo de 4 a 8 horas. Monitorear cuidadosamente el pozo para detectar cualquier señal de intrusión de fluidos y cualquier riesgo de amago. Después del periodo de espera, buenas técnicas de perforación deben ser aplicadas para regresar al fondo del pozo minimizando las presiones ejercidas sobre las formaciones(API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Baroid, 2000).

Inyección de presión de lechada de alta pérdida de filtrado (API, 2001).

Casi todos los lodos pueden ser usados como fluidos de transporte para la colocación de materiales de pérdida de circulación, pero los fluidos que tienen tasas de filtración extremadamente altas son mejores. La filtración es el proceso que deja los materiales de pérdida de circulación y los sólidos del lodo como tapón firme en la abertura a través de la cual el lodo está pasando(API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001, págs. 439-440). El principio de esta técnica está ilustrado en la Figura 5.11.

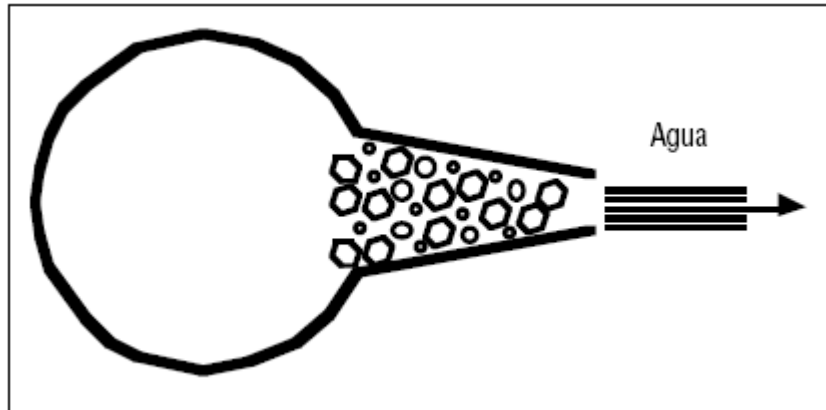


Figura5.11. Técnica de inyección de presión de alta pérdida de filtrado.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

Una vez que el puente inicial se ha formado, la filtración permite que el filtrado se separe de la lechada, depositando un revoque firme dentro de la fractura propiamente dicha. Esto es muy similar a la introducción de una cuña dentro de la fractura, la cual además de ser difícil de mover, pone fin a la fracturación del pozo. Esta técnica debería usarse contra las pérdidas por infiltración y las pérdidas parciales, así como las pérdidas totales menos graves. La preparación de las lechadas de alta pérdida de filtrado, y su aplicación a las zonas de pérdida cuya severidad varía de pérdida por infiltración a pérdida parcial y a pérdida total, se describen más adelante. Las aplicaciones a estas zonas están caracterizadas por pequeñas diferencias, la más importante siendo el aumento del tamaño del agente obturante a medida que la zona de pérdida se hace más grave. En primer lugar, la severidad de la pérdida debería ser determinada a partir del nivel de fluido y de la velocidad de pérdida. Luego se debe determinar el punto aproximado de la pérdida y definir el tipo de formación que está tomando el lodo. Si se sospecha que la formación está sometida a la fracturación hidráulica, el punto de pérdida más probable estará ubicado justo por debajo de la zapata de cementación de la tubería de revestimiento.

5.4.4 CAUSAS QUE IMPIDEN EL RESTABLECIMIENTO DE LA CIRCULACIÓN.

Algunas de las causas más comunes que impiden, directa o indirectamente, el control de la pérdida de circulación son (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001; Darley & Gray, 1988):

- 1) Muchas veces la ubicación de la zona de pérdida no ha sido determinada; como resultado, los materiales son colocados en la posición incorrecta. En general, las zonas de pérdida no están en el fondo, sino cerca del último asiento de la zapata o punto de pérdida de circulación.
- 2) Los materiales de pérdida de circulación no se ajustan sistemáticamente al tipo y a la severidad de la zona de pérdida. Debe haber una mezcla de tamaños de partículas para iniciar y propagar un sello eficaz.
- 3) A veces hay cierta renuencia a usar la técnica requerida para tratar la severidad de la zona de pérdida.
- 4) No se mantienen registros precisos que describan las pérdidas, así como los materiales y las técnicas usados contra éstas. Los registros precisos de las experiencias adquiridas en un área determinada son valiosos.
- 5) Durante la cementación, las columnas no están balanceadas y el lodo de perforación pasa a través del tapón antes de que éste se fragüe. Además, cuando se retira la tubería del pozo después de colocar la lechada, el nivel de lodo en el espacio anular desciende y el lodo de la formación puede pasar a través de la lechada recién colocada. Las técnicas de columnas balanceadas y de bajar tapón deberían ser usadas.
- 6) La integridad de la formación es demasiado débil para soportar la presión hidrostática de la columna de fluido necesaria para controlar la presión en otras zonas expuestas.

5.5 EVALUACION CASOS PREVIOS

Se realizó una investigación bibliográfica sobre los problemas con pérdidas de circulación durante la perforación de cuatro pozos de los cuatro diferentes campos geotérmicos en el país, dichos pozos son denominados pozo A, pozo B, pozo C y pozo D y la información recaba se muestran a continuación:

5.5.1 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN EL POZO A

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
Etapa 1. Agujero 32" de 0.0 a 59.8 m		
NO SE PRESENTARON PÉRDIDAS		
Etapa 2 Agujero de 23" de 59.8 a 313 m.		
95.0 a 99.0	Pérdida parcial de circulación de 3.5 a 17.5 m^3/hr	Lodo viscoso + cascarilla de café + LCM (Carbonato de Calcio)
99.0 a 102.0	Pérdida parcial de circulación de 3.5 m^3/hr	Agregando cascarilla de café al lodo circulante
102.0	Pérdida total de circulación intermitente (1 min)	Lodo viscoso + Cascarilla de café + LCM (Carbonato de Calcio)
102.0 – 113.0	Pérdida parcial de circulación de 35 a 15 m^3/hr	Agregando cascarilla de café + LCM (Carbonato de Calcio) al lodo circulante
113.0 a 122.5	Pérdida total de circulación, inició en 14 m^3/hr	Perforando con lodo diluido. Se colocó Tapón de Cemento No.1 y 2
124.5-125.0	Pérdida parcial de circulación de 15.6 m^3/hr	Lodo viscoso + Cascarilla de café

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
125.0-127.0	Pérdida parcial de circulación de $3.5 \text{ m}^3/\text{hr}$	No disponible
163.5-164.0	Pérdida parcial de circulación ascendente hasta total	Evaluando comportamiento de pérdida
164.5 – 166.0	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo diluido. Se colocó el tapón No. 3
173.5 – 174.3	Pérdida total de circulación intermitente	Perforando con lodo contaminado de cemento del tapón previo
174.3 – 175.0	Pérdida total de circulación	Perforando formación de alta dureza con lodo diluido. Tapón de cemento No. 4
179.5 – 180.0	Pérdida parcial de circulación de 3.5 a $17.5 \text{ m}^3/\text{hr}$	Se bombeó lodo viscoso + cascarilla de café
180.0 - 182.5	Pérdida parcial de circulación de 2.4 y $15.6 \text{ m}^3/\text{hr}$	Se bombeó lodo viscoso + cascarilla de café
182.0 – 191.0	Pérdida parcial de circulación de 2 a $4 \text{ m}^3/\text{hr}$	No disponible
205.5 – 207.0	Pérdida parcial de circulación de $6 \text{ m}^3/\text{hr}$	No disponible

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
233.0 – 238.0	Pérdida parcial de circulación de 3.5, 20.1, 4.5, 21.2 y 4.5 m^3/hr	Se bombeó lodo viscoso + cascarilla de café
238.0 – 242.0	Pérdida parcial de circulación de 4.5 m^3/hr	No disponible
Etapa 3 Agujero de 17 1/2" de 313 - 370.5 m (Perforación vertical) 370.5 – 963.0 m (Perforación direccional)		
NO SE PRESENTARON PÉRDIDAS		
Etapa 4 Agujero de 12 1/4" de 1232.0 – 1834.0 m		
1232.0 – 1238.5	Pérdida parcial de circulación de 2 a 3 m^3/hr	Perforando y estabilizando formación con lodo de 38 s/l. Inicia dilución del lodo con agua.
1238.5 – 1258.0	Pérdida parcial de circulación de 6 a 8 m^3/hr	Perforando y estabilizando formación con lodo de 32 s/l.
1258.0 – 1286.5	Pérdida parcial de circulación de 8, 15, 58, 27, 45 y 30 m^3/hr	Perforando y estabilizando formación con lodo de 30 s/l (alta dilución) + baches de polímero.
1286.5 – 1363.0	Pérdida total de circulación	Perforando con mezcla agua-aire-espuma + baches base polímero. No se observan retornos a superficie.
1363.0 – 1421.0	Pérdida total de circulación intermitente	Perforando con mezcla agua-aire-espuma + baches base polímero. Se observó retornos intermitentes (se aumentó caudal de agua a 2304 lpm y aire hasta 600 cfm).
1421.0 – 1454.0	Pérdida total de circulación intermitente	Perforando con mezcla agua-aire-espuma + baches base polímero. Se observó retornos

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
		intermitentes (se aumentó caudal de agua a 2560 lpm, el aire fue de 400 cfm)
1454.0 – 1462.0	Pérdida total de circulación	Perforando con mezcla agua-aire-espuma + baches base polímero. Se observó retornos intermitentes (se aumentó caudal de agua a 2560 lpm, el aire fue de 400 cfm). Ya no se observó más retornos
1462.0 – 1834.0	Pérdida total de circulación	Perforando solo con agua + baches de polímero y bentonita (baja concentración).

Fuente:(LaGeo, 2014)

Elaboración propia

5.5.2 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN EL POZO B

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
Etapa 1 Agujero de 17 1/2"		
La primera etapa del pozo y parte de la segunda etapa (hasta 141 m), fueron perforadas con rotomartillo de 12¼" usando espuma aireada como fluido de perforación, imposibilitando la determinación de pérdidas de circulación en los primeros metros del pozo.		
Etapa 2 Agujero de 12 1/4"		
156.0 a 156.3	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N°1
156.3 a 166.50	Pérdida parcial de circulación de 27, 12 y 6 m ³ /hr	Lodo viscoso + cascarilla de café
166.50 a 171.50	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 2

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
	intermitente	
237.0 a 241.0	Pérdida parcial de circulación	Lodo viscoso + cascarilla de café
241.0	Pérdida parcial de circulación de $20m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
241.0 a 246.0	Pérdida parcial de circulación de 8 a $7m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
246.0 a 256.0	Pérdida parcial de circulación de 10 a $4m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
256.0 a 263.0	Pérdida parcial de circulación de $6m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
262.0 a 265.5	Pérdida parcial de circulación de $6m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
265.5 – 271.5	Pérdida parcial de circulación de 30, 6 y $10m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
271.5	Pérdida total de circulación intermitente (3 min)	Retorno a los tres minutos en pérdida parcial
271.5 a 275.0	Pérdida parcial de circulación de 20 a $10m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
275.0 a 281.0	Pérdida parcial de circulación de 10 a $6m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
281.0 a 284.5	Pérdida parcial de circulación de $5m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café
284.5 a 286.0	Pérdida parcial de circulación de 20 a $10m^3/hr$	Bache en reposo
286.0 a 288.0	Pérdida parcial de circulación	Lodo viscoso + cascarilla de café

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
	de $6 \text{ m}^3/\text{hr}$	
310.0 a 311.0	Pérdida parcial de circulación de $6 \text{ m}^3/\text{hr}$	No disponible
311.0 a 312.5	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 3
375.0 a 376.0	Pérdida parcial de circulación de $7 \text{ m}^3/\text{hr}$	Lodo viscoso + cascarilla de café
387.0	Pérdida total de circulación intermitente	Retorno a los tres minutos
396.0	Pérdida total de circulación intermitente	Retorno a los cinco minutos
406.0 a 414.5	Pérdida parcial de circulación de $20 \text{ a } 30 \text{ m}^3/\text{hr}$	Lodo viscoso + cascarilla de café
414.5 a 418.0	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 4, 5, 6 y 7.
418.0 a 421.50	Pérdida total de circulación	Perforación de formación en pérdida
421.5 a 425.0	Pérdida total de circulación intermitente	Perforación de formación en pérdida
425.0 a 443.0	Pérdida total de circulación	Bombeo de 25 m^3 se vació chispa al pozo Tapón de cemento N° 8, 9, 10 y 11 Mezcla de Flo-check Bombeo de 2.5 m^3 de INJECTROL Tapón de cemento N° 12 Mortero N° 1 de $0.8 \text{ m}^3 + 0.4 \text{ m}^3$ pedazos

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
		de ladrillo (tapón decemento N° 13) Mortero N° 2 de $0.8 m^3 + 0.4 m^3$ pedazos de ladrillo Ladrillo tipo block Mortero N° 3 de $0.8 m^3$ Tapón de cemento N° 14, 15 y 16 Mortero N° 4 de $2.4 m^3$ (chispa + arena + pedazos pequeños de ladrillo-block) (tapón de cemento N° 17) Tapón de cemento N° 18 y 19 Mortero de $1.2 m^3$ (arena + cemento al 2X1) (Tapón de cemento N° 20)
237.0 a 240	Pérdida parcial de circulación de 30 a $40m^3/hr$	Perforación de la formación en pérdidas
240.0 a 287.5	Pérdida total de circulación	Corrida de la tubería $9 \frac{5}{8}$ '' en pérdida total de circulación
Etapa 3 Agujero de $8 \frac{1}{2}$ ''		
240.0 a 287.5	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 21 (Con 4 % de bentonita) Tapón N° 22
301 a 310	Pérdida total de circulación	Tapón cemento N° 23
359 a 387.4	Pérdida total de circulación	Tapón cemento N° 25, 26 y 27

Fuente:(LaGeo, 2013)

Elaboración propia

5.5.3 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN EL POZO C

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
Etapa 1. Agujero de 23'' (9 m a 150 m)		
28.0 a 29.0	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N°1, 2 y 3
34.0	Pérdida total de circulación intermitente (5 min)	Lodo viscoso + cascarilla de café, se bajó el caudal
34.0 a 35.0	Pérdida parcial de circulación de 11.2, 4.5 y $2.2m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café, se bajó el caudal
35.0 a 44.00	Pérdida parcial de circulación de 13.6, 11.2, 6.7 y $2.5m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café, se bajó el caudal
62.00	Pérdida total de circulación intermitente (1 min)	Lodo altamente viscoso + cascarilla de café, se dejó en reposo 30 min
62.0 a 67.0	Pérdida parcial de circulación de 52.5, 30, 20.7, 11.2 y $60.7m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café, se aumentó el caudal.
67.0 a 73	Pérdida parcial de circulación de $4.5m^3/hr$	Cascarilla de café al lodo circulante
74.0	Pérdida total de circulación intermitente (1 min)	Lodo altamente viscoso + cascarilla de café, se dejó en reposo 30 min
74.0 a 79.5	Pérdida parcial de circulación de 6.7, 4.4 y $2.5m^3/hr$	Lodo viscoso + cascarilla de café, se aumentó el caudal.
87.5	Pérdida total de circulación (súbita)	Se bajó caudal de la bomba y se inició dilución del lodo

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
87.5 a 88.0	Pérdida total de circulación	Se continuó perforación en pérdida con lodo diluido y se bajó caudal
88.0 a 90.0	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento 4, 5 y 6
Etapa 2: Primer agujero de 12 1/4" (919.5 m a 1621.5 m)		
1519.0	Pérdida parcial de circulación de 90 m ³ /hr	Evaluación de pérdida a 1519 m
1519.0 – 1520.0	Pérdida parcial de circulación de 90-85 m ³ /hr	Se hizo circular agua fresca directamente al fondo
1520.0 – 1529.5	Pérdida parcial de circulación de 74-22 m ³ /hr	Tapón de cemento N° 2
1529.5 – 1545.0	Pérdida parcial de circulación de 22-14 m ³ /hr	Lodo viscoso + cascarilla de café
1545.0 – 1549.0	Pérdida parcial de circulación de 14-7.2 m ³ /hr	Lodo viscoso + cascarilla de café
1549.0 – 1558.0	Pérdida parcial de circulación de 8, 14, 55 y 60 m ³ /hr	Lodo viscoso + cascarilla de café
1558.0 – 1577.0	Pérdida parcial de circulación de 65, 71, 74, 85 y 90 m ³ /hr	Lodo viscoso + cascarilla de café
1577.0	Pérdida total de circulación	Lodo viscoso + cascarilla de café
1577.0 – 1592.0	Pérdida total de circulación intermitente (3 min)	Lodo viscoso + cascarilla de café
1592.0 – 1616.0	Pérdida total de circulación intermitente (3 min)	Lodo viscoso + cascarilla de café

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
1616.0 – 1621.5	Pérdida total de circulación	Retorno a los tres minutos en pérdida parcial
1621.5	Pérdida total de circulación intermitente (3 min)	Lodo viscoso + cascarilla de café
Etapas 2: Segundo agujero de 12 1/4" Side track(1095.0 m a 2000.0 m)		
1570.0 – 1574.0	Pérdida parcial de circulación de 36 a 44 m^3/hr	Se preparó circuito corto, evaluación de pérdida a 1570 m.
1574.0 – 1576.0	Pérdida parcial de circulación de 44 m^3/hr	Se perforó formación con lodo liviano (35 s/l), se agregó agua al fluido circulante.
1576.0 – 1583.0	Pérdida parcial de circulación de 44 a 14 m^3/hr	Se perforó formación con lodo liviano (35 s/l), se siguió diluyendo el fluido circulante con agua.
1583.0 – 1592.5	Pérdida parcial de circulación de 9 m^3/hr	Se perforó formación con lodo liviano (33-34 s/l), se siguió diluyendo el fluido circulante con agua.
1397 – 1535	Pérdida parcial de circulación de 4.4 a 6.6 m^3/hr	Se repasó el agujero con sarta rotativa. Se adicionó DIESEL al fluido circulante (33 s/l)
1495 – 1589.0	Pérdida parcial de circulación de 4.4 a 6.6 m^3/hr	Se repasó el agujero con sarta rotativa. Se continuó adicionando DIESEL al fluido circulante (32 s/l)
1592.5 – 1613.5	Pérdida parcial de circulación de 5.4, 9.6, 20 y 34 m^3/hr	Perforando formación con lodo muy diluido (32 s/l) + baches base polímero para limpieza de recortes.
1613.5 – 1632.5	Pérdida parcial de circulación	Perforando formación con lodo muy diluido

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
	de 34 a 44m ³ /hr	(32 s/l) + baches base polímero para limpieza de recortes. Se suspendió el uso de DIESEL
1632.5 – 1641.5	Pérdida parcial de circulación de 44 a 65m ³ /hr	Perforando formación con lodo muy diluido (32 s/l) + baches base polímero para limpieza de recortes.
1641.5 – 1669.5	Pérdida parcial de circulación de 20 a 30m ³ /hr	Perforando formación con agua + baches base polímero para limpieza de recortes.
1669.5 – 1678.5	Pérdida parcial de circulación de 44 m ³ /hr	Tapón de cemento N° 4, 5, 6 y 7.
1639.0 – 1678.5	Pérdida parcial de circulación de 58 m ³ /hr	Repasando agujero en 12¼", con agua y bombeo de baches de lodo base polímero.
1678.5 – 1699.5	Pérdida parcial de circulación de 58 a 70 m ³ /hr	Perforando formación en 12¼" con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1699.5 – 1707.5	Pérdida parcial de circulación de 65 a 76m ³ /hr	Perforando formación en 12¼" con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1707.5 – 1730.5	Pérdida parcial de circulación de 76, 80, 84, 90, 73, 67 y 63m ³ /hr	Perforando formación en 12¼" con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1730.5 – 1744.5	Pérdida parcial de circulación de 63, 56 y 67m ³ /hr	Perforando formación en 12¼" con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1730.5 – 1780.0	Pérdida parcial de circulación de 61, 71, 63, 76, 78, y	Perforando formación en 12¼" con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
	$74m^3/hr$	bentonita.
1780.0 – 1781.5	Pérdida parcial de circulación de 63, 76, 78, y $74m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1781.5 – 1790.5	Pérdida parcial de circulación de 103, 100 y $80 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1790.5 – 1800.0	Pérdida parcial de circulación de 67, 83, 92 y $67 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita.
1800.0 – 1802.5	Pérdida total de circulación	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,139 lpm.
1802.5 – 1810.0	Pérdida parcial de circulación de 46 a $52 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,139 lpm
1810.0 – 1828.0	Pérdida parcial de circulación de 52, 60 y $64 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,139 lpm
1828.0 – 1842.0	Pérdida parcial de circulación de 68, 82, 87, 92 y $98 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,139 lpm
1842.0 – 1857.0	Pérdida parcial de circulación de 96 a $105 m^3/hr$	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
		bentonita. Caudal= 2,139 lpm
1857.0 – 1869.5	Pérdida parcial de circulación de 88, 80, 76 y 78 m^3/hr	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,371 lpm
1869.5 – 1888.5	Pérdida parcial de circulación 112 m^3/hr	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,371 lpm
1888.5 – 1937.0	Pérdida parcial de circulación de 112, 105, 115, 108, 123, 132 y 129 m^3/hr	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,500 lpm
1937.0 – 1956.0	Pérdida parcial de circulación de 123 a 136 m^3/hr	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,500 lpm
1956.0 – 2000.0	Pérdida parcial de circulación de 123, 130 y 126 m^3/hr	Perforando formación en 12¼” con agua + bombeo de baches de lodo base polímero-bentonita. Caudal= 2,500 lpm

Fuente:(LaGeo, 2011)

Elaboración propia

5.5.4 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN EL POZO D

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
Etapa: Agujero 32" (agujero guía 17 ½´´) de 0.0 a 55 m		
9.00-13.00	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 1 (seis bolsas de bentonita y dos sacos de cemento). Perforando formación con agua. Baches viscosos de hasta m^3 para limpieza de agujero. Tapón de cemento N° 1, 2 y 3. Tapón de cemento N°4 (cemento+ cloruro de calcio ¹ +cascarilla de café). Tapón de cemento N°5 (cemento+ cloruro de calcio ¹). Tapón de cemento N°6 (8 m^3 cemento+ con 2% de bentonita pre hidratada). Bache de 10 m^3 de lodo viscoso + cascarilla de café. Tapón de cemento N°7 (8 m^3 cemento+ con 2% de bentonita pre hidratada + cloruro de calcio ¹). Tapón de manual N° 8 (grava fina, arena, chispa y cemento fluido).
21.50-30.50	Pérdida total de circulación	
42.00-52.50	Pérdida total de circulación	
Etapa: Agujero de 32"(ampliación de agujero guía a 26´´)de 0.0 a 55 m		
8.5	Pérdida parcial de circulación de 12 a 40 m^3/hr	Lodo viscoso + material obturante
10 a 16.40	Pérdida parcial de circulación de 10 a 20	Lodo viscoso + material obturante

¹Cloruro de Calcio actúa como acelerador de fraguado

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
	m^3/hr	
19.00	Pérdida parcial de circulación de $21m^3/hr$	No disponible
28.00	Pérdida parcial de circulación de 20 a $25m^3/hr$	No disponible
29.00-55.00	Pérdida total de circulación, inició como intermitente.	$32 m^3$
Etapas: Agujero de 32''(ampliación de agujero guía a 32'') de 0.0 a 55 m		
42.25	Pérdida total de circulación	<p>Lodo viscoso + Cascarilla de café</p> <p>Perforación de la formación en pérdida total de circulación</p> <p>Bache de lodo viscoso $5 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 9 (arena+ grava fina + cemento)</p> <p>Tapón manual de cemento N° 10 (mezcla de arena + cemento)</p>
Etapas: Agujero de 23''		
60.00	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 11 de $8 m^3$
74.00 a 85.00	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 12

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
196.00 a 199.00	Pérdida parcial de circulación de 2 a $4m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
274.00	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
274.00 a 292.00	Pérdida parcial de circulación de 4 a $6m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
292.00	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
292-299.36	Pérdida parcial de circulación de 4 a $6m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
Etapas: Agujero de 17 ½" (Primer agujero)		
437.70	Pérdida total de circulación intermitente	Se recuperó en 30 minutos
501.0-504.5	Pérdida parcial de circulación de 11 a $19m^3/hr$	Perforando con lodo
Etapas: Agujero de 17 ½" Side Track (Segundo agujero)		
444.0-448.0	Pérdida parcial de circulación de $8m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
471.0-476.0	Pérdida parcial de circulación de 10 a $20m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
496.0-499.0	Pérdida parcial de circulación de $15m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
532.50	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
548.0	Pérdida parcial de circulación de $8m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
548.0-596.0	Pérdida parcial de circulación de 4 a $8m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
596.0-617.00	Pérdida parcial de circulación de 4 a $5m^3/hr$	Perforando con lodo + obturante
617.0	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
620.50	Pérdida total de circulación	Lodo viscoso + Cascarilla de café
617.0-625.0	Pérdida parcial de circulación de 15.0 a $20.0m^3/hr$	<p>Tapón de cemento N° 13 de $6 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 14</p> <p>Realización de perfil dinámico de temperatura</p> <p>Tapón de cemento flotante N° 15 de $6 m^3$</p> <p>Tapón de cemento flotante N° 16 de $4 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 17 de $10 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 18 de $14 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 19 de $5 m^3$</p> <p>Tapón de cemento N° 20 de $9 m^3$</p>
Etapa: Agujero de 12 ¼ "		
658.0	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
658.00-663.0	Pérdida total de circulación	Tapón de cemento N° 21 de $5 m^3$
691.0	Pérdida total de circulación	Perforando con lodo + obturante
691.0-710.0	Pérdida total de circulación	Bombeo de lodo de baja densidad

Localización de la pérdida (m de profundidad)	Tipo de pérdida	Tratamiento brindado
		Tapón de cemento N° 22
710.0-724.0	Pérdida parcial de circulación de 8 a $9m^3/hr$	No hubo necesidad de tratamiento
812.0	Pérdida parcial de circulación de $3m^3/hr$	Perforando con agua
846.50	Pérdida total de circulación	Perforando con agua
846.5-1540	Pérdida total de circulación	Perforando con agua

Fuente: (LaGeo, 2008)

Elaboración propia

6 REOLOGIA E HIDRÁULICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

La selección de un buen fluido de perforación es un parámetro de vital importancia para lograr la perforación exitosa de un pozo, al escoger un determinado tipo de lodo se debe tener en cuenta la clase de litología (composición, estructura, tamaño de grano, características físicas y químicas de las rocas) que se va perforar y los problemas que se consideran como críticos durante la perforación, de manera que se suministre al lodo ciertas propiedades que permitan la culminación exitosa de la operación (Esterlin & Gomez, 2011).

La reología es la ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia, o precisamente de los fluidos. Al tomar ciertas medidas en un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, presión y velocidad de corte.

Las propiedades físicas, químicas y reológicas de un fluido de perforación son monitoreadas para facilitar la optimización del proceso de perforación. Cada pozo es único, por lo tanto es importante que estas propiedades sean controladas respecto a los requisitos para un pozo en particular y del fluido que se está usando. Las propiedades reológicas de un fluido pueden afectar negativamente un aspecto, al mismo tiempo que producen un impacto positivo importante sobre otro. Por lo tanto se debe lograr un equilibrio para maximizar la limpieza del pozo, minimizar las presiones de bombeo y evitar los inlfujos de fluidos o de la formación, además de impedir la pérdida de circulación hacia la formación que se está perforando (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001).

6.1 PROPIEDADES REOLOGICAS

En un campo geotérmico el lodo de perforación es un líquido que circula a través de la sarta de perforación hasta la barrena y regresa a la superficie por el espacio anular. Estos lodos o fluidos de perforación poseen propiedades reológicas, las cuales se detallan a continuación:

1. Viscosidad embudo (seg/qt o seg/l).
2. Viscosidad aparente (cP o mPa * seg).
3. Viscosidad efectiva (cP o mPa * seg)
4. Viscosidad plástica (cP o mPa * seg)
5. Punto cedente (lb/100 pies² o Pa).
6. Esfuerzos de gel(lb/100 pies² o Pa).

6.1.1 VISCOSIDAD.

Viscosidad (μ) es el término reológico más conocido. En su sentido más amplio, la viscosidad se puede describir como la resistencia al flujo de una sustancia. Es definida como la razón de esfuerzo de corte (τ) y tasa o velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). Las unidades tradicionales de viscosidad son dinas-s/cm², la cual es llamada poise (P), pero es más usado el centipoise (cP).

$$\text{Viscosidad } (\mu) = \frac{\text{esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{velocidad de corte } (\dot{\gamma})}$$

Ec. 6.1

Donde la velocidad de corte es la velocidad de rotación en un viscosímetro estándar de campo en el cual es medido el esfuerzo cortante, y el esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de superficie requerida para mover un fluido a una velocidad de corte dada.

La viscosidad no es un valor constante para la mayoría de los fluidos de perforación. Esta varía con la velocidad de corte. Para comprobar los efectos dependientes del esfuerzo de corte se realizan mediciones a diferentes velocidades de corte. A partir de los datos obtenidos se pueden calcular los parámetros o propiedades reológicas, así como, graficar valores de viscosidad versus velocidad de corte.

- ✓ **Viscosidad Embudo:** ésta se mide usando el viscosímetro de Marsh, el cual consiste en un embudo de forma cónica, provisto de un tubo de diámetro pequeño en el extremo inferior a través del cual el lodo fluye bajo la presión de la gravedad, donde una malla en la parte superior remueve las partículas grandes que podrían obstruir el tubo. En el ensayo normalizado por el API para evaluar lodos base agua y base aceite, la medida de la viscosidad de embudo es el tiempo (en segundos) requerido para que un cuarto de galón (946 ml) fluya fuera del embudo de Marsh hacia un vaso graduado. (Schlumberger, 2015)

La viscosidad de embudo se usa como indicador relativo de la condición del fluido. No proporciona suficiente información para determinar las características de flujo de un fluido. Debería usarse en el campo para detectar los cambios relativos en las propiedades del fluido. Además, ningún valor en particular de la viscosidad de embudo puede ser adoptado como valor representativo de todos los fluidos. Lo que produce buenos resultados en un área puede fallar en otra; sin embargo, se puede aplicar una regla general a los fluidos de perforación a base de arcilla. La viscosidad de embudo de la mayoría de los fluidos se controla a cuatro veces la densidad (lb/gal) o menos. Sin embargo hay ciertas excepciones, como en las áreas donde se requiere el uso de fluidos de alta viscosidad.

- ✓ **Viscosidad Efectiva (μ_e):** La viscosidad de un fluido no newtoniano cambia con el esfuerzo de corte. La viscosidad efectiva de un fluido es la viscosidad de un fluido bajo condiciones específicas de velocidad de corte, la presión y la temperatura. El término de viscosidad efectiva es usado para describir la viscosidad medida o

calculada correspondiente a la tasa de corte existente en las condiciones de flujo en el pozo o en la sarta de perforación. Ésta se define como la relación (pendiente) de esfuerzo de corte a una velocidad de corte determinada, y se ilustra como la pendiente de una línea trazada desde la curva de esfuerzo de corte (a la velocidad de corte considerada) hasta el punto de origen. A continuación se ilustra el comportamiento del esfuerzo de corte (τ) contra la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) en la Figura 6.1

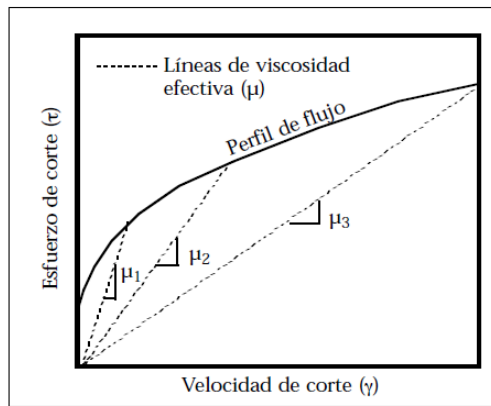


Figura 6.1. Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad efectiva de un fluido no newtoniano.

Fuente: API, 2001.

- ✓ **Viscosidad Aparente (μ_A):** La viscosidad aparente está indicada por la lectura del viscosímetro de Fann o viscosímetro de lodo a 300 RPM ($\Theta 300$) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ($\Theta 600$). Cabe indicar que ambos valores de viscosidad aparente concuerdan con la fórmula de viscosidad:

$$\text{Viscosidad Aparente } (\mu_A) = \frac{300 * \Theta}{\omega} \quad \text{Ec. 6.2}$$

Dónde: ω es la velocidad rotacional (RPM)

Θ es lectura del viscosímetro de Fann en cP

- ✓ **Viscosidad Plástica:** La viscosidad plástica se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo, que es causada por la fricción mecánica y se calcula a partir de los datos del viscosímetro de lodo. Ésta se representa de la siguiente manera:

$$\text{Viscosidad Plástica } (\mu_p) = \theta_{600} - \theta_{300} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Dónde: θ_{600} y θ_{300} representan las lecturas del viscosímetro a su respectiva velocidad.

La viscosidad plástica se ve afectada principalmente por la concentración, el tamaño y la forma de los sólidos, así como, por la viscosidad de la fase fluida. El control de esta propiedad es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP).

Un aumento de la viscosidad plástica puede significar un aumento en el porcentaje en volumen de sólidos, una reducción del tamaño de las partículas de los sólidos, un cambio de la forma de las partículas o una combinación de estos efectos. Cualquier aumento del área superficial total de los sólidos expuestos se reflejará en un aumento de la viscosidad plástica. La mayoría de las veces, el aumento de la viscosidad plástica resulta del aumento en el porcentaje de sólidos. Esto puede ser confirmado mediante los cambios de densidad y/o el análisis en retorta. (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001). Como regla general la viscosidad del fluido no debería ser más alta que la que se requiere para la limpieza del pozo y la suspensión de barita. Cuando un fluido no está cumpliendo estas funciones, lo más conveniente sería aumentar el punto cedente y los valores de bajo esfuerzo de corte (6 y 3 RPM) y no la viscosidad plástica.

Los sólidos perforados afectan negativamente las propiedades reológicas y no son convenientes ya que de no ser controlados se generaran problemas de viscosidad en el sistema de perforación. Estos solidos son continuamente añadidos al fluido durante la perforación, causando un aumento de la concentración de sólidos. Si no son eliminados rápidamente, los sólidos siguen dividiéndose en partículas más pequeñas al ser circulados y recirculados a través del sistema. Los sólidos perforados pueden ser controlados de tres maneras:

1. Control mecánico de los sólidos.
2. Asentamiento.
3. Dilución o desplazamiento.

Mientras que un descenso de la viscosidad plástica indica que el lodo es capaz de perforar rápidamente debido a la baja viscosidad del lodo que sale en la barrena (Schlumberger, 2015). Una baja viscosidad plástica puede aumentar la energía proporcionada a la barrena, mejorar el flujo en el espacio anular para la limpieza del pozo y reducir el uso y desgaste de los equipos, así como el consumo de combustible. (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001).

6.1.2 PUNTO CEDENTE O YIELD POINT

El punto cedente (PC o τ_y) en libras por 100 pies cuadrados, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción de un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las especies de las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de las propiedades superficiales de los sólidos del fluido, la concentración volumétrica de los sólidos, y el ambiente eléctrico (iónico) del líquido que rodea estos sólidos (Esterlin & Gomez, 2011). Este se calcula a partir de los datos del viscosímetro de Fann, de la manera siguiente:

$$\text{Punto Cedente (PC o } \tau_y) = 2 \times \theta_{300} - \theta_{600} \quad \text{Ec. 6.4}$$

O

$$\text{Punto Cedente (PC o } \tau_y) = 300\theta - \mu_p \quad \text{Ec. 6.5}$$

El punto cedente es usado frecuentemente como indicador de las características de dilución por esfuerzo de corte de un fluido y de su capacidad de suspender el material densificante y retirar los recortes del pozo, pero puede inducir a error. Un alto punto cedente da como resultado una alta viscosidad y a su vez causar la floculación del lodo, lo cual puede ser causado por:

1. Introducción de contaminantes solubles como sales, calcio, carbonatos, cemento, anhídrita o yeso, resultado en arcillas de floculación y sólidos reactivos.
2. Introducción de sólidos inertes dentro del sistema, haciendo que las partículas se acerquen más entre sí, ya que el espacio entre las partículas disminuye lo cual conduce a un aumento de la atracción entre partículas.
3. Subtratamiento o sobretratamiento con productos químicos cargados electroquímicamente aumenta las fuerzas de atracción.

El punto cedente es la parte de la resistencia al flujo que se puede controlar con un tratamiento químico apropiado. El punto cedente disminuye a medida que las fuerzas de atracción son reducidas mediante el tratamiento químico. La reducción del punto cedente también reducirá la viscosidad aparente. En general, en los lodos base agua a base de arcilla, los materiales aniónicos (cargados negativamente) se desfloculan, reduciendo la viscosidad. Los materiales catiónicos (cargados positivamente) fomentan la floculación y aumentan la viscosidad. Se puede lograr un aumento del punto cedente mediante adiciones de un viscosificador comercial de buena calidad. Además, cualquier cosa que produzca la

floculación en un fluido aumentará el punto cedente. (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001)

6.1.3 ESFUERZOS DE GEL.

La tixotropía es la propiedad demostrada por algunos fluidos que forman una estructura de gel cuando están estáticos, regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte. La mayoría de los fluidos de perforación base agua demuestran esta propiedad, debido a la presencia de partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales que se enlazan entre sí para formar una matriz rígida. Las indicaciones de esfuerzo de gel tomadas con el viscosímetro Fann (VG) a intervalos de 10 segundos y 10 minutos, y a intervalos de 30 minutos para las situaciones críticas, proporcionan una medida del grado de tixotropía presente en el fluido (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001).

La resistencia de gel depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico, en otras palabras, cualquier cosa que impida o fomenta el enlace de partículas, aumentará o reducirá la tendencia a gelificación de un fluido. Los esfuerzos de gel excesivos pueden causar complicaciones, tales como:

1. Entrampamiento del aire o gas en el fluido.
2. Presiones excesivas cuando se interrumpe la circulación después de un viaje.
3. Reducción de la eficacia del equipo de remoción de sólidos.
4. Pistoneo excesivo al sacar la tubería del pozo.
5. Aumento brusco excesivo de la presión durante la introducción de la tubería en el pozo.
6. Incapacidad para bajar las herramientas de registro hasta el fondo.

El esfuerzo de gel y el punto cedente son medidas de las fuerzas de atracción en un sistema de fluido. El esfuerzo de gel inicial mide las fuerzas de atracción estáticas, mientras que el punto cedente mide las fuerzas de atracción dinámicas. Por lo tanto, el tratamiento que se usa para el esfuerzo de gel inicial excesivo es el mismo que para el punto cedente excesivo.

Una variación amplia entre la indicación inicial de gel y las indicaciones de gel a 10 o 30 minutos constituye la formación de **geles progresivos** e indica la acumulación de sólidos. Si las indicaciones de gel inicial y a 10 minutos son altas y muestran muy pocas diferencias entre ellas, esto representa la formación de **geles instantáneos** y puede indicar que la floculación ha ocurrido. A continuación en la Figura 6.2 se presenta la tendencia de los diferentes tipos de geles respecto al tiempo.

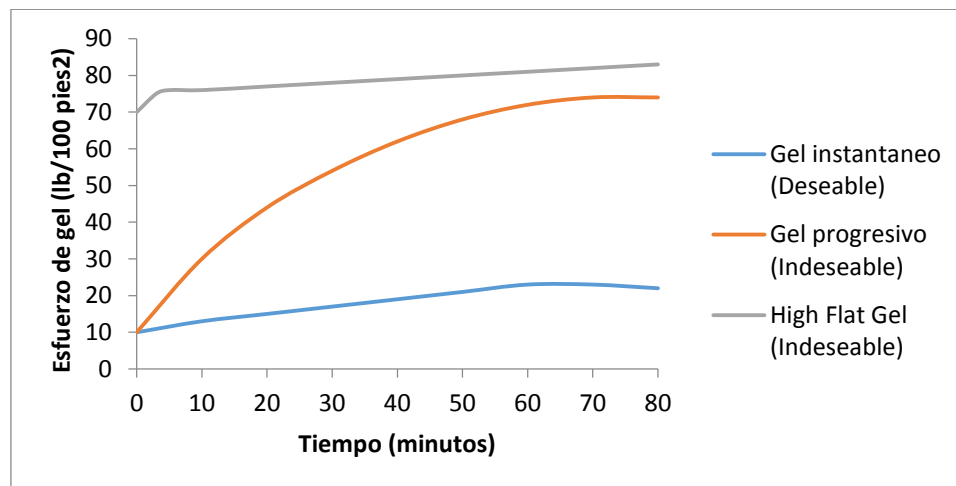


Figura 6.2. Tipos de Geles.

Fuente: Elaboración propia

6.2 TIPOS DE FLUIDOS

Basado en su comportamiento de flujo, los fluidos se pueden clasificar en dos tipos diferentes:

- Fluidos newtonianos
- Fluidos no newtonianos.

6.2.1 FLUIDOS NEWTONIANOS.

La clase más simple de fluidos es la clase de fluidos *newtonianos*. Los fluidos de base (agua dulce, agua salada, aceite diésel, aceites minerales y sintéticos) de la mayoría de los fluidos de perforación son newtonianos. En estos fluidos, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Los puntos forman una línea recta que pasa por el punto de origen (0, 0) del gráfico según coordenadas cartesianas. La viscosidad de un fluido newtoniano es la pendiente de esta línea de esfuerzo de corte/velocidad de corte. A continuación se presenta la tendencia a seguir de un fluido newtoniano:

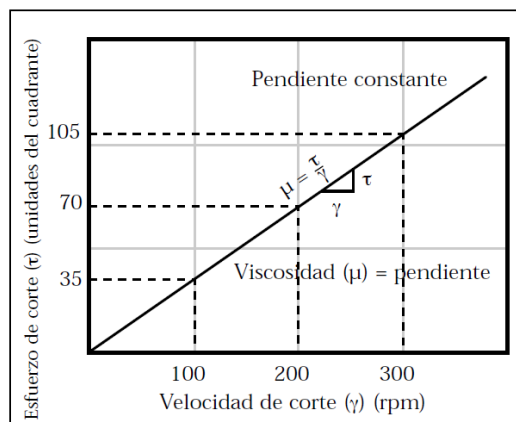


Figura 6.3. Fluido Newtoniano

Fuente: API, 2001.

Cuando los fluidos newtonianos (agua dulce, agua salada, salmueras y aceites) son usados para perforar, el pozo debería ser sometido a circulaciones o barridos de limpieza periódicamente y antes de realizar los viajes. (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001)

6.2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos son aquellos que presentan una amplia de relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte. Esto significa que un fluido no newtoniano no tiene ninguna viscosidad única o constante que pueda describir su comportamiento de flujo a todas las velocidades de corte. Para describir la viscosidad de un fluido no newtoniano a una velocidad de corte en particular, se usa una “viscosidad efectiva”. Los fluidos no newtonianos se subdividen en dos grupos:

- a) Aquellos cuyas propiedades son independientes del tiempo:
 - Fluidos Plásticos (Bingham).
 - Fluidos Pseudoplásticos.
 - Fluidos Dilatantes

- b) Aquellos cuyas propiedades son dependientes del tiempo:
 - Fluidos Tixotrópicos

Los fluidos no newtonianos demuestran una relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte, de la manera ilustrada en la Figura 6.4.

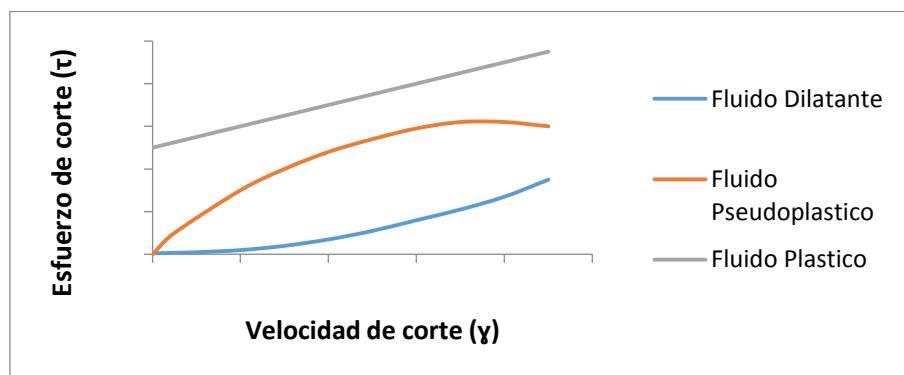


Figura 6.4. Fluidos No Newtonianos

Fuente: Elaboración Propia

La mayoría de los fluidos no newtonianos demuestran un comportamiento de “disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte”, de manera que la viscosidad efectiva disminuye cuando la velocidad de corte aumenta.

Cuando se traza la viscosidad efectiva junto a la curva de esfuerzo de corte-velocidad de corte, es fácil observar la naturaleza de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte que exhiben la mayoría de los fluidos de perforación. En la Figura 6.5 se observa este fenómeno:

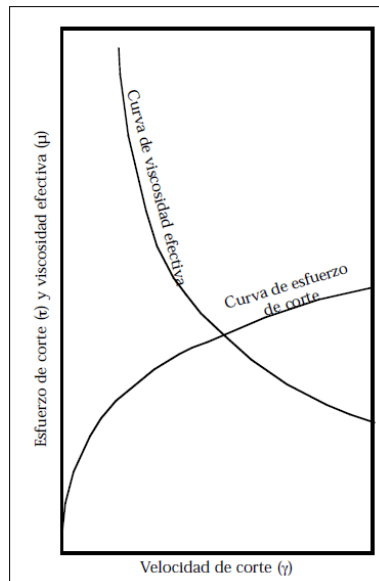


Figura 6.5. Efecto de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte en los fluidos no newtonianos.

Fuente: API, 2001.

La disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte tiene implicaciones muy importantes para los fluidos de perforación, porque nos proporciona lo que más deseamos:

1. A altas velocidades (altas velocidades de corte) en la columna de perforación y a través de la barrena, el lodo disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta

alcanzar valores bajos de viscosidad. Esto reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión.

2. A las velocidades más bajas (velocidades de corte más bajas) dentro del espacio anular, el lodo tiene una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo.
3. A una velocidad ultra baja, la viscosidad del lodo alcanza su más alto nivel, y cuando el lodo no está circulando, éste desarrolla esfuerzos de gel que contribuyen a la suspensión de los materiales densificantes y de los recortes. (API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001).

6.3 MODELOS REOLOGICOS

Un modelo reológico es una descripción matemática de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, y proporcionan asistencia en la caracterización de flujo de fluidos.

La ley de viscosidad de Newton es el modelo reológico que describe el comportamiento de flujo de los *fluidos newtonianos*. Sin embargo, como la mayoría de los fluidos de perforación son *fluidos no newtonianos*, este modelo no describe su comportamiento de flujo. En realidad, como no existe ningún modelo reológico específico que pueda describir con precisión las características de flujo de todos los fluidos de perforación, numerosos modelos han sido desarrollados para describir el comportamiento de flujo de los fluidos no newtonianos. El uso de estos modelos requiere medidas del esfuerzo de corte a dos o más velocidades de corte. A partir de estas medidas, se puede calcular el esfuerzo de corte a cualquier otra velocidad de corte. A continuación se proporciona una descripción de los diferentes modelos reológicos:

6.3.1 MODELO DE NEWTON

Este modelo representa los fluidos ideales. Es decir, caracteriza a aquellos fluidos cuya relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) es lineal, como lo muestra la Ec. 6.6. La constante de proporcionalidad, conocida como coeficiente de viscosidad o viscosidad (μ), es suficiente para describir su comportamiento.

$$\tau = \mu * \dot{\gamma} \qquad \text{Ec. 6.6}$$

6.3.2 MODELO DE FLUJO PLÁSTICO DE BINGHAM

El modelo de Flujo Plástico de Bingham ha sido usado más frecuentemente para describir las características de flujo de los fluidos de perforación no newtonianos. Éste es uno de los más antiguos modelos reológicos que son usados actualmente. Este modelo describe un fluido en el cual se requiere un esfuerzo finito para iniciar el flujo (movimiento), a este esfuerzo inicial se le denomina punto cedente, el cual luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta, creando una pendiente conocida como coeficiente de rigidez o viscosidad plástica. La ecuación para el modelo de Flujo Plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = PC + \dot{\gamma}(\mu_p) \qquad \text{Ec. 6.7}$$

Dónde:

τ = Esfuerzo de corte

PC = Punto cedente o esfuerzo de corte/cedente a una velocidad de corte de cero (intersección con el eje Y)

μ_p = Viscosidad plástica o tasa de aumento del esfuerzo de corte con el aumento de la velocidad de corte (pendiente de la línea)

γ = velocidad de corte

La Figura 6.6 ilustra un perfil de flujo verdadero de un fluido de perforación con el modelo ideal de Flujo Plástico de Bingham. Esta figura muestra no solamente la comparación entre el *punto cedente verdadero* y el punto cedente de Bingham, sino también la desviación de la viscosidad a bajas y altas velocidades de corte en comparación con la viscosidad Plástica de Bingham. El punto cedente de Bingham es más alto que el esfuerzo de cedencia verdadero.

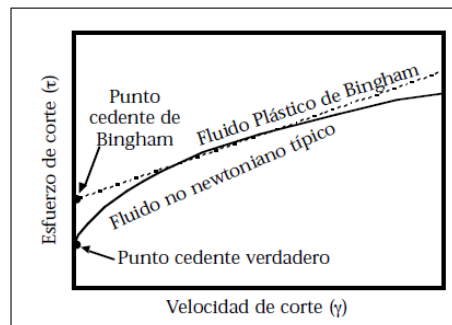


Figura 6.6. Modelo de Bingham y fluido no newtoniano típico.

Fuente: API, 2001.

Por lo general, la mejor manera de estimar el punto cedente verdadero es a partir del valor de esfuerzo de gel inicial. El modelo de Flujo Plástico de Bingham representa con precisión la relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte de los lodos base agua, de arcilla floculada, de baja densidad y de la mayoría de los demás fluidos a altas velocidades de corte (mayores que 511 s^{-1} o 300 RPM). Generalmente, los valores de esfuerzo de corte/velocidad de corte de la mayoría de los fluidos no floculados se desvían de los valores pronosticados por el modelo de Flujo Plástico de Bingham, a medida que se reduce la

velocidad de corte. La mayor divergencia está a velocidades de corte más bajas. Si un lodo es un verdadero fluido Plástico de Bingham, entonces el esfuerzo de gel inicial y el punto cedente serán iguales, como en el caso de numerosos fluidos base agua de arcilla floculada.

6.3.3 MODELO DE LEY EXPONENCIAL.

Este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada, este modelo no supone que existe una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. Matemáticamente, el modelo de Ley Exponencial se expresa como:

$$\tau = k\gamma^n \qquad \text{Ec. 6.8}$$

Dónde:

τ = Esfuerzo de corte

k = Índice de consistencia.

γ = Velocidad de corte.

n = Índice de flujo o de ley Exponencial.

El índice de flujo (n) indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido sobre un rango determinado de velocidades, este comportamiento se presenta en la Figura 6.7. Según el valor de “ n ” existen tres tipos de perfiles de flujo y comportamiento de flujo son:

- a. $n < 1$: El fluido es un fluido no newtoniano que disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte.
- b. $n = 1$: El fluido es un fluido newtoniano.
- c. $n > 1$: El fluido es un fluido dilatante que aumenta su viscosidad con el esfuerzo de corte.

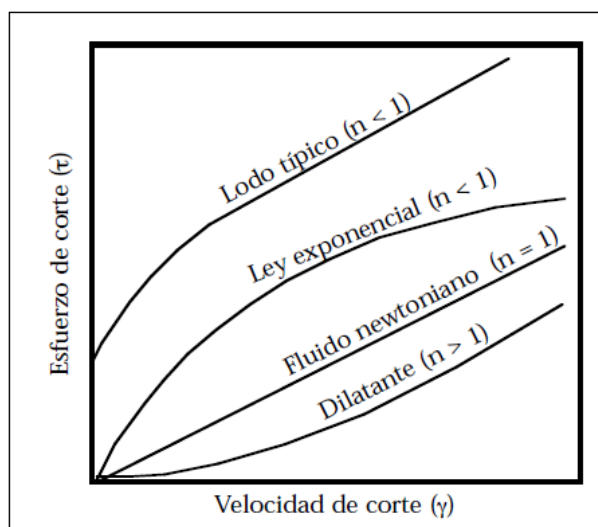


Figura 6.7. Efecto del índice de flujo en un fluido de perforación.

Fuente: API, 2001.

El índice de flujo (n) tiene un efecto sobre el perfil de flujo y el perfil de velocidad, como se muestra en la Figura 6.7. De esta manera se puede decir que a menor índice “ n ”, la velocidad del fluido aumenta sobre un área más grande del espacio anular, lo que incrementa la limpieza del lodo. Donde en la Figura 6.8 se presenta el efecto del índice de flujo respecto al perfil de velocidad.

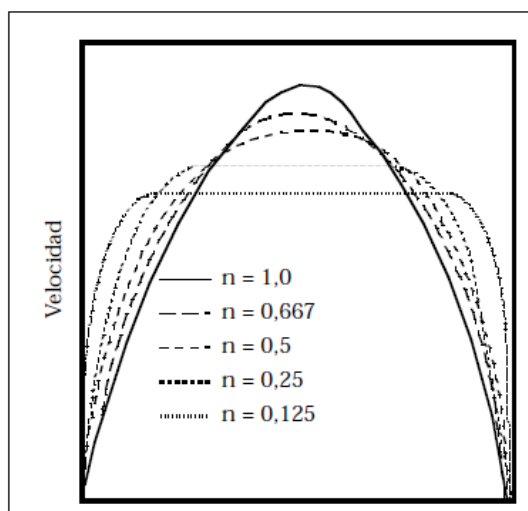


Figura 6.8. Efecto del índice “ n ” de la Ley Exponencial sobre el perfil de velocidad.

Fuente: API, 2001.

Así también el valor del índice de consistencia (K) se considera similar a la viscosidad plástica, pues un aumento de K indica generalmente un aumento en la concentración de sólidos o una disminución en el tamaño de partículas, por lo tanto un aumento de la viscosidad. Los mejores métodos para hacer disminuir el valor de K son el control mecánico de sólidos y dilución. Las ecuaciones generales para los valores de “n” y “K” son las siguientes:

$$n = \frac{\log\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad \text{Ec. 6.9}$$

$$k = \frac{\theta_1}{\omega_1^n} \quad \text{Ec. 6.10}$$

Dónde:

n = Índice de Ley Exponencial o exponente

k = Índice de consistencia o índice de fluido de la Ley Exponencial

θ_1 = Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja

θ_2 = Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta

ω_1 = RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja

ω_2 = RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta

6.3.4 MODELO DE LEY EXPONENCIAL MODIFICADA O MODELO DE HERSHEY-BULKLEY

El modelo de Ley Exponencial modificada o modelo de Herschel-Bulkley, puede ser utilizado para tomar en cuenta el esfuerzo requerido para iniciar el movimiento del fluido (esfuerzo de cedencia).

El modelo de Ley Exponencial modificada se parece más al perfil de flujo de un lodo de perforación típico. Se ha usado un viscosímetro FANN (VG) para obtener las indicaciones del cuadrante a velocidades de 600, 300 y 3 RPM. Primero, los tres modelos son presentados sobre papel de coordenadas cartesianas (Figura 6.9), y luego sobre papel cuadrado con doble escala logarítmica (Figura 6.10).

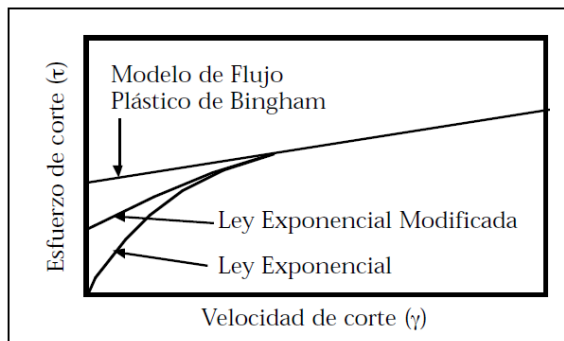


Figura 6.9. Comparación de modelos reológicos.

Fuente: API, 2001.

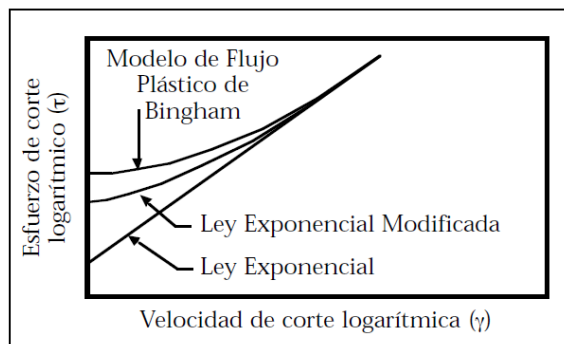


Figura 6.10. Gráfico logarítmico de comparación de los modelos reológicos.

Fuente: API, 2001.

En cada caso, el modelo de Ley Exponencial modificada está ubicado entre el modelo de Flujo Plástico de Bingham, siendo éste el más alto, y el modelo de Ley Exponencial, el más bajo. El modelo de Ley Exponencial modificada es ligeramente más complicado que el modelo de Flujo Plástico de Bingham o el modelo de Ley Exponencial. Sin embargo, este

modelo puede aproximarse más al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los fluidos de perforación.

Matemáticamente, el modelo de Herschel-Bulkley es el siguiente:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^N \quad \text{Ec. 6.11}$$

Dónde:

τ = Esfuerzo de corte

τ_y = Esfuerzo de cedencia o punto cedente real para iniciar el flujo.

K = Índice de consistencia Ley Exponencial modificada.

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte.

N = Índice de Ley Exponencial modificada

$$N = \frac{\log\left(\frac{\theta_2 - \theta_o}{\theta_1 - \theta_o}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad \text{Ec. 6.12}$$

$$K = \frac{\theta_1 - \theta_o}{\omega_1^N} \quad \text{Ec. 6.13}$$

Dónde:

N = Índice de Flujo Ley Exponencial o exponente

K = Índice de consistencia o índice de fluido de la Ley Exponencial modificada/
modelo Herschel-Bulkley

θ_1 = Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja

θ_2 = Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta

ω_1 = RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja

ω_2 = RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta

En la tabla 6.1 se presenta en la un resumen de los términos y propiedades reológicas

Tabla 6.1 Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación.

Termino reológico	Símbolo	Ecuación	Unidad (es)	Definición
Velocidad de corte	γ		seg ⁻¹ /rpm	Cambio de velocidad del fluido dividido por el ancho del canal a través del cual el flujo se desplaza en flujo laminar. Es también la velocidad de rotación en un viscosímetro estándar de campo en el cual es medido el esfuerzo cortante.
Esfuerzo de corte	τ		lb/100 pies ² Pa	La fuerza por unidad de área requerida para mover un fluido a una velocidad de corte dada. El esfuerzo de corte se mide en viscosímetros de campo por la deflexión del dial de medidor a una velocidad de corte. La lectura específica del dial es generalmente denotada por Θ . Ejemplo: $\Theta 300$ describe la deflexión del dial a 300 rpm en el viscosímetro rotacional
Viscosidad efectiva	μ_e		cP Pa-seg	La viscosidad utilizada para describir el fluido que fluye a través de una geometría particular; al cambiar las geometrías del pozo y sus condiciones de velocidad de corte, presión y temperatura también lo hace μ_e .

Fuente: Modificado de API 2001.

Tabla 6.2 Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.

Termino reológico	Símbolo	Ecuación	Unidad (es)	Definición
Esfuerzos de gel	Θ		lb/100 pies ² Pa	Mediciones del esfuerzo cortante de un fluido dependientes del tiempo bajo condiciones estáticas. Las resistencias de gel son medidas comúnmente después de 10 segundos y 10 minutos, pero pueden ser medidos para cualquier longitud de tiempo deseado.
Viscosidad	μ	$(\mu) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$	cP Pa-seg	Esfuerzo cortante de un fluido dividido por la velocidad de corte correspondiente, o $\mu = \tau / \dot{\gamma}$. La viscosidad del fluido se puede medir en un punto determinado o sobre una amplia escala de mediciones de esfuerzo cortante/ velocidad de corte.
Viscosidad plástica	μ_p	$\mu_p = \Theta_{600} - \Theta_{300}$	cP Pa-seg	La contribución a la viscosidad del fluido de un fluido bajo condiciones dinámicas de flujo. Generalmente, la viscosidad plástica está relacionada con el tamaño, la forma y número de partículas en un fluido en movimiento. Ésta se calcula usando esfuerzos cortantes medidos a Θ_{600} y Θ_{300} en el viscosímetro FANN.

Fuente: Modificado de API 2001.

Tabla 6.3 Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.

Termino reológico	Símbolo	Ecuación	Unidad (es)	Definición
Punto cedente	PC o τ_y	$\tau_y = 2 \times \theta_{300} - \theta_{600}$	lb/100 pies ² Pa	Es la fuerza requerida para iniciar el flujo; considerándose una medida de las fuerzas de atracción de un fluido, las cuales se pueden controlar con un tratamiento químico apropiado. Esta propiedad reológica es calculada a partir de los datos obtenidos a θ_{600} y θ_{300} en el viscosímetro FANN. Dónde: PC: Para fluidos que cumplan el modelo de Bingham τ_y : Para fluidos que cumplan el modelo Herschel – Bulkley
Índice de Flujo	n	$n = \frac{\log\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}$ (Ley exponencial)		La relación numérica entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido en un gráfico “log/log”. Este valor de índice de flujo indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido sobre un rango determinado de velocidades.

Fuente: Modificado de API 2001.

Tabla 6.4 Resumen de términos y propiedades reológicas de fluidos de perforación. Continuación.

Termino reológico	Símbolo	Ecuación	Unidad (es)	Definición
Índice de Flujo	N	$N = \frac{\log\left(\frac{\theta_2 - \theta_o}{\theta_1 - \theta_o}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}$ <p>(Ley exponencial modificada)</p>		La relación numérica entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido en un gráfico “log/log”. Este valor de índice de flujo indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido sobre un rango determinado de velocidades.
Índice de consistencia	K y k	$k = \frac{\theta_1}{\omega_1^n}$ <p>(Ley exponencial)</p> <hr/> $K = \frac{\theta_1 - \theta_o}{\omega_1^n}$ <p>(Ley exponencial modificada)</p>	$\frac{dina * s^{-n}}{cm^2}$	Los valores de índice de consistencia indican generalmente un aumento en la concentración de solidos o una disminución en el tamaño de partículas.

Fuente: Modificado de API 2001.

6.4 HIDRÁULICA DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

Hidráulica refiere al estudio del comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades específicas, teniendo como objetivo la remoción de partículas dentro del pozo. Una vez que las propiedades reológicas para un fluido de perforación han sido determinadas y modeladas para predecir el comportamiento del flujo, los cálculos de hidráulica son realizados para determinar el efecto que el fluido tendrá sobre las presiones del sistema.

El fluido de perforación es utilizado para transferir presión desde la superficie a la barrena, y la caída de presión a través de la misma, se usa para mejorar la tasa de penetración. Para que el fluido de perforación pueda arrastrar los recortes hacia la superficie, la bomba de lodo deberá de ser capaz de vencer las pérdidas de presión acumuladas con el equipo superficial, la sarta/columna de perforación, el espacio anular y la barrena.

6.4.1 OPTIMIZACIÓN DE HIDRÁULICA.

El objetivo principal de la optimización de la hidráulica es lograr un equilibrio entre el control del pozo, la limpieza del pozo, la presión de bombeo, la densidad equivalente de circulación (ECD) y la caída de presión a través de la barrena. La densidad y las propiedades reológicas del fluido son los parámetros que afectan esta eficacia hidráulica. (API Recommended Practice 13D , 2009).

Un diseño hidráulico optimizado se refiere a la determinación de los tamaños de toberas y caudales para satisfacer un criterio de optimización. Los criterios utilizados son la maximización de la potencia hidráulica por pulgada cuadrada (HSI) o de la fuerza de impacto (IF).

Las restricciones en este proceso de optimización incluyen limitaciones de capacidad de los equipos de perforación, la presión máxima (P_{max}) disponible del tubo de alimentación, la potencia máxima de las bombas de los equipos de perforación, mínimo requerido y máximo

disponible de caudal y las limitaciones de las herramientas de fondo de pozo. (API Recommended Practice 13D , 2009)

6.4.1.1 ECUACIONES DE HIDRAULICA DE API

La primera etapa en los cálculos de hidráulica consiste en determinar la etapa de flujo que está ocurriendo en cada intervalo geométrico del pozo. La velocidad del fluido en cada uno de estos intervalos puede ser determinada con las ecuaciones proporcionadas a continuación.

6.4.1.2 VELOCIDAD MEDIA DE PROPAGACION EN EL MEDIO

API se refiere a la velocidad del fluido que fluye dentro de un espacio anular o una tubería, como la velocidad de propagación en el medio. Esto supone que la totalidad del fluido está fluyendo a la misma velocidad con un perfil plano y sin las diferencias instantáneas de velocidad que se producen en el flujo turbulento. Se trata básicamente de una velocidad media. La Ec. 6.14 y Ec. 6.15 presentan la velocidad media de propagación en la tubería (V_p) y espacio anular (V_a) respectivamente:

$$V_p = \frac{24.48 \times Q}{D_i^2} \quad \text{Ec. 6.14}$$

$$V_a = \frac{24.48 \times Q}{(D_h^2 - D_p^2)} \quad \text{Ec. 6.15}$$

Dónde:

V_p : Velocidad de propagación en la tubería de perforación.

V_a : Velocidad de propagación en el espacio anular.

Q: Caudal

D_i : Diámetro interno de la tubería de revestimiento.

D_h : Diámetro interno del pozo o tubería de revestimiento.

D_p : Diámetro exterior de la tubería de perforación.

6.4.1.3 NUMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds (N_{Re}) es un número adimensional usado para determinar si un fluido está en un flujo laminar o turbulento. Para un número de Reynolds inferior o igual a 2,100 indica un flujo laminar. Un número de Reynolds mayor que 2,100 indica un flujo turbulento (API Recommended Practice 13D , 2009). Las ecuaciones para el número de Reynolds en general y para un sistema de perforación son las siguientes:

General:
$$N_{Re} = \frac{VD\rho}{\mu} \quad \text{Ec. 6.16}$$

Para tuberías
$$N_{Rep} = \frac{15.467 \times V_p D_i \rho}{\mu_{ep}} \quad \text{Ec. 6.17}$$

Para espacio anular:
$$N_{Rea} = \frac{15.467 V_a (D_h^2 - D_p^2) \rho}{\mu_{ea}} \quad \text{Ec. 6.18}$$

Dónde:

V: Velocidad de flujo

V_p : Velocidad de propagación en la tubería.

V_a : Velocidad de propagación en el espacio anular.

μ : Viscosidad del fluido.

μ_{ea} : Viscosidad efectiva del fluido en el espacio anular.

μ_{ep} = Viscosidad efectiva del fluido en la tubería.

ρ : Densidad del fluido

6.4.1.3 VELOCIDAD CRÍTICA

La velocidad crítica se usa para describir la velocidad a la cual la transición del flujo laminar al flujo turbulento ocurre. El flujo dentro de la tubería de perforación es generalmente turbulento. La ecuación para la velocidad crítica está dada por Ec. 6.19

$$V_c = V_{cp} + (V_{cb} - V_{cp})(R) \left(\sqrt{\frac{V_{cp}}{V_{cb}}} \right) \quad \text{Ec. 6.19}$$

- a) Velocidad crítica para fluidos que cumplen el modelo exponencial (V_{cp}). Está dada por la Ec. 6.20:

$$V_{cp} = \left[\left(\frac{28277 (2.533 - n_p) k_p}{\rho} \right) \left(\frac{1.6 G_p}{D_{hyd}} \right)^{n_p} \right]^{\left(\frac{1}{2-n_p} \right)} \quad \text{Ec. 6.20}$$

Dónde:

$$G_p = \left[\frac{(3-\alpha)n_p + 1}{(4-\alpha)n_p} \right] \left[1 + \frac{\alpha}{2} \right] \quad \text{Ec. 6.21}$$

$$n_p = 3.32 \log_{10} \left(\frac{2\mu_p + \tau_y}{\mu_p + \tau_y} \right) \quad \text{Ec. 6.22}$$

$$k_p = \frac{\mu_p + \tau_y}{(511)^{(n_p)}} \quad \text{Ec. 6.23}$$

Para tuberías $\begin{cases} D_{hyd} = D_i \\ \alpha = 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6.24}$

Para espacio anular $\begin{cases} D_{hyd} = D_h - D_p \\ \alpha = 0 \end{cases} \quad \text{Ec. 6.25}$

Dónde:

G_p : Corrección geométrica de la velocidad de corte.

α : Factor geométrico.

n_p : Índice de comportamiento en tubería de perforación basado en indicaciones del viscosímetro de lodo a 300 y 600 RPM

k_p : Factor de consistencia en tubería de perforación basado en indicaciones del viscosímetro de lodo a 300 y 600 RPM

D_{hyd} : Diámetro hidráulico.

- b) V_{cb} : Velocidad crítica para fluidos que cumplen la modelo plástico de Bingham. Está dada por la Ec. 6.26

$$V_{cb} = \frac{67.86}{\rho} \left[B + \sqrt{B^2 + 9.42 \rho \tau_y \left(\frac{4-\alpha}{3-\alpha} \right)} \right] \quad \text{Ec. 6.26}$$

Dónde:

$$B = \frac{\mu_p \left(1 + \frac{\alpha}{2} \right)}{D_{hyd}} \quad \text{Ec. 6.27}$$

B : Expansibilidad del conducto.

- c) R : Relación de punto cedente. Se ve presentado por la Ec. 6.28

$$R = \frac{\tau_y}{PC} \quad \text{Ec. 6.28}$$

A partir de la ecuación de velocidad crítica se calcula el caudal crítico Q_c el cual es representado por Ec. 6.29

Para tuberías
$$Q_c = \frac{V_c (D_i)^2}{D_{hyd}} \quad \text{Ec. 6.29}$$

Para espacio anular
$$Q_c = \frac{V_c (D_i^2 - D_p^2)}{24.51} \quad \text{Ec. 6.30}$$

6.4.2 SISTEMA DE CIRCULACIÓN.

El sistema de circulación de un pozo de perforación consta de varios componentes o intervalos, cada uno de los cuales está sujeto a una caída de presión específica. La suma de las caídas de presión de estos intervalos es igual a la pérdida total de presión del sistema o a la presión medida del tubo vertical.

La pérdida de presión total para este sistema se puede describir matemáticamente como:

$$P_{total} = P_{equipo\ superf.} + P_{columna\ perf.} + P_{barrena} + P_{espacio\ anular} \quad \text{Ec. 6.31}$$

o

$$P_t = P_{es} + P_{cp} + P_b + P_{ea}$$

Las presiones críticas para la evaluación de la presión total del sistema (presión de bombeo) son la pérdida de presión a través de la barrena y la pérdida de presión anular(API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001). Las cuales se presentan a continuación:

a) Pérdida de presión anular:

$$P_{ea} = \frac{f_a V_a^2 \rho}{92.916 (D_h - D_p)} \times L_m \quad \text{Ec. 6.32}$$

$$\text{Para } N_{Re} < 2100 \quad f_a = \frac{24}{N_{Rea}} \quad \text{Ec. 6.33}$$

Para $N_{Re} > 2100$

$$f_a = \frac{\left(\frac{\log n_p + 3.93}{50}\right)}{N_{Re}^{\left[\frac{1.75 - \log n_p}{7}\right]}} \quad \text{Ec. 6.34}$$

Dónde:

P_{ea} : Presión del espacio anular.

f_a : Factor de fricción de Fanning.

L_m : Longitud de la tubería de perforación.

b) Pérdida de presión en la barrena.

$$P_b = \frac{\rho Q^2}{10.858 (TFA)^2} \quad \text{Ec. 6.35}$$

$$P_b = \frac{156 \rho Q^2}{\sum D_n^2} \quad \text{Ec. 6.36}$$

Dónde:

Q : Razón de flujo.

TFA : Área de flujo total.

D_n : Diámetro de la tobera.

6.4.2.1 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION (ECD)

La presión en una formación durante la circulación es igual al total de las pérdidas de presión de circulación *anular* desde el punto de interés hasta el niple de campana, más la presión hidrostática del fluido. Esta fuerza se expresa como la densidad del lodo que ejercería una presión hidrostática equivalente a esta presión. Este peso equivalente del lodo se llama Densidad Equivalente de Circulación (ECD).

$$ECD = \rho + \frac{P_{ea}}{0.052 TVD} \quad \text{Ec. 6.37}$$

TVD: Profundidad Vertical Verdadera.

6.4.2.2 POTENCIA HIDRAULICA POR PULGADA CUADRADA (HSI) DEL AREA DE LA BARRENA.

Una potencia hidráulica baja en la barrena puede producir bajas velocidades de penetración y un rendimiento deficiente de la barrena. La Ec. 6.38 presenta el cálculo de

$$HSI = \frac{1.27 hhp_b}{D_b^2} \quad \text{Ec. 6.38}$$

Dónde:

D_b : Diámetro de la barrena.

hhp_b : Potencia hidráulica de la barrena.

El rango de potencia hidráulica (hhp_b) recomendado para la mayoría de las barrenas para rocas es de 2,5 a 5,0 Caballos de Fuerza por Pulgada Cuadrada (HSI) del área de la barrena.

$$hhp_b = Q \left(\frac{P_b}{1,740} \right) \quad \text{Ec. 6.39}$$

6.4.2.3 FUERZA DE IMPACTO HIDRAULICA (IF) POR PULGADA CUADRADA.

$$IF = \frac{1.27 IF_{lb}}{D_b} \quad \text{Ec. 6.40}$$

Para el cálculo de la fuerza de impacto hidráulica (IF) por pulgada cuadrada se hace uso de la fuerza de impacto en unidades de masa (IF_{lb}) expresadas en libras. La cual está expresada en la Ec. 6.41 como:

$$IF_{lb} = \frac{Q\rho V_n}{1,930} \quad \text{Ec. 6.41}$$

Para el desarrollo de la Ec. 6.41 es necesario utilizar la velocidad de tobera V_n la cual viene dada por la Ec. 6.42

$$V_n = \frac{417.2 Q}{\sum D_n^2} \quad \text{Ec. 6.42}$$

7 FASE EXPERIMENTAL

En sus primeras dos secciones el presente apartado consiste en una recopilación de marchas analíticas e instrumentales normalizadas para la determinación de los parámetros físicos y químicos siguientes: densidad, viscosidad de embudo, propiedades reológicas, filtrado, pH, alcalinidad, azul de metileno, contenido de cloro. Dichas pruebas fueron realizadas con alcance de laboratorio a las diez formulaciones de catch de fluido de perforación propuestas, cada una de ellas a diez diferentes concentraciones dentro de un rango de concentración de materiales obturantes establecido (0 a 20 lb/bbl).

El objetivo de estas pruebas consiste en corroborar que los valores obtenidos estén dentro de los parámetros establecidos en la norma API-13B-1 (*Fields Testing for Water-Based Drilling Fluids*), y de esa forma evitar inconvenientes en su uso durante la perforación de pozos geotérmicos. El resultado obtenido en las mismas, sirvió para evaluar el rendimiento técnico operativo de los batch de fluidos de perforación propuestos. Las tablas 7.1 y 7.2 sintetizan la información de las pruebas tanto físicas como químicas que se efectuaron a los fluidos propuestos en la sección 7.3.2.

Tabla 7.1. Resumen de propiedades físicas a evaluar.

Propiedad.	Interpretación.	Rango permitido inicio de pérdida de circulación
Densidad	Controla la presión ejercida por los fluidos de formación a través de la presión de la columna hidrostática. Sí: $P_{\text{hidrostática}} < P_{\text{formación}}$; posible reventón. $P_{\text{hidrostática}} \gg P_{\text{formación}}$; posible pérdida de circulación debido a fractura inducida. Lo correcto es que la presión hidrostática sea ligeramente mayor a la presión de formación.	8.5-10 lb/gal

Propiedad.	Interpretación.	Rango permitido inicio de pérdida de circulación
Viscosidad marsh	Da una idea empírica de la fluidez del fluido, su capacidad para arrastrar recortes, no formar geles excesivos, etc. Muy útil cuando no se dispone del tiempo para realizar pruebas reológicas.	36-55 seg.
pH	Propiedad que indica la acidez o basicidad del fluido. El pH nunca debe ser ácido puesto que al ser ácido promueve la corrosión de las herramientas de perforación, a su vez que también es un indicador de contaminantes.	8.5-12
Filtrado	Modela la cantidad de fluido que se filtrará a través de la formación, el control de esta propiedad está ligada a la formación que se perfora, puesto que hay formaciones que son sensibles al filtrado (en este caso se debe disminuir el filtrado o la formación corre el riesgo de derrumbe) y formaciones que no lo son.	Depende de la formación.
Pruebas reológicas		
Viscosidad plástica.	Relacionada directamente con la capacidad de suspender recortes.	En función de la densidad del fluido (ver figura 7.4)
Punto cedente.	Se relaciona con la fuerza mínima que se necesita para continuar con la circulación del fluido y no caer a condiciones estáticas.	En función de la densidad del fluido (ver figura 7.3)
Esfuerzo de gel a 10 segundos.	Es una medida de la fuerza mínima que se necesita para iniciar la circulación del fluido en condiciones estáticas para un periodo corto de tiempo.	5-10 lb/100 ft ² .

Propiedad.	Interpretación.	Rango permitido inicio de pérdida de circulación
Esfuerzo de gel a 10 minutos.	Aproximación de la fuerza mínima que se necesita para iniciar la circulación del fluido en condiciones estáticas para un periodo prolongado de tiempo.	10-20 lb/100 ft ²

Fuente. API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001.

Tabla 7.2. Resumen de propiedades químicas a evaluar.

Propiedad.	Interpretación.	Rango permitido al inicio de la perforación o inicio de pérdida de circulación.
Alcalinidad de filtrado Pf	Determina la proporción de iones contaminantes (iones carbonato, bicarbonato, hidroxilo), los cuales en niveles altos provocan inestabilidad en las propiedades reológicas (altos puntos cedentes, geles progresivos e incluso pueden solidificar el lodo)	01-1.5 ml 0.02N H ₂ SO ₄ .
Alcalinidad de filtrado Mf		0.1-1.0 ml 0.02N H ₂ SO ₄ .
Alcalinidad del lodo Pm		0.1-1.5 ml 0.02N H ₂ SO ₄ .
Contenido de cloruros.	Los niveles altos de cloruros están directamente relacionados con: aumentos de viscosidad, aumento de filtrado y reducción de pH.	0-5000(mg/l)
Azul de metileno	Está relacionada con la cantidad de sólidos reactivos (bentonita y arcillas de formación), los cuales al no ser debidamente controlados pueden incurrir en una baja en el rendimiento de la bentonita, lo cual se traduce en inestabilidad en las propiedades reológicas.	15-35 lb/bbl

Fuente. API, Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2001.

De las secciones 7.1.1-7.2.3 se expone con mayor detalle cada una de las pruebas.

7.1 PRUEBAS FÍSICAS

Las propiedades de los fluidos se determinan con los ensayos físicos y químicos de acuerdo con las normas API. En la determinación de las propiedades físicas no se utiliza ningún indicador o titulador. Entre estas propiedades se tienen: Densidad o peso; Viscosidad Embudo o API; Propiedades reológicas; Filtrado API y pH.

7.1.1 DENSIDAD

Es la propiedad del fluido que tiene por función principal mantener en sitio los fluidos de formación. La densidad se expresa por lo general en lb/gal, y es uno de los dos factores, de los cuales depende la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. Durante la perforación de un pozo se trata de mantener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de la formación, para evitar en lo posible una arremetida, lo cual dependerá de las características de la formación.

7.1.1.1 OBJETIVO

El objetivo de la prueba es determinar la densidad del fluido con el fin de controlar la presión de formación y mantener la estabilidad del pozo. Si la densidad es insuficiente cabe la probabilidad de que los fluidos de la formación se infiltren dentro del pozo causando un reventón; por el contrario si la densidad excede la presión de fracturación ocurre lo que se conoce como fractura inducida la cual conlleva a pérdidas de circulación.

7.1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La balanza de lodo se compone principalmente de una base sobre la cual descansa un brazo graduado con un vaso, tapa, cuchillo, nivel de burbuja de aire, caballero y contrapeso. Se coloca el vaso de volumen constante en un extremo del brazo graduado, el cual tiene un

contrapeso en el otro extremo. El vaso y el brazo oscilan perpendicularmente al cuchillo horizontal, el cual descansa sobre el soporte, y son equilibrados desplazando el caballero a lo largo del brazo. Además de la densidad, la balanza es capaz de arrojar datos de gravedad específica y caída de presión por cada 1000 pies.

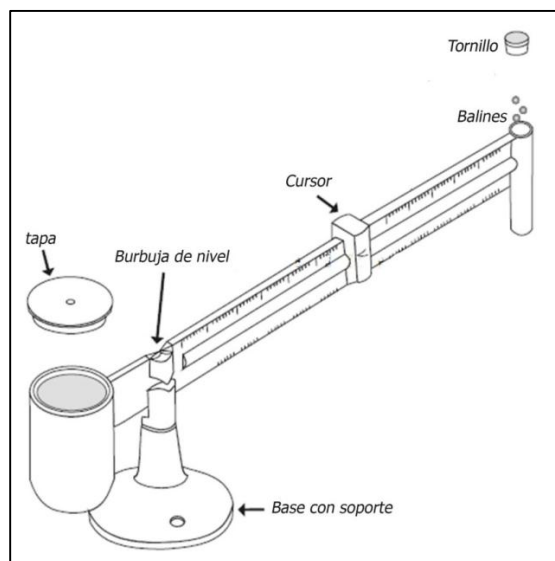


Figura 7.1. Esquema de una balanza de lodos.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014

7.1.1.3 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LODO

La Tabla 7.3 y la Tabla 7.4 presentan los pasos a seguir para la correcta calibración y procedimiento para la determinación de la densidad de un fluido.

Tabla 7.3. Procedimiento para calibración de balanza de lodos.

Nº	Pasos
1	Llenar la copa de la balanza con agua limpia.
2	Colocar la tapa sobre la copa y asentarla firmemente, pero en forma lenta con un movimiento giratorio. Asegúrese que el exceso de agua salga por el orificio de la tapa
3	Colocar el dedo pulgar sobre el orificio de la tapa y limpiar la balanza con un trapo

N°	Pasos
	seco.
4	Colocar la balanza sobre el soporte y mover el cursor a lo largo del brazo graduado hasta que la burbuja del nivel indique la nivelación correcta
5	Leer la densidad o peso del agua en el lado izquierdo del cursor. Ésta debe ser de 8.33 en lbs/gal o 62.4 en lb/pie ³ . En caso de no obtener la densidad correcta, procédase a retirar el tornillo ubicado en el extremo del brazo de la balanza para agregar o quitar balines hasta lograr la calibración.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014

Tabla 7.4. Procedimiento para la determinación de la densidad de un fluido.

N°	Pasos
1	Quitar la tapa del vaso y llenarlo con el lodo a probar.
2	Volver a colocar la tapa y girar hasta que este firmemente tapado, asegurándose que parte del lodo sea expulsado a través del agujero de la tapa.
3	Limpiar el lodo que está fuera del vaso y secar el vaso.
4	Colocar el brazo de la balanza sobre la base, con el cuchillo descansando sobre el punto de apoyo.
5	Desplazar el cursor hasta que la burbuja de aire indique que el brazo graduado este nivelado.
6	En el borde del cursor más cercano al brazo, leer la densidad del lodo.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014

7.1.2 VISCOSIDAD DE EMBUDO

Es determinada con el Embudo Marsh, y sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. A la viscosidad embudo se le concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, y el único beneficio que aparentemente tiene, es el de suspender el ripio de formación en el espacio anular, cuando el flujo es laminar. Por esta razón, generalmente no se toma en consideración para el análisis riguroso de la tixotropía del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Un fluido contaminado exhibe alta viscosidad de embudo.

7.1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El viscosímetro de Marsh (Figura 7.2) tiene un diámetro de 6 pulgadas en la parte superior y una longitud de 12 pulgadas. En la parte inferior, un tubo de orificio liso de 2 pulgadas de largo, con un diámetro interior de 3/16 pulgada, está acoplado de tal manera que no hay ninguna constricción en la unión. Una malla de tela metálica con orificios de 1/16 de pulgada, cubriendo la mitad del embudo, está fijada a 3/4 de pulgada debajo de la parte superior del embudo.

7.1.2.2 CALIBRACIÓN

Llenar el embudo hasta la parte inferior de la malla (1.500 ml) con agua dulce a $70 \pm 5^\circ\text{F}$. . El tiempo requerido para descargar 1 cuarto de galón (946 ml) debería ser 26 seg. $\pm 0,5$ seg.

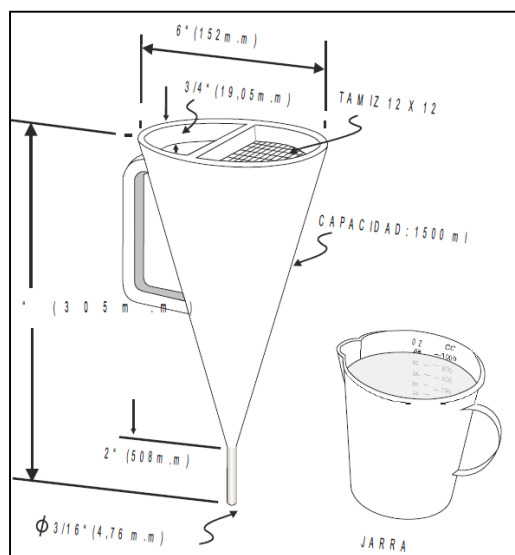


Figura 7.2. Esquema del cono de Marsh para realización de la prueba de viscosidad de embudo.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.2.3 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE MARSH

El procedimiento para obtener la viscosidad de embudo se aprecia en la Tabla 7.5. Es importante mencionar que para realizar la prueba es preferible que el fluido esté libre de partículas sólidas.

Tabla 7.5. Procedimiento para el cálculo de la viscosidad de embudo.

N°	Procedimiento
1	Tapar la parte inferior del embudo con el dedo
2	Verter lodo a través de la malla del embudo hasta que el nivel del mismo coincida con la malla.
3	Colocar la taza debajo del embudo.
4	Retirar el dedo y dejar escurrir ¼ de galón (946 ml) de muestra
5	Reportar la viscosidad de embudo como el tiempo transcurrido en recolectar escurrir ¼ de galón (946 ml) de muestra

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.3 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Punto cedente

Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación. Un fluido floculado exhibe altos valores de punto cedente. La floculación se controla de acuerdo al causante que lo origina. Se usan adelgazantes químicos cuando es causada por excesos de sólidos arcillosos y agua cuando el fluido se deshidrata por altas temperaturas.

Viscosidad plástica

Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre:

- Sólidos
- Sólidos y líquidos
- Líquido y líquidos

Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de *Control de Sólidos*. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP). Una baja viscosidad plástica aunada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración.

Para un fluido base agua los límites de punto cedente y viscosidad plástica varían con respecto al peso del lodo, tal como se aprecia en las figuras 7.3 y 7.4.

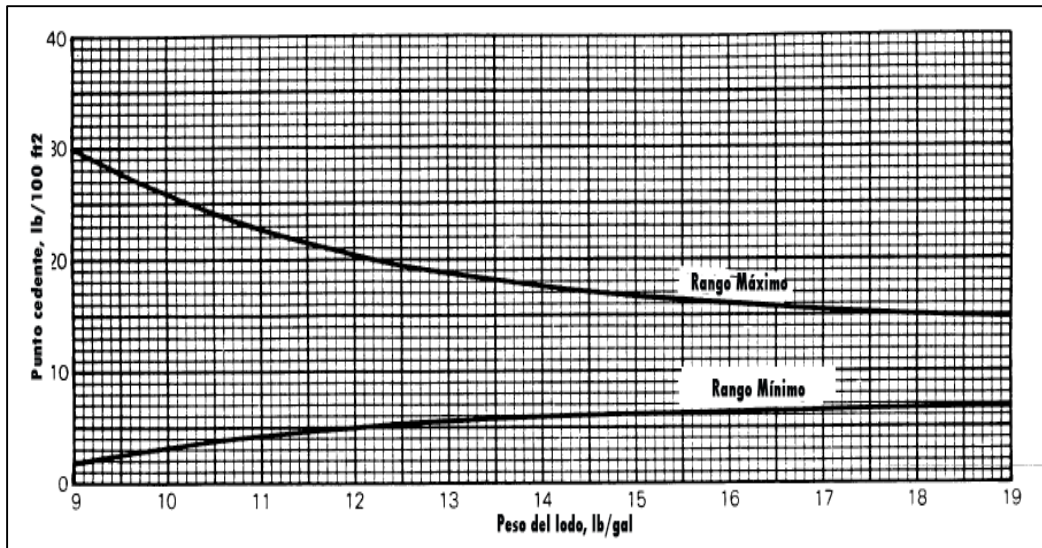


Figura 7.3. Rango sugerido para el punto cedente de un fluido base agua.

Fuente: Annis & Smith, 1974

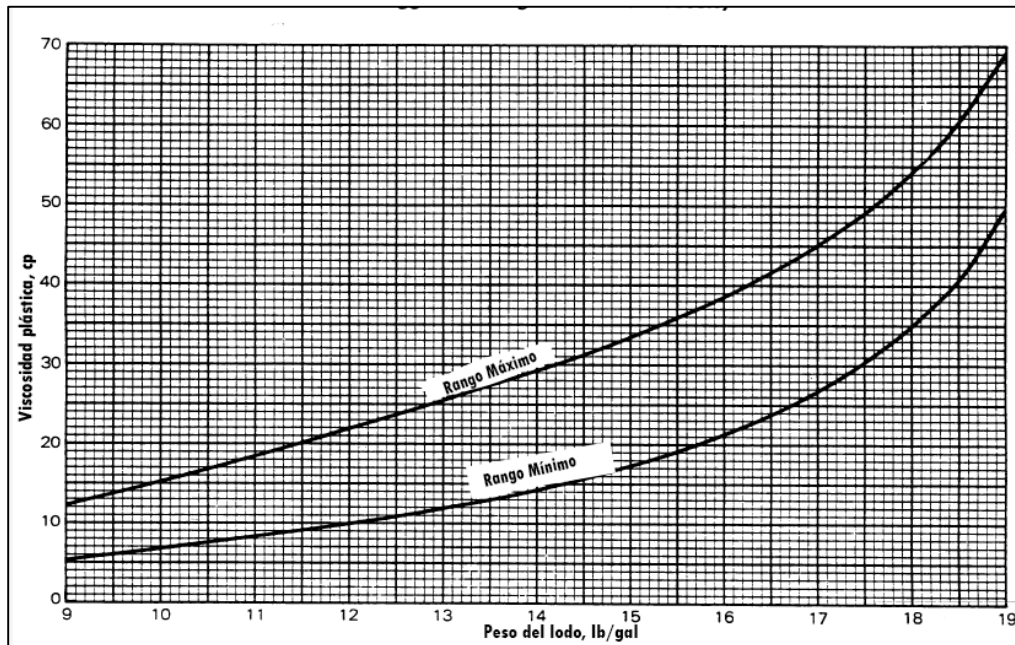


Figura 7.4. Rango sugerido de la viscosidad plástica para un fluido base agua.

Fuente: Annis & Smith, 1974.

Esfuerzo de gel.

Esta resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido y se controla, en la misma forma, como se controla el punto cedente, puesto que la origina el mismo tipo de sólido (reactivo) Las mediciones comunes de esta propiedad se toman a los diez segundos y a los diez minutos, pero pueden ser medidas para cualquier espacio de tiempo deseado. Esta fuerza debe ser lo suficientemente baja para:

- Permitir el asentamiento de los sólidos en los tanques de superficie, principalmente en la trampa de arena.
- Permitir buen rendimiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación.
- Minimizar el efecto de succión cuando se saca la tubería.
- Permitir el desprendimiento del gas incorporado al fluido, para facilitar el funcionamiento del desgasificador.

Índice de ley exponencial e índice de consistencia.

Tal como se mostró en la sección 6.3.4 existen diferentes modelos que puedan describir el comportamiento reológico del fluido, matemáticamente son representados por el índice de ley exponencial (n) y el índice de consistencia (k), ambos tienen que ver con el perfil de velocidad del fluido.

7.1.3.1 OBJETIVO DE LAS PRUEBAS PARA EL CÁLCULO DE LAS PRUEBAS REOLÓGICAS

Principalmente consiste en determinar la capacidad de limpieza y suspensión de fluido con a base a sus propiedades reológicas.

7.1.3.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR

Los viscosímetros de indicación directa son instrumentos de tipo rotativo accionados por un motor eléctrico o una manivela. El fluido de perforación está contenido dentro del espacio anular entre dos cilindros concéntricos. El cilindro exterior o manguito de rotor es accionado a una velocidad rotacional (RPM – revoluciones por minuto) constante. La rotación del manguito de rotor en el fluido impone un torque sobre el balancín o cilindro interior. Un resorte de torsión limita el movimiento del balancín y su desplazamiento es indicado por un cuadrante acoplado al balancín.

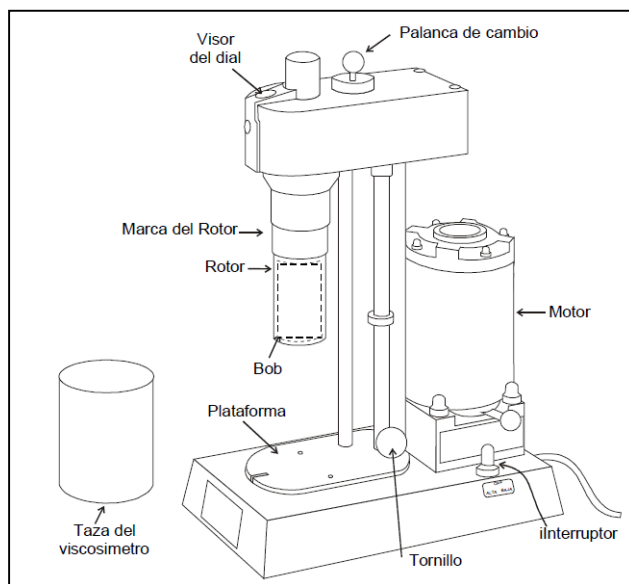


Figura 7.5. Esquema de un reómetro rotacional.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014

7.1.3.3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento consiste en ir tomando lecturas de esfuerzos de corte a diferentes velocidades (RPM), para luego realizar un análisis estadístico que sea capaz de obtener las propiedades reológicas. La tabla 7.6 muestra los pasos a seguir para la toma de datos.

Tabla 7.6. Procedimiento para el cálculo de las propiedades reológicas.

No	Pasos
1	Conectar el instrumento a la fuente de poder apropiada
2	Llenar hasta la marca que posee la taza del viscosímetro con la muestra de fluido recién agitada
3	Colocar la taza del viscosímetro en el thermo cup y calentar a 120°F, si el fluido es base aceite. La reología de los fluidos base agua se corre, según API, a temperatura ambiente.
4	Colocar el thermo cup en la plataforma del viscosímetro y levantarla hasta hacer coincidir el nivel de la muestra con la marca del rotor. Apretar el tornillo de la plataforma

No	Pasos
5	Encender el equipo y colocar la palanca de cambios o perilla en posición baja y el switch de velocidad en posición alta para obtener 600 RPM.
6	Registrar la lectura como "Lectura a 600 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.
7	Mantener la palanca de cambios o perilla en la posición baja y colocar el switch de velocidad en posición baja (perilla inferior hacia atrás) para obtener 300 RPM.
8	Registrar la lectura como "Lectura a 300 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.
9	Colocar la palanca de cambios o perilla y el switch de velocidad en la posición alta, para obtener 200 RPM.
10	Registrar la lectura como "Lectura a 200 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.
11	Mantener la palanca de cambios o perilla en posición alta y el switch de velocidad en posición baja, para obtener 100 RPM.
12	Registrar esta lectura como "Lectura a 100 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Tabla 7.7. Procedimiento para el cálculo de las propiedades reológicas. Continuación.

No	Pasos
13	Colocar la palanca de cambios o perilla en posición media y el switch en la posición alta, para obtener 6 RPM.
14	Registrar la lectura como "Lectura a 6 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.
15	Mantener la palanca de cambio o perilla en posición media y el switch de velocidad en posición baja, para obtener 3 RPM
16	Registrar la lectura como "Lectura a 3 RPM", cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial o se mantenga constante.
17	Medir a 3 RPM la fuerza de gel a 10 seg., con la palanca de cambios o perilla en posición media y el switch de velocidad en posición baja.

No	Pasos	
	1	Apagar el motor, colocando el switch de velocidad en posición media y esperar a que el fluido se mantenga estático por 10 seg.
	2	Colocar el switch de velocidad en posición baja, después de haber transcurrido 10 seg y observar cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial.
18	Registrar la lectura como "Gel inicial" a 10 seg. Expresada en lbs/100 pie ² .	
19	Medir a 6 RPM la fuerza de gel a 10 minutos, con la palanca de cambio o perilla en posición media y el switch en posición alta.	
	1	Agitar la muestra por diez minutos a 600 RPM
	2	Colocar la palanca de cambios o perilla en posición media y el switch en posición media para apagar el motor.
20	3	Mantener el fluido estático por diez minutos y luego colocar el switch de velocidad en posición baja.
20	Registrar la lectura como "Gel final" a 10 minutos expresada en lbs/100 pie ² , cuando la aguja alcance la máxima deflexión en el dial.	

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.4 FILTRADO

El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Esta característica es afectada por los siguientes factores: presión, dispersión, temperatura, tiempo.

Se mide en condiciones estáticas, a baja temperatura y presión para los fluidos base agua. Su control depende del tipo de formación. En formaciones permeables no productoras se controla desarrollando un revoque de calidad, lo cual es posible, si se tiene alta concentración y dispersión de sólidos arcillosos que son los verdaderos aditivos de control de filtración. Por ello, es práctica efectiva usar bentonita pre hidratada para controlar el filtrado API.

7.1.4.1 OBJETIVO

Determinar el volumen de líquido o filtrado que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. El filtrado influye sobre la estabilidad del pozo y causa daño a la zona productora, razón por la cual es importante su control.

7.1.4.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO (FILTRO PRENSA API) NECESARIO

Para la medición de esta propiedad física se utilizan los siguientes instrumentos: Filtro Prensa API, probeta de 25 ml, papel filtro Whatman 40, cronómetro.

Descripción del filtro prensa API

Este instrumento consta de una celda de lodo, un regulador de presión y un medidor montado encima de la caja de transporte o en la parte superior de la unidad de laboratorio móvil. Se usa un adaptador de acoplamiento para conectar la celda al regulador, simplemente introduciendo el empalme macho de la celda dentro del empalme hembra del filtro prensa y dando un cuarto de vuelta en sentido horario. Algunas celdas no tienen este dispositivo de cierre y son simplemente introducidas dentro del acoplamiento apropiado. La celda se cierra en la parte inferior con una tapa provista de una tela metálica (o rejilla), colocando la tapa firmemente contra el papel filtro y girando hacia la derecha hasta que quede apretada a mano. Esto empuja la hoja de papel filtro contra la junta tórica que fue previamente introducida en la base de la celda. La presión es proporcionada por un pequeño cartucho de gas carbónico. Se proporciona una válvula de purga para aliviar la presión antes de desacoplar la celda.

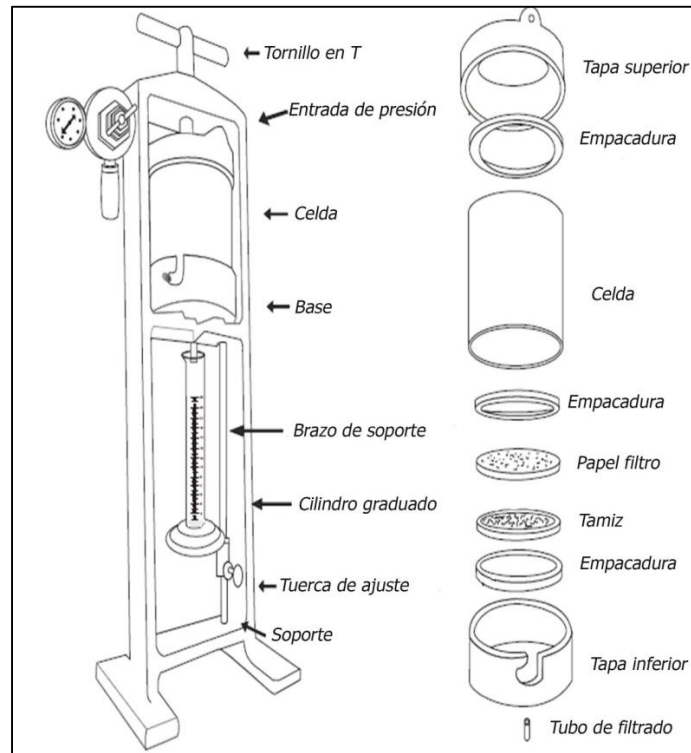


Figura 7.6.Esquema de un filtro prensa API.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.4.3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir para la prueba de filtrado se expone en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8.Procedimiento para la realización de la prueba de filtrado.

No	Pasos
1	Ensamblar las partes del equipo limpias y secas en el orden siguiente: Tapa base, empaque de caucho, malla de 60 Mesh, hoja de papel filtro, empaque de caucho y celda.
2	Llenar la celda hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada de su tope, con muestra de lodo recién agitada. Esta cantidad de lodo se agrega para conservar el cartucho de CO ₂ y poder realizar varias pruebas con él. Colocar la unidad ensamblada en la estructura del filtro prensa.

No	Pasos
3	Verificar que la tapa superior tenga el empaque y esta se encuentre bien asentada. Colocar la tapa superior a la celda y asegurarla con el tornillo T.
4	Colocar la probeta bajo el tubo de salida del filtrado.
6	Aplicar 100 psi de presión a la celda y filtrar por 30 minutos Nota: Cuando transcurran los 30 minutos de la prueba, retirar la presión por la válvula de alivio y anotar el volumen recolectado en ml.
7	Reportar el volumen recolectado como pérdida de filtrado API.
8	Desarmar la celda y examinar el revoque en cuanto a su espesor, dureza, resistencia, flexibilidad, delgadez, firmeza y ver qué tan esponjoso resulta mismo. El espesor se expresa en 1/32". Un espesor de 2/32" es generalmente considerado aceptable.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.5 PRUEBA DE pH

El pH indica si el lodo es ácido o básico. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH. El objetivo de la prueba es determinar el grado de acidez o basicidad del fluido para evitar problemas de corrosión y contaminación.

7.1.5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO A UTILIZAR

El pH-metro es un instrumento utilizado para determinar el pH de soluciones acuosas, midiendo el electro potencial generado entre el electrodo especial de vidrio y el electrodo de referencia.

7.1.5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En las tablas 7.9 y 7.10 se presentan las guías a seguir para la calibración del equipo y el proceso experimental.

Tabla 7.9. Procedimiento para la calibración del pH-metro.

Paso	Descripción
1	Lavar el electrodo con agua destilada y secarlo cuidadosamente con un trapo seco
2	Sumergir el electrodo en la solución Buffer de pH 7. Esperar la estabilización de la lectura y ajustar el pH metro a 7.0
3	Repetir la operación para las soluciones Buffer de pH 4 y 10
4	Repetir el procedimiento con soluciones Buffer nuevas o que tengan sus pH exactos. Si no se logra el ajuste deseado es indicativo de una contaminación en una o varias de las soluciones Buffer.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Tabla 7.10. Procedimiento para la determinación del pH

Paso	Descripción
1	Presionar el botón on/off en ON para encender el medidor de pH
2	Ajustar la temperatura manualmente con la temperatura de la muestra.
3	Presionar el botón pH/mV hasta que el aviso en la pantalla indique el modo de medición deseado.
4	Retirar el electrodo de la solución de almacenamiento.
5	Enjuagar el electrodo con agua destilada.
6	Sumergir el electrodo en la solución a ser medida, después de pocos segundos el valor de pH se estabiliza.
7	Registrar el valor del pH

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.1.5.3 TRATAMIENTO

Si el pH resulta ser muy bajo, lo correcto es corregir el problema agregando NaOH al fluido de perforación. Por el contrario si pH es demasiado alto se adiciona cal o yeso, sin embargo estos conceptos son explicados en la sección para el tratamiento de la alcalinidad (Figura 7.7)

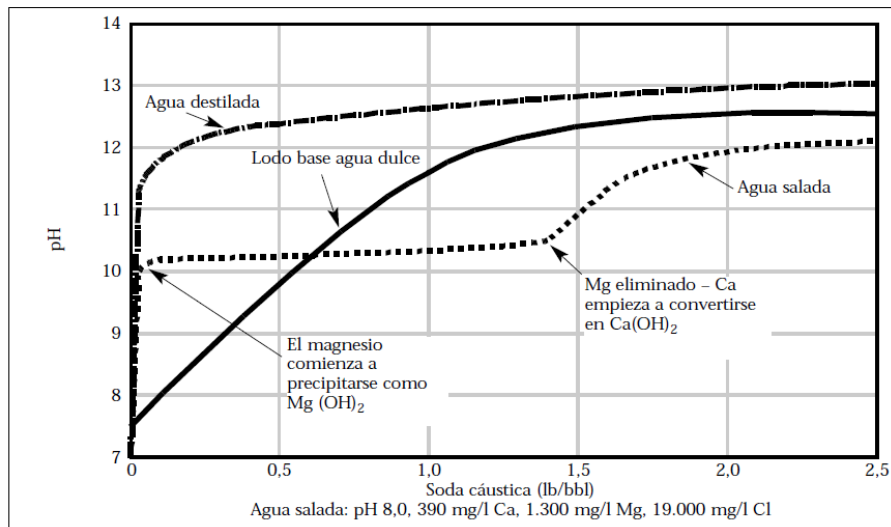


Figura 7.7. pH vs soda cáustica para agua destilada, dulce y salada.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

7.2 PRUEBAS QUÍMICAS

Se realizan algunos análisis químicos al filtrado de los lodos para determinar la presencia de contaminantes, tales como: cloruros, carbonatos, bicarbonatos, etc. Los mismos análisis pueden efectuarse a las aguas que se utilizan en la preparación y mantenimiento del fluido, puesto que algunas formaciones contienen sales disueltas que afectan materialmente al tratamiento del mismo.

Recomendación: Debido a la naturaleza de las soluciones es de suma importancia considerar que hay reactivos y sustancias sensibles a la luz, la cual provoca su descomposición, por lo que deben guardarse en recipientes opacos. Ej. Indicadores y tituladores.

7.2.1 PRUEBA DE ALCALINIDAD

La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la prueba de alcalinidad se pueden estimar la concentración de iones OH^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- , presentes en el fluido.

Cristalería a utilizar

Medidor de pH con electrodo de vidrio, recipiente de valoración 100 - 150 ml preferiblemente blanco, pipetas graduadas una de 1 ml 2 ml y otra de 10 ml, probetas de 25 ml y otra de 5 o 10 ml, varilla de agitación, 1 vidrio reloj, balanza analítica, 1 espátula, beaker de 150 ml, 2 matraz aforado de 1000 ml, 2 beaker de 50 ml, 1 jeringa de 1 ml.

Reactivos

Ácido sulfúrico, indicador de fenolftaleína, agua destilada, solución indicadora de anaranjado de metilo.

Tabla 7.11. Preparación de solución 0.02 N de ácido sulfúrico.

Paso	Descripción
1	Colocar un volumen entre 50 ml – 100 ml de agua destilada en un matraz aforado de 1L.
2	Utilizar una pipeta graduada de 2 ml para extraer 1.67 ml de ácido sulfúrico.
3	Situar los 1.67 ml de ácido en el matraz aforado de 1 litro y enrasar con agua destilada.

Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.1 ALCALINIDAD DE FILTRADO PF.

El objetivo es determinar la alcalinidad del filtrado con fenolftaleína, con la finalidad de identificar los iones contaminantes, como CO_3^{2-} y HCO_3^- , que afectan la estabilidad del hoyo. La comparación entre los valores de alcalinidad, Pf y Mf, permite visualizar problemas de contaminación en el fluido.

Tabla 7.12. Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de filtrado Pf.

Paso	Descripción
1	Colocar 1 ml de filtrado en un recipiente y diluirlos con 5 ml de agua destilada
2	Agregar 2 o 3 gotas de fenolftaleína, hasta obtener un color rosado

Paso	Descripción
3	Agregar H ₂ SO ₄ (0.02N) hasta que el filtrado adquiera su color original
4	Registrar el Pf como el número de ml de H ₂ SO ₄ gastados para neutralizar el color de la fenolftaleína
5	Registrar el valor del pH

Fuente: API, API Recomend Practice 13B-1, 2014.

Observación: Si la muestra está oscurecida de manera tal que el cambio de color no se perciba, el punto final se toma con un pH metro cuando el pH cae a 8.3.



Figura 7.8. Procedimiento para la obtención de la alcalinidad de filtrado Pf.

Fuente: API, API Recomend Practice 13B-1, 2014.

7.2.1.2 ALCALINIDAD DE FILTRADO MF

El objetivo es determinar la alcalinidad del filtrado con el Anaranjado de Metilo, para identificar la concentración de iones contaminantes, que afectan la estabilidad del hoyo. Un valor alto de Mf es indicativo de la presencia de contaminantes como CO₃⁻² y HCO₃⁻.

Tabla 7.13. Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de filtrado Mf.

Paso	Descripción
1	Agregar a la muestra que ha sido titulada al punto final del Pf más o menos 4 gotas de Anaranjado de Metilo, hasta obtener un color amarillo oscuro.
2	Agregar H ₂ SO ₄ (0.02N) gota a gota, hasta que el color del indicador cambie de amarillo naranja a marrón claro.
3	Registrar el Mf como el total de ml de H ₂ SO ₄ gastados más el que se gastó en lograr el Pf

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Observación: Si la muestra está oscurecida de manera tal que el cambio de color no se perciba, el punto final se toma con un pH metro cuando el pH cae a 4.3.

7.2.1.3 ALCALINIDAD DEL LODO PM

El objetivo es determinar la concentración de cal en lb/bbl necesaria para secuestrar los gases ácidos que puedan presentarse durante la perforación del pozo. El procedimiento se describe en la Tabla 7.14e ilustrado en la figura 7.9

Tabla 7.14. Procedimiento experimental para la obtención de la alcalinidad de lodo Pm.

Paso	Descripción
1	Agregar 25 ml de agua destilada.
2	Colocar 1 ml de lodo con una jeringa y colocar 3 gotas de fenolftaleína.
3	Agregar H ₂ SO ₄ 0.02N hasta lograr el color original del lodo.
4	Registrar la alcalinidad del lodo (Pm) como los ml de H ₂ SO ₄ gastados en neutralizar el color de la fenolftaleína

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

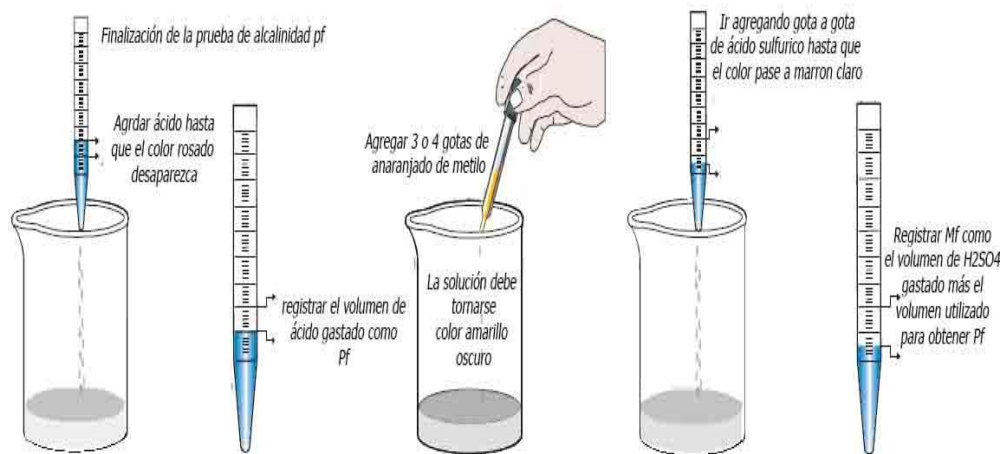


Figura 7.9. Procedimiento para la obtención de la alcalinidad de lodo Pm.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

7.2.1.4 TRATAMIENTO

Habiendo estimado los valores de Pf, Mf, el siguiente paso es determinar cuáles son los iones contaminantes, los cuales pueden ser obtenidos a partir de la relación entre Pf y Mf según la Tabla 7.15:

Tabla 7.15. Concentraciones de iones que producen la alcalinidad en función de Pf y Mf.

Alcalinidad	Ion	EPM (equivalentes por millón)	ppm (partes por millón)
Pf=0	HCO_3^-	20 Mf	1220 Mf
2Pf<Mf	HCO_3^-	20(Mf-2Pf)	1220(Mf-2Pf)
	CO_3^{2-}	4Pf	1200Pf
2Pf=Mf	OH^-	40Pf	1200Pf
2Pf>Mf	CO_3^{2-}	40(Mf-Pf)	1200(Mf-Pf)
	OH^-	20(2Pf-Mf)	340(2Pf-Mf)
Pf=Mf	OH^-	20Pf	340Pf

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Dependiendo del ion contaminante (bicarbonato o carbonato) así será el tratamiento de acuerdo a las figuras 7.10 y 7.11.

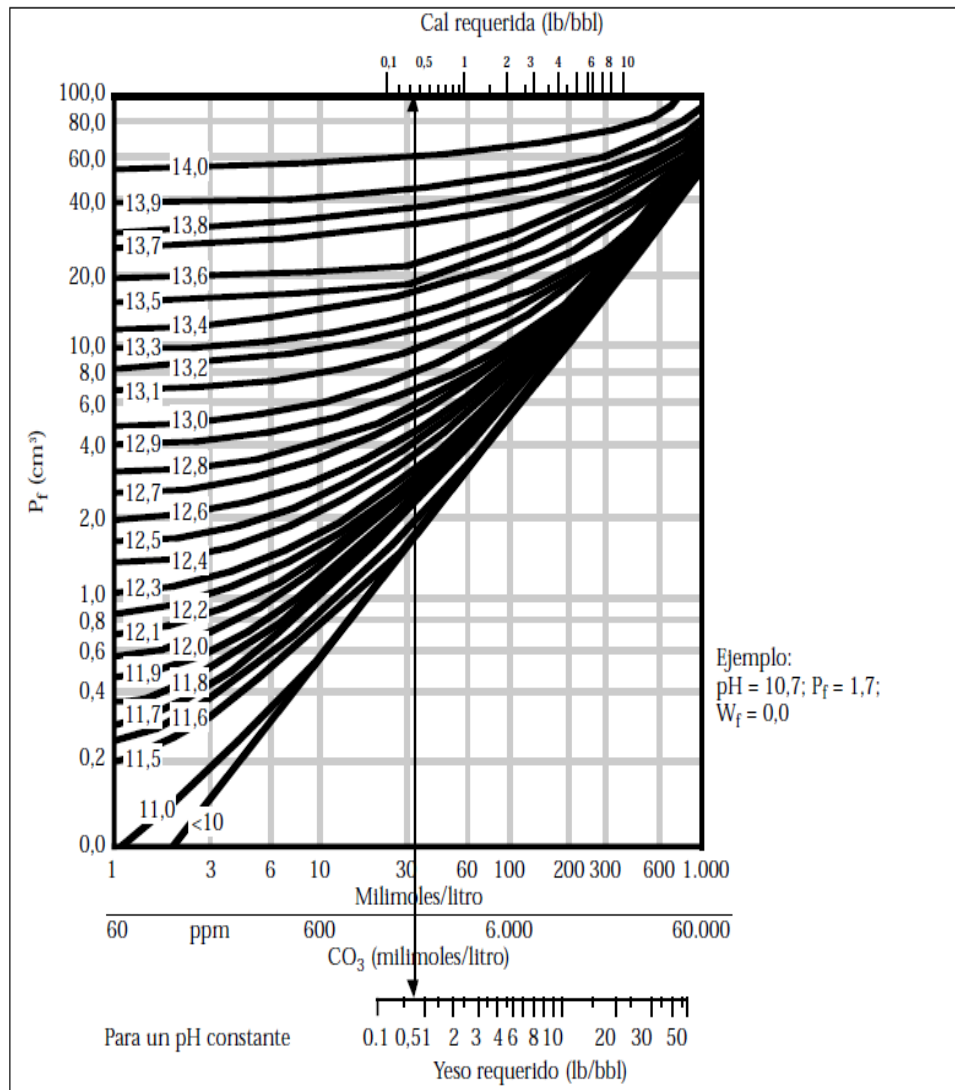


Figura 7.10. Concentración y tratamientos para carbonatos.

Fuente:(API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001).

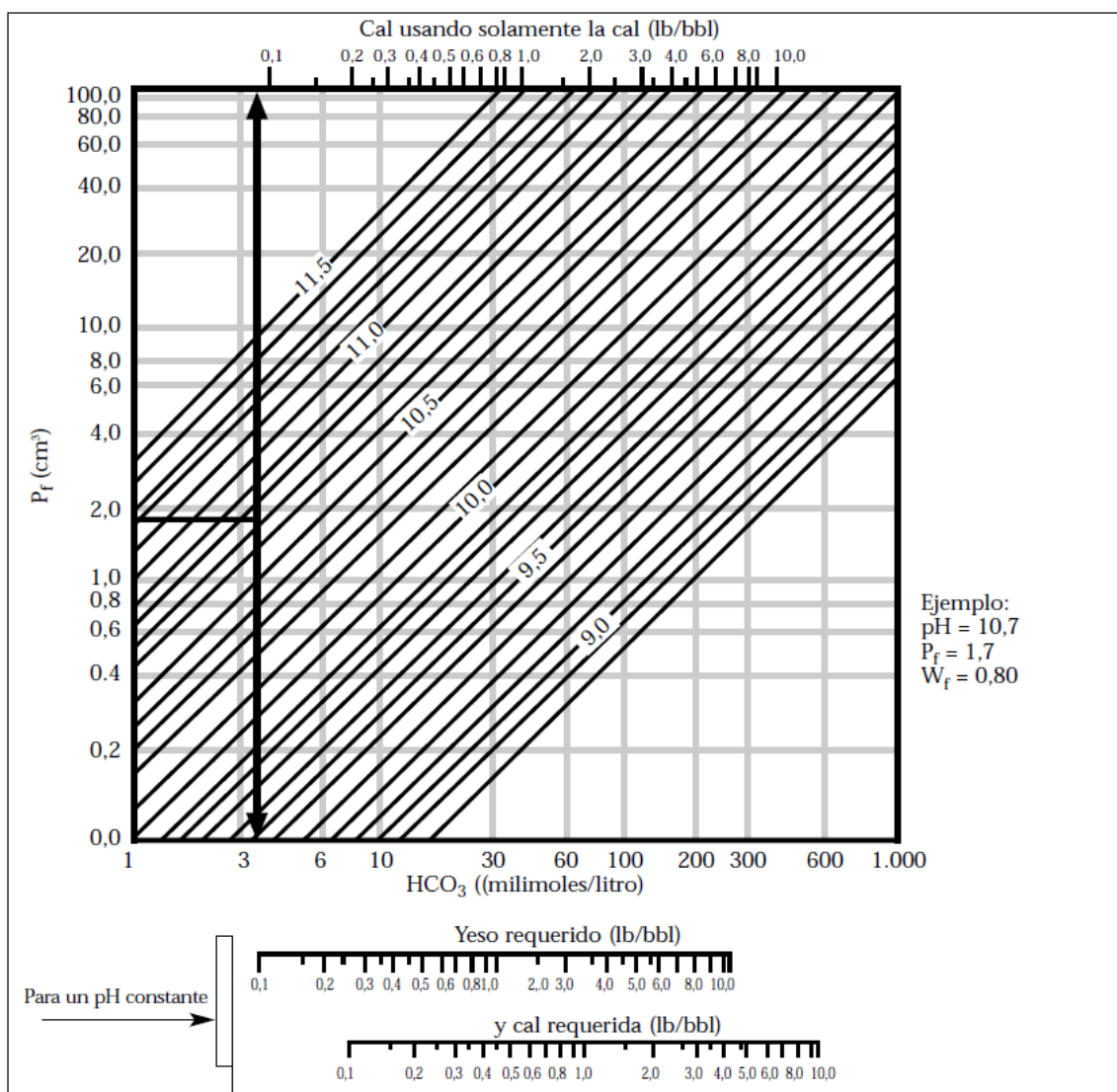


Figura 7.11. Concentración y tratamientos para bicarbonatos.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

7.2.2 PRUEBA DE AZUL DE METILENO

La prueba MBT da la concentración total de los sólidos arcillosos que contiene el fluido, es decir, la concentración de los sólidos arcillosos comerciales agregados (Bentonita) y la concentración de sólidos arcillosos aportados por la formación.

Cristalería a utilizar

Jeringa de 3 ml, bureta de 10 ml, micro pipeta de 0.5 ml, matraz Erlenmeyer, de 250 ml con tapón de caucho, bureta o pipeta de 10 ml, cilindro graduado de 50 ml, varilla de agitación, placa calentadora, papel filtro 11 cm de diámetro. Whatman N 1 o equivalente, 2 beaker de 100 ml, 1 pipeta de 10 ml, 1 pipeta graduada de 5 ml, 1 matraz aforado de 250 ml, 1 beaker de 150 ml, y otro de 400 ml, 1 probeta de 100 ml, 2 matraz aforado de 1 L, 1 vidrio reloj, espátula, balanza analítica, 1 beaker de 250 ml, 1 Embudo, Agitador.

Reactivos

Azul de metileno, peróxido de hidrógeno, solución ácido sulfúrico, agua destilada.

Tabla 7.16. Preparación de solución de ácido sulfúrico 5N.

Paso	Descripción
1	Colocar un volumen entre 50 ml-100 ml de agua destilada en un matraz aforado de 250 ml
2	Extraer 104.17 ml de ácido sulfúrico (6M).
3	Situar los 104.17 ml del ácido sulfúrico 6M en el matraz aforado de 250 ml con la cantidad de agua destilada establecida en el punto 1.
4	Enrasar con agua destilada hasta la marca del matraz aforado. Finalmente agitar.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7.17. Preparación de solución de peróxido de hidrógeno al 3%.

Paso	Descripción
1	Colocar un volumen entre 400 ml – 500 ml de agua destilada en un matraz aforado de 1 L.
2	Utilizando una probeta de 100 ml, medir 100 ml de peróxido de hidrógeno (calidad reactivo aprox. 30%).

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7.18. Preparación de solución de peróxido de hidrógeno al 3%. Continuación.

Paso	Descripción
3	Situar los 100 ml del peróxido de hidrógeno en el matraz aforado de 1 L con la cantidad de agua destilada establecida en el punto 1.
4	Enrasar con agua destilada hasta la marca del matraz aforado. Finalmente agitar.

Fuente. Elaboración propia.

7.2.2.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir está esbozado en la Tabla 7.19, a su vez la Figura 7.12 describe los pasos finales del procedimiento experimental para la prueba de azul de metileno (MBT)

Tabla 7.19. Procedimiento experimental para la obtención del azul de metileno.

Paso	Descripción
1	Agregar 10 ml de agua destilada
2	Agregar 1 ml de lodo
3	Agregar 15 ml de agua oxigenada
4	Agregar 0.5 ml de ácido sulfúrico (5N)
5	Hervir suavemente durante 10 minutos
6	Completar hasta 50 ml con agua destilada.
7	Agregar 0.5 ml de Azul de Metileno y agitar
8	Tomar una gota de líquido con la varilla de agitación y colocarla sobre el papel filtro. Mantenga la varilla completamente en posición vertical.
9	Calentar y repetir el paso número siete hasta lograr obtener un punto central azul rodeado de una aureola celeste.
10	Registrar la cantidad de Azul de Metileno gastada

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

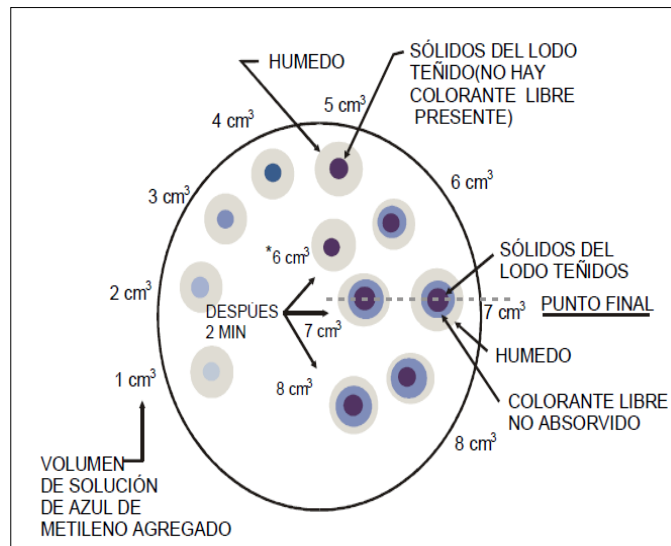


Figura 7.12. Esquema de los pasos 8, 9 y 10 de la prueba de azul de metileno.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Cálculos

CEC (Capacidad de Azul de Metileno) = ml Azul de Metileno (Gastados) por ml de fluido.

MBT (lb/bbl) = 5 x CEC.

7.2.3 PRUEBA DE CONTENIDO DE CLORO

El objetivo de esta prueba radica en determinar a través de un análisis los ppm de cloruros presentes en el fluido, para proceder a introducir los correctivos necesarios y evitar el efecto nocivo de estos contaminantes.

Cristalería a utilizar

Dos pipetas graduadas una de 1 ml y otra de 10 ml, recipiente de valoración 100 - 150 ml preferiblemente blanco, varilla de agitación, 1 vidrio reloj, balanza analítica, 1 espátula, 1 beaker de 150 ml, 2 matraz aforado de 1000 ml.

Reactivos

Nitrato de plata, solución indicadora de cromato de potasio, ácido sulfúrico, agua destilada.

Tabla 7.20. Preparación de solución de nitrato de plata 0.0282.

Paso	Descripción
1	Colocar un volumen entre 50 ml – 100 ml de agua destilada en un matraz aforado de 1 L
2	Extraer 282 ml de nitrato de plata (0.1 N).
3	Situar los 282 ml de nitrato de plata (0.1 N) en el matraz aforado de 1 L con la cantidad de agua destilada establecida en el punto 1.
4	Enrasar con agua destilada hasta la marca del matraz aforado. Finalmente agitar.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7.21. Preparación de 0.02N de ácido sulfúrico.

Paso	Descripción
1	Colocar un volumen entre 50 ml – 100 ml de agua destilada en un matraz aforado de 1L.
2	Utilizar una pipeta graduada de 2 ml para extraer 1.67 ml de ácido sulfúrico.
3	Situar los 1.67 ml de ácido en el matraz aforado de 1 L.
4	Enrasar con agua destilada.

Fuente. Elaboración propia.

7.2.3.1 PROCEDIMIENTO

La Tabla 7.22 muestra el procedimiento experimental a seguir para encontrar la concentración de cloruros.

Tabla 7.22. Procedimiento experimental para el cálculo de contenido de cloruros.

Paso	Descripción
1	Colocar 1 ml de filtrado en un recipiente
2	Agregar 2 – 3 gotas de fenolftaleína
3	Si un color rosado aparece, titular con H ₂ SO ₄ (0.02N) hasta que el color rosado desaparezca.
4	Añadir 25 ml de agua destilada
5	Agregar 5 – 10 gotas de K ₂ CrO ₄
6	Titular con AgNO ₃ hasta que el color amarillo cambie a rojo ladrillo y permanezca por 30 segundos
7	Registrar la cantidad de cloruro por el número de ml de AgNO ₃ gastados. Nota: la agitación debe ser continua.

Fuente: API, API Recommended Practice 13B-1, 2014.

Cálculos: Cl-(mg/l) = ml de nitrato de plata 0.0282N x 1000/ml de filtrado.

7.3 FORMULACIÓN DE LOS BATCH DE FLUIDO DE PERFORACIÓN OBTURANTE A EVALUAR

7.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Las formulaciones evaluadas se conformaron con base en las recomendaciones encontradas en las diversas fuentes bibliográficas referentes al tratamiento de pérdidas de circulación así como también en patentes registradas en Estados Unidos al respecto.

Todas las fuentes coinciden en que *"jamás se debe utilizar un único material puenteante (obturante) para tratar cualquier tipo de pérdida "*, lo anterior se debe a que en la mayoría de los casos no se sabe con exactitud cuál es el tamaño de la fractura por lo que agregar un solo material obturante con un tamaño específico no garantiza que la pérdida sea reparada, al realizar la acción anterior puede ocurrir lo siguiente.

- El diámetro de partícula del LCM (lost circulation material o material puenteante) sea muy pequeño para poder tapan la fractura, en este caso el LCM pasa libremente por la abertura.

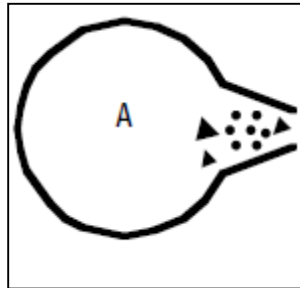


Figura 7.13. Puente formado por materiales obturantes de tamaño inferior al de la fractura.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

- El diámetro de partícula sea capaz de sellar la fractura (lo cual sería fortuito), en esta oportunidad se debe mencionar de que el puente no es del todo eficaz dado que un buen puente siempre debe tener diferentes tamaños de partículas puesto que las de mayor tamaño crean un sello interno de la fractura mientras que las de menor tamaño crean un sello en el exterior del pozo.
- El diámetro de partícula del LCM sea muy grande, en este caso se crea únicamente un sello externo de la fractura la cual es fácil de que se erosione además de ser un puente débil.

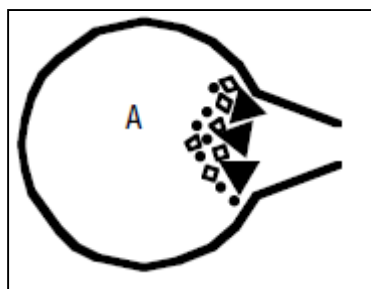


Figura 7.14. Puente formado por materiales obturantes de tamaño superior al tamaño de la fractura.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

En resumen lo correcto es idear fluidos de perforación con una mezcla de diferentes tipos de LCM (fibrosos, laminares, granulares) de diferentes tamaños.

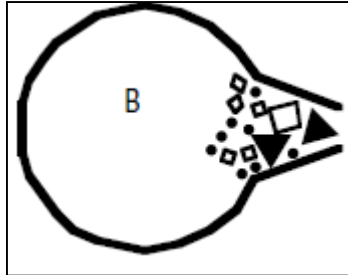


Figura 7.15. Puente formado por una combinación adecuada de materiales obturantes.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

El Manual de Fluidos de Perforación API (2001) presenta las siguientes propuestas de concentraciones de LCM para los diferentes tipos de pérdidas.

Tabla 7.23. Concentración sugerida de materiales obturantes acorde al tipo de pérdida.

Tipo de pérdida	Concentración de mezcla de materiales obturantes según el Manual API
Pérdidas por infiltración (de 0-10 bbl/hora)	10-20 lb/bbl
Pérdidas parciales (10-500 bbl/hora)	15-20 lb/bbl
Pérdidas totales (superiores a 500 bbl)	20-30 lb/bbl

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

Ahora se presenta la interrogante: “*¿Qué combinación de tamaños y materiales obturantes debe llevar el fluido de perforación en función del tipo de pérdida?*”. Si bien es cierto que en la mayoría de los casos no se conoce la abertura de la fractura, se puede intuir que *entre mayor sea la pérdida mayor debe ser el tamaño de la abertura*, es ese sentido los diferentes manuales de fluidos de perforación plantean lo siguiente.

- Materiales fibrosos: utilizados principalmente en pérdidas por infiltración debido a sus tamaños pequeños.

- Materiales laminares: Utilizados en conjunto con materiales fibrosos para los tratamientos de pérdidas parciales cercanas a 10 bbl/hora.
- Materiales granulares: en función de su tamaño se les debe utilizar en pérdidas parciales cercanas a 500 bbl/hora y a pérdidas totales.

Finalmente queda por definir la distribución de tamaños la cual está expresada en la siguiente tabla y tiene como fundamento la teoría del Manual API.

Tabla 7.24. Distribución de materiales para el control de pérdidas de circulación acorde a la severidad de la pérdida.

Tipo de pérdida	Concentración de mezcla de materiales obturantes según el Manual API	Distribución
Pérdidas por infiltración (de 0-10 bbl/hora)	10-20 lb/bbl	1 partes de material laminar o 1 parte de material granular de mediano tamaño 1 parte de material fibroso de mediano a gran tamaño 1 parte de material fibroso de tamaño pequeño
Pérdidas parciales (10-500 bbl/hora)	15-20 lb/bbl	1 partes de material laminar 1 parte de material fibroso de mediano a gran tamaño 1 parte de material fibroso de tamaño pequeño 2 partes de material granular

Tipo de pérdida	Concentración de mezcla de materiales obturantes según el Manual API	Distribución
Pérdidas totales (superiores a 500 bbl)	20-30 lb/bbl	3 a 6 partes de material granular 1 partes de material laminar (preferiblemente celofán). 1 parte de material fibroso de mediano a gran tamaño. 1 parte de material fibroso de tamaño pequeño.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

Sin embargo tal como se mencionó en la sección 5.3.1, actualmente existe una clasificación más detallada de los materiales obturantes. Esta clasificación ya no solo se basa en el aspecto físico de los materiales sino también en sus aspectos químicos tal como lo muestra la Figura 7.16.

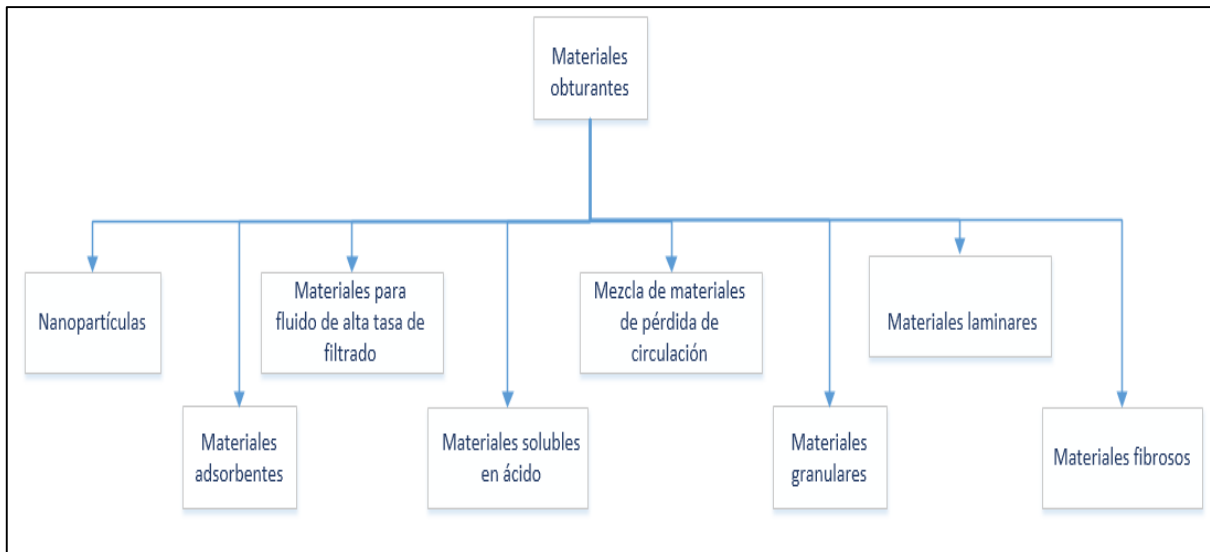


Figura 7.16. Clasificación actualizada de materiales de pérdida de circulación.

Fuente: Elaboración propia

7.3.2 MATERIALES INVOLUCRADOS EN EL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado se presentan tanto los aditivos y materiales obturantes utilizados durante la fase experimental. La selección de materiales obturantes dependió en gran medida de la disponibilidad en inventario de la empresa que apoyó en el desarrollo de la investigación así como también de los materiales requeridos en las patentes encontradas.

Es importante recalcar que los aditivos que se muestran son para fluidos base agua no densificados, es decir:

Bentonita: como viscosificante.

Hidróxido de sodio (NaOH): como regulador de pH.

Carboximetilcelulosa: como controlador de filtrado.

Aceite vegetal: como lubricante.

7.3.2.1 BENTONITA.

La bentonita es “una arcilla compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmécticas, con independencia de su génesis y modo de aparición”. Desde este punto de vista la bentonita es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmécticas sus constituyentes esenciales y las que le confieren sus propiedades características.

Usos en fluidos de perforación

Los minerales arcillosos como la bentonita son utilizados para dar viscosidad, esfuerzos de gel y control de filtrado en fluidos de perforación. En la Tabla 7.25 se presentan las propiedades fisicoquímicas de la bentonita

Tabla 7.25.Propiedades fisicoquímicas de la bentonita.

Propiedad	Descripción
Formula química	SiO ₃ H ₂ O
Composición	<ul style="list-style-type: none">• 92% de montmorillonita.• 3% de cuarzo.• 5% de feldespato.
Humedad máxima	10%
Fuerza de compresión seca	96 psi
Punto de fusión	1600°C-1750°C
Punto de ebullición	Sublima a 1750°C
Solubilidad	<ul style="list-style-type: none">• Soluble en agua fría.• Insoluble en agua caliente.• Soluble en HF.

Fuente. Garcés, 2012.

7.3.2.2 HIDRÓXIDO DE SODIO (NaOH)

El hidróxido de sodio es un sólido blanco e industrialmente se utiliza como disolución al 50 % por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos. Es usado en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre otros usos. Se obtiene, principalmente por electrólisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de calcio y carbonato de sodio y al tratar sodio metálico con vapor de agua a bajas temperaturas(Garcés, 2012).

Usos en fluidos de perforación

Promover la hidratación de la bentonita, regular pH.

En la Figura 7.17se muestra la comparación de la hidratación de la bentonita cálcica y sódica, nótese que la bentonita sódica se expande más, aproximadamente a 40 Å

ocasionando de esa forma que el fluido sea más viscoso en comparación con la bentonita cálcica.

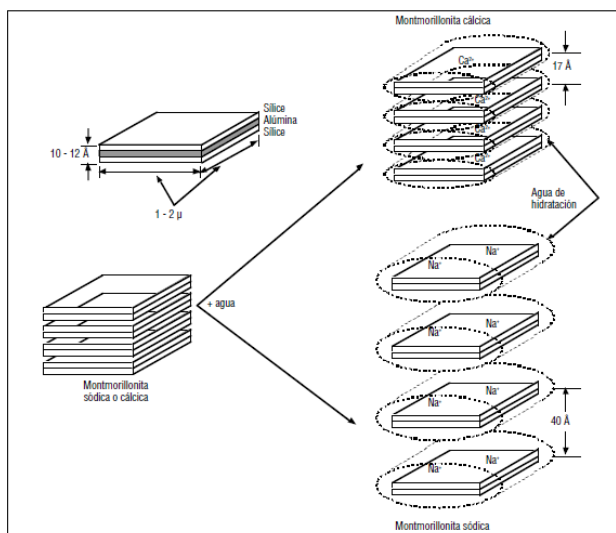


Figura 7.17. Comparación en la hidratación de la montmorillonita cálcica y sódica.

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001.

7.3.2.3 CARBOXIMETILCELULOSA

La carboximetilcelulosa es un polielectrolito que se genera modificando la estructura del anillo de la celulosa introduciendo el grupo carboximetilo aniónico. Obteniendo de esa forma un polímero que tiene afinidad con el agua y es hidrosoluble.

La carboximetilcelulosa se forma mediante la reacción de la sal de sodio del ácido monocloroacético ($\text{ClCH}_2\text{COONa}$) con la celulosa, en cuanto a sus propiedades se puede mencionar que depende de factores tales como:

1. *El grado de sustitución (G.S.):* es el número de sustituciones que ocurren en una sola estructura del anillo de celulosa; a mayor número de G.S. mayor solubilidad.
2. *El grado de polimerización (G.P.):* se refiere al número de veces que se repite la estructura del anillo, cuanto más alto sea el G.P. más alto será el peso molecular, lo mismo ocurre con la viscosidad.
3. *La uniformidad de la sustitución.*
4. *La pureza del producto final.*

En las figuras 7.18 y 7.19 se aprecian la modificación que sufre el anillo de celulosa para formar la carboximetilcelulosa

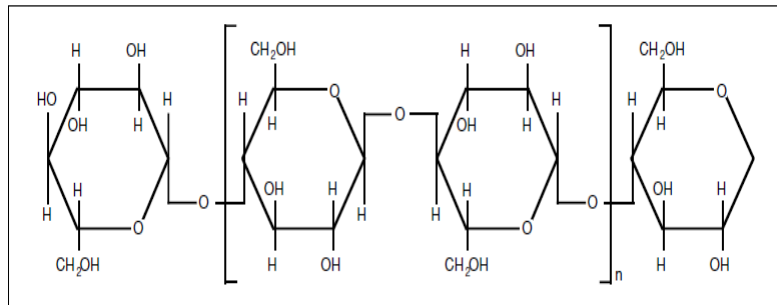


Figura 7.18. Celulosa

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

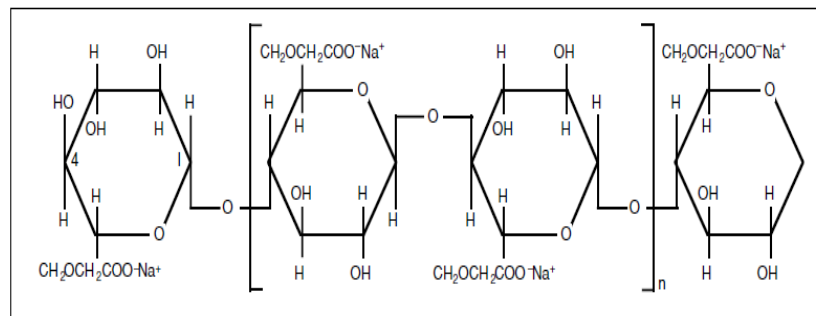


Figura 7.19. Carboximetilcelulosa de Sodio

Fuente: API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001

Nombre comercial: Polypac.

Usos en fluidos de perforación:

1. Control de filtrado.
2. Formación de un revoque duro y fino que ayuda a prevenir el filtrado.

7.3.2.4 ACEITE VEGETAL

Principalmente utilizado en fluidos de perforación base agua para:

1. Mejorar el control de filtrado
2. Disminuir la fricción entre la columna de perforación y las paredes del pozo.
3. Aumentar la lubricidad de las herramientas de perforación.

7.3.2.5 FORM-A-SET

El producto FORM-A-SET constituye una mezcla en sacos de polímeros, agentes entrecruzados y materiales de pérdida de circulación fibrosos, diseñados para taponar zonas tipo matriz, fracturas naturales o zonas fisuradas. Al activarse con el tiempo y la temperatura, el producto FORM-A-SET produce un gel gomoso, dúctil, esponjoso y blando que previene efectivamente la pérdida de fluido en la formación. El material de pérdida de circulación del paquete FORM-A-SET comprende una celulosa fibrosa que contiene una amplia variación de tamaños de partículas.

Clasificación de pérdida de circulación: Mezcla de materiales de pérdida de circulación, inyección de polímero entrecruzado.

Aplicaciones.

El producto FORM-A-SET puede utilizarse:

1. En cualquier aplicación donde un tapón de inyección resulte benéfico y resulta especialmente ventajoso en áreas donde prevalezca la pérdida de lodo.
2. Para detener los flujos de agua y estabilizar las secciones de grava. Igualmente efectivo tanto en pozos verticales como horizontales.
3. Para detener las pérdidas en arenas agotadas y aislar las zonas de agua. Incluso puede eliminar el requerimiento de sarta de revestimiento adicional.

4. En mezclas ya sea con agua dulce, agua de mar o agua salada hasta su saturación. El agua de mar y el cloruro de sodio tienden a retardar el tiempo de fraguado del entrecruzamiento.
5. Para detener las pérdidas que ocurran con cualquier sistema de fluido base agua o base no acuosa.



Figura 7.20. Saco de Form A Set.

Fuente: García & Vásquez, 2013

7.3.2.6 FORM-A-SQUEEZE

La lechada de filtrado elevado/alto contenido de sólidos FORM-A-SQUEEZE constituye una solución efectiva en términos de costos a la pérdida de circulación en todos los tipos de fracturas, formaciones fisuradas, matriz y eventos de reventones subterráneos. Cuando se coloca dentro o por toda la zona de pérdida, la fase líquida se inyecta a presión a partir de la lechada formando y dejando a su paso un tapón sólido. Este proceso puede subsanar las pérdidas instantáneamente, sin depender del tiempo o la temperatura.

Clasificación de material de pérdida de circulación: Material de inyección de alta taza de filtrado.

Aplicaciones.

El tapón de pérdida de circulación (PC) FORM-A-SQUEEZE puede utilizarse para detener pérdidas que ocurren en cualquier fluido base agua y base no acuosa y puede mezclarse

fácilmente en agua dulce, agua de mar o aceite/sintético base. Se diseñó para utilizarse como:

1. Inyección correctiva de pozo abierto y/o inyección preventiva de pérdida de circulación.
2. Tapón para introducir frente de inyecciones de cemento.
3. Tapón para mejorar la integridad de la zapata de cementación de la tubería de revestimiento.
4. Material preventivo de PC para pérdidas por infiltración, hasta 20 lb/bbl en todo el sistema activo.
5. Inyección de pozo revestido para sellar disparos y fugas de tubería de revestimiento.



Figura 7.21. Saco de Form A Squeeze.

Fuente: García & Vásquez, 2013

7.3.2.7 DIAMOND SEAL

Diamond Seal es un polímero sintético capaz de absorber cientos de veces su propio peso en agua, es principalmente utilizado como material de pérdida de circulación en perforación de pozos direccionales.

Clasificación de material de pérdida de circulación: Material hinchable/adsorbente.

Aplicaciones.

1. Como material de pérdida de circulación en perforaciones horizontales o direccionales.
2. Estabilizador de formaciones no consolidadas.
3. Como estabilizador en grava.

Ventajas.

1. Rápida absorción de agua.
2. Efectividad en la mitigación de pérdidas de circulación.
3. Económico (uso de cantidades pequeñas; un máximo de 10 lb/bbl).
4. Fácil de usar.

La Tabla 7.26 expone las propiedades generales del Diamond Seal.

Tabla 7.26. Propiedades del Diamond Seal

Propiedad	Descripción
Apariencia	Cristales blancos
Gravedad específica	0.75
Análisis de tamiz en seco	96% 5 mesh
Capacidad de absorción de agua	3.5 ft ³ /lb

Fuente: Ficha técnica

7.3.2.8 MAGMA FIBER

Magma Fiber es una fibra mineral flexible y compatible tanto en fluidos base aceite, emulsiones y en fluidos base agua. Según el fabricante, la naturaleza intrínseca de esta fibra produce un marco que forma un revoque de baja permeabilidad, lo cual se traduce en una disminución en las pérdidas de circulación.

Clasificación del LCM's: Material fibroso, soluble en ácido.

Aplicaciones: Como material obturante en una concentración entre 5-15 lb/bbl para mitigar pérdidas parciales.

La Tabla 7.27 presenta la composición química del magma fiber.

Tabla 7.27. Composición química del Magma Fiber.

<u>Composición</u>	<u>%peso</u>
SiO ₂	38-42
Al ₂ O ₃	9-12
CaO	30-40
MgO	8-15
Fe ₂ O ₃	0.2
Alcalinidad total como Na ₂ O	1-2
SO ₃	<0.5

Fuente: Ficha técnica.

7.3.2.9 WALL-NUT

Wall-Nut (cáscara de nuez) es un producto que ayuda a combatir la pérdida de circulación tanto en fluidos acuosos como no acuosos, dicho producto viene en 3 diferentes tamaños de partícula, fina, media y gruesa; las cuales pueden ser utilizadas acorde a la gravedad de la pérdida.

Clasificación del LCM's: Material granular.

Aplicaciones.

1. Promueve la mitigación de las pérdidas de circulación.
2. Ayuda a remover las arcillas pegajosas ubicadas en el fondo del pozo.

Ventajas.

1. Compatibilidad con otros materiales obturantes.
2. El tamaño de la partícula puede ser escogido acorde a la gravedad de la pérdida.

Tratamiento recomendado según proveedor: 10-40 lb/bbl.

7.3.1.9 MICA

La mica es un mineral seleccionado no abrasivo, disponible en grado fino y grueso. La mica no ejerce ningún efecto adverso en las propiedades del lodo.

Clasificación del LCM's: Material laminar.

Aplicaciones.

1. Se utiliza para evitar y recuperar las pérdidas de circulación.
2. También se utiliza como estabilizador de formaciones no consolidadas

Tratamiento recomendado según proveedor: 5-15 lb/bbl.

7.3.1.10 OTROS MATERIALES OBTURANTES

En la tabla 7.28 se presenta una lista de materiales obturantes que carecen de una ficha técnica para ser descritos de una manera más precisa:

Tabla 7.28. Otros materiales obturantes.

Material	Clasificación
Granza de arroz	Fibroso
Cascarilla de café	Fibroso

Material	Clasificación
Celofán	Laminar
Grafito	Granular

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3 LODOS PROPUESTOS

Con base en todo lo anterior en relación a pérdidas de circulación y los materiales investigados para su tratamiento, se procedió a formular diez lodos con diferentes LCM's (ver tabla 7.29), para posteriormente evaluar las propiedades físicas y químicas de los mismos. La descripción de los lodos y la proporción en la cual fueron añadidos se muestran en las secciones 7.3.2.1 a 7.3.2.10.

Tabla 7.29. Resumen de lodos propuestos

No	Descripción del lodo
1	Materiales obturantes involucrados: magma fiber fino, celofán y magma fiber grueso, proporción 1:1:1.
2	Materiales obturantes involucrados: granza de arroz, magma fiber grueso, cascara de nuez (nut plug™) proporción 1:1:1
3	Materiales obturantes involucrados: granza de arroz, magma fiber grueso, celofán y cascara de nuez (nut plug™) proporción 1:1:1:2.
4	Materiales obturantes involucrados: únicamente mica fina
5	Materiales obturantes involucrados: cascarilla de café, magma fiber grueso, celofán y mica proporción 1:1:1:4.
6	. Materiales obturantes y aditivos involucrados: granza de arroz, cascara de nuez, carbón fino, carboximetilcelulosa, aceite vegetal. Tomado de patente eua no. 5, 599,776 (1998.)
7	Materiales obturantes involucrados: form a set
8	Lodo de alta tasa de filtrado. Materiales obturantes involucrados form a squeeze.
9	Materiales obturantes involucrados: diamond seal ®.
10	Materiales obturantes involucrados: diamond seal, carbón.

Fuente. Elaboración propia.

7.3.3.1 LODO 1. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: MAGMA FIBER FINO, CELOFÁN Y MAGMA FIBER GRUESO, PROPORCIÓN 1:1:1.

Lodo 1

Lodo base (Vásquez,2013)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 315.79 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (50-70 seg/qt).
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución	<p>1 partes de material celofán (laminar)</p> <p>1 parte de magma fiber de tamaño fino (Material de pérdida soluble en ácido)</p> <p>1 parte de magma fiber (Material de pérdida soluble en ácido)</p>
---------------------	--

Concentración máxima de LCM permitida según el Manual API 20 lb/bbl o 57 g/l

Formulación

Se utiliza 500ml de lodo base, posteriormente se agregan los materiales obturantes conforme a la tabla 7.30.

Tabla 7.30. Formulación para el lodo 1

Punto	Concentración de magma fiber fino (lb/bbl)	Concentración de magma fiber grueso (lb/bbl)	Concentración de celofán (lb/bbl)	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)
1	0.67	0.67	0.67	2
2	1.33	1.33	1.33	4
3	2.00	2.00	2.00	6
4	2.67	2.67	2.67	8
5	3.33	3.33	3.33	10
6	4.00	4.00	4.00	12
7	4.67	4.67	4.67	14
8	5.33	5.33	5.33	16
9	6.00	6.00	6.00	18
10	6.67	6.67	6.67	20

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2.2 LODO 2. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, MAGMA FIBER GRUESO, CASCARA DE NUEZ (NUT PLUG™) PROPORCIÓN 1:1:1

Lodo 2

Lodo base (Vásquez,2013)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 315.79 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (50-70 seg/qt).
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

1 partes de granza de arroz (fibroso fino)
 1 parte de magma Fiber de tamaño grueso (Material de pérdida soluble en ácido)
 1 parte de cascara de nuez gruesa (fibroso)

Concentración máxima de

LCM permitida según el 20 lb/bbl o 57 g/l

Manual API

Formulación

Tabla 7.31. Formulación para el lodo 2

Punto	Concentración de granza de arroz		Concentración de Maga Fiber grueso		Concentración de cáscara de nuez		Concentración total de materiales puenteantes
	(lb/bbl)	g/500ml	lb/bbl	g/500ml	lb/bbl	g/500ml	lb/bbl
1	0.67	0.95	0.67	0.95	0.67	0.95	2
2	1.33	1.90	1.33	1.90	1.33	1.90	4
3	2.00	2.85	2.00	2.85	2.00	2.85	6
4	2.67	3.80	2.67	3.80	2.67	3.80	8
5	3.33	4.76	3.33	4.76	3.33	4.76	10
6	4.00	5.71	4.00	5.71	4.00	5.71	12
7	4.67	6.66	4.67	6.66	4.67	6.66	14
8	5.33	7.61	5.33	7.61	5.33	7.61	16
9	6.00	8.56	6.00	8.56	6.00	8.56	18
10	6.67	9.51	6.67	9.51	6.67	9.51	20

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.3 LODO 3. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, MAGMA FIBER GRUESO, CELOFÁN Y CASCARA DE NUEZ (NUT PLUG™) PROPORCIÓN 1:1:1:2.

Lodo 3

Lodo base (Vásquez,2013)

1.La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 315.79 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.

2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (50-70 seg/qt)

3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

- 1 partes de granza de arroz (fibroso fino)
 - 1 parte de magma fiber de tamaño grueso (fibroso)
 - 1 parte de celofán (laminar)
 - 2 parte de cascara de nuez gruesa (grueso)
-

Concentración máxima de LCM permitida según el Manual API 20 lb/bbl o 57 g/l

Formulación

Tabla 7.32. Formulación para el lodo 3

Punto	Concentración de granza de arroz		Concentración de magma fiber grueso		Concentración de Celofán		Concentración de cáscara de nuez		Concentración total de materiales puenteantes
	(lb/bbl)	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl
1	0.40	0.57	0.40	0.57	0.40	0.57	0.80	1.14	2.00
2	0.80	1.14	0.80	1.14	0.80	1.14	1.60	2.28	4.00
3	1.20	1.71	1.20	1.71	1.20	1.71	2.40	3.42	6.00
4	1.60	2.28	1.60	2.28	1.60	2.28	3.20	4.57	8.00
5	2.00	2.85	2.00	2.85	2.00	2.85	4.00	5.71	10.00
6	2.40	3.42	2.40	3.42	2.40	3.42	4.80	6.85	12.00
7	2.80	3.99	2.80	3.99	2.80	3.99	5.60	7.99	14.00
8	3.20	4.57	3.20	4.57	3.20	4.57	6.40	9.13	16.00
9	3.60	5.14	3.60	5.14	3.60	5.14	7.20	10.27	18.00
10	4.00	5.71	4.00	5.71	4.00	5.71	8.00	11.41	20.00

Fuente: Elaboración propia.

**7.3.3.4 LODO 4. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS:
ÚNICAMENTE MICA FINA**

Lodo 4

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación

2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt), en perforación direccional la viscosidad de embudo es menor debido a que el equipo direccional tiene sensores especiales que no solo se mantienen a través del uso de un lodo poco viscoso, sino también utilizando una granulometría fina

3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

Mica, único material para esta fase (material laminar fino)

Concentración máxima de

LCM permitida según el 20 lb/bbl o 57 g/l

Manual API

Formulación

Tabla 7.33. Formulación para el lodo 4

Punto	Concentración de mica g/500ml	Concentración total de sólidos (lb/bbl)
0	0	0
1	2.85	2.00
2	5.71	4.00
3	8.56	6.00
4	11.41	8.00
5	14.26	10.00
6	17.12	12.00
7	19.97	14.00
8	22.82	16.00
9	25.68	18.00
10	28.53	20.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.5 LODO 5. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: CASCARILLA DE CAFÉ, MAGMA FIBER GRUESO, CELOFÁN Y MICA PROPORCIÓN 1:1:1:4.

Lodo 5

Lodo base (Vásquez,2013)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 351.42 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 6 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (60-70 seg/qt),
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

- 1 partes de cascarilla de café (fibroso de tamaño medio)
 - 1 parte de magma fiber de tamaño grueso (fibroso)
 - 1 parte de celofán (laminar) 4 partes de mica (laminar fino)
-

Concentración máxima de

LCM permitida según el 30 lb/bbl

Manual API

Formulación

Tabla 7.34.Formulación para el lodo 5

Punto	Concentración de Magma Fiber grueso		Concentración de cascara de café		Concentración de celofán		Concentración de Mica		Concentración total de sólidos (lb/bbl)
	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	lb/bbl	g/500 ml	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.43	0.61	0.43	0.61	0.43	0.61	1.71	2.45	3.00
2	0.86	1.22	0.86	1.22	0.86	1.22	3.43	4.89	6.00
3	1.29	1.83	1.29	1.83	1.29	1.83	5.14	7.34	9.00
4	1.71	2.45	1.71	2.45	1.71	2.45	6.86	9.78	12.00
5	2.14	3.06	2.14	3.06	2.14	3.06	8.57	12.23	15.00
6	2.57	3.67	2.57	3.67	2.57	3.67	10.29	14.67	18.00
7	3.00	4.28	3.00	4.28	3.00	4.28	12.00	17.12	21.00
8	3.43	4.89	3.43	4.89	3.43	4.89	13.71	19.56	24.00
9	3.86	5.50	3.86	5.50	3.86	5.50	15.43	22.01	27.00
10	4.29	6.11	4.29	6.11	4.29	6.11	17.14	24.45	30.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.6 LODO 6. MATERIALES OBTURANTES Y ADITIVOS INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, CASCARA DE NUEZ, CARBÓN FINO, CARBOXIMETILCELULOSA, ACEITE VEGETAL. TOMADO DE PATENTE EUA NO. 5, 599,776 (1998.)

Lodo 6

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt)
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Tabla 7.35. Distribución de aditivos para lodo 6.

Distribución

Aditivo	% en peso con respecto a la cantidad total de aditivos
Granza de arroz	82.8
Cascara de nuez	11.6
Carbón	3.8
Carboximetilcelulosa	0.4
Aceite vegetal	1.5

Fuente: Elaboración propia.

**Concentración máxima de LCM
permitida según el Manual API**

20 lb/bbl

Formulación

Tabla 7.36.Formulación para lodo 6

Punto	Concentración de granza de arroz		Concentración de cascara de nuez		Concentración de grafito		Concentración de carboximetilcelulosa		Concentración de aceite vegetal		Concentración total de sólidos (lb/bbl)
	lb/bbl	g/L	lb/bbl	g/L	lb/bbl	g/L	lb/bbl	g/L	lb/bbl	g/L	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
1	1.66	4.72	0.23	0.66	0.076	0.22	0.01	0.02	0.03	0.09	2.00
2	3.31	9.45	0.46	1.32	0.152	0.43	0.02	0.05	0.06	0.17	4.00
3	4.97	14.17	0.70	1.99	0.228	0.65	0.02	0.07	0.09	0.26	6.00
4	6.62	18.90	0.93	2.65	0.304	0.87	0.03	0.09	0.12	0.34	8.00
5	8.28	23.62	1.16	3.31	0.38	1.08	0.04	0.11	0.15	0.43	10.00
6	9.94	28.35	1.39	3.97	0.456	1.30	0.05	0.14	0.18	0.51	12.00
7	11.59	33.07	1.62	4.63	0.532	1.52	0.06	0.16	0.21	0.60	14.00
8	13.25	37.79	1.86	5.29	0.608	1.73	0.06	0.18	0.24	0.68	16.00
9	14.90	42.52	2.09	5.96	0.684	1.95	0.07	0.21	0.27	0.77	18.00
10	16.56	47.24	2.32	6.62	0.76	2.17	0.08	0.23	0.30	0.86	20.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.7 LODO 7. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: FORM A SET

Lodo 7

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt)
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

El único material a utilizar es el Form A Set.

Concentración máxima de LCM permitida según el Proveedor.

20 lb/bbl

Formulación

Tabla 7.37. Formulación para lodo 7

Punto	Concentración de FORM-A SET lb/bbl	Concentración DE FORM-A SET g/500ml	Concentración de FORM-A SET (lb/bbl)
0	0	0	0
1	2.00	2.85	2.00
2	4.00	5.71	4.00
3	6.00	8.56	6.00
4	8.00	11.41	8.00
5	10.00	14.26	10.00
6	12.00	17.12	12.00
7	14.00	19.97	14.00
8	16.00	22.82	16.00
9	18.00	25.68	18.00
10	20.00	28.53	20.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.8 LODO 8. LODO DE ALTA TAZA DE FILTRADO. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS FORM A SQUEEZE.

Lodo 8

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt).
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

El único material a utilizar es el Form A Squeeze.

Concentración máxima de LCM permitida según el Proveedor.

20 lb/bbl

Formulación

Tabla 7.38. Formulación para lodo 8

Punto	Concentración de FORM-A SQUEEZE lb/bbl	Concentración DE FORM-A SQUEEZE g/500ml	Concentración de FORM-A SQUEEZE (lb/bbl)
0	0	0	0
1	2.00	2.85	2.00
2	4.00	5.71	4.00
3	6.00	8.56	6.00
4	8.00	11.41	8.00
5	10.00	14.26	10.00
6	12.00	17.12	12.00
7	14.00	19.97	14.00
8	16.00	22.82	16.00
9	18.00	25.68	18.00
10	20.00	28.53	20.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.9 LODO 9. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: DIAMOND SEAL ®.

Lodo 9

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt)
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

El único material a utilizar es el Diamond Seal ®

Concentración máxima de LCM permitida según el Proveedor.

10 lb/bbl

Formulación

Tabla 7.39. Formulación para lodo 9

Punto	Concentración de Diamond Seal @lb/bbl	Concentración DE Diamond Seal @ g/l	Concentración de materiales obturantes (lb/bbl)
0	0	0	0
1	1.00	2.85	1.00
2	2.00	5.71	2.00
3	3.00	8.56	3.00
4	4.00	11.41	4.00
5	5.00	14.26	5.00
6	6.00	17.12	6.00
7	7.00	19.97	7.00
8	8.00	22.82	8.00
9	9.00	25.68	9.00
10	10.00	28.53	10.00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3.10 LODO 10. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: DIAMOND SEAL, CARBÓN.

Lodo 10

Lodo base (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

1. La muestra se prepara en un recipiente con 6000 ml de agua y 302.52 g de bentonita, dicha relación se mezcla con una batidora casera hasta alcanzar un fluido homogéneo, después se le agrega 4 g de soda cáustica para mejorar su hidratación.
2. Después de mezclar la muestra aproximadamente por 10 min se procede a realizar la prueba de viscosidad con el cono de Marsh hasta lograr un resultado dentro de los parámetros establecidos (40-50 seg/qt)
3. Si no se alcanza la viscosidad deseada se podrá colocar 1 g más de soda cáustica a la muestra hasta alcanzar la viscosidad probándose siempre en el cono de Marsh y así el lodo bentonítico estará listo para ser sometido a mezclas con aditivos sintéticos o biodegradables.

Descripción del lodo

Distribución

Diamond Seal ® y carbón

Concentración máxima de LCM

20 lb/bbl

Formulación

Tabla 7.40. Formulación para lodo 10

Punto	Concentración de CARBÓN		Concentración de DIAMOND SEAL		Concentración total de sólidos
	lb/bbl	g/l	lb/bbl	g/l	lb/bbl
0	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
1	20.0	57.06	0.0	0.00	20.0
2	10.0	28.53	10.0	28.53	20.0
3	5.0	14.26	10.0	28.53	15.0
4	5.0	14.26	8.0	22.82	13.0
5	0.0	0.00	10.0	28.53	10.0

Fuente: Elaboración propia.

7.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE FORMULACIONES DE BATCH DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN OBTURANTE

Las formulaciones de batch propuestas presentadas en la sección 7.3.3, fueron evaluadas mediante una metodología multicriterial, con el objetivo de identificar las formulaciones con mayor potencial de uso como tratamiento para pérdidas de circulación en las operaciones de perforación de pozos geotérmicos. Es importante recalcar que los resultados obtenidos son válidos en condiciones de laboratorio, la valoración del rendimiento in situ de las formulaciones excede los límites de la investigación.

Las formulaciones fueron sometidas a diferentes evaluaciones con el objeto de proponer la valoración del rendimiento in situ (futuras investigaciones) de aquellas que cumplieran con criterios de decisión de relevancia, en ese sentido la metodología para la elección de los lodos se realizó en función de los siguientes factores:

1. Análisis técnico-operativo.
2. Análisis económico.
3. Análisis ambiental.

7.4.1 ANALISIS TECNICO OPERATIVO.

Tuvo por objeto identificar las formulaciones que cumplieran de mejor manera con las siguientes características:

1. Que no fuera excesivamente viscoso.
2. Que no formara geles progresivos ni instantáneos.
3. Que formara revoques firmes y con espesores pequeños.
4. Que fueran capaces de producir reducciones de cantidad de filtrado alta.

Para analizar este compendio de características se hizo uso del método de los factores ponderados; los criterios de decisión con su respectiva ponderación quedan detallados en la Tabla 7.41

Tabla 7.41. Criterios de decisión para el análisis técnico-operativo.

Criterio de decisión.	Peso relativo² %	Rangos en base a norma API-13B-1
VP (viscosidad plástica, cp)	8%	En función de la densidad del fluido (ver figura 7.4)
τ_y (Punto cedente real ,lb/100 ft ²)	8%	En función de la densidad del fluido (ver figura 7.3)
n (Índice de ley exponencial)	2.50%	Lo más cercano a cero posible.
k (índice de consistencia)	2.50%	Que sea mayor a cero

² El peso relativo de cada criterio de decisión es de acorde a su impacto en la operatividad de la perforación de pozos geotérmicos con base a lo encontrado en las diferentes fuentes y comunicación personal con profesionales relacionados con el tema (ingenieros de lodos).

Criterio de decisión.	Peso relativo² %	Rangos en base a norma API-13B-1
Esfuerzo de gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	10%	5-10 lb/100 ft ² .
Esfuerzo de gel a 10 min (lb/100 ft ²)	20%	10-20 lb/100 ft ²
% de reducción del filtrado	40%	Que presente porcentajes de reducción de filtrado altas.
Espesor de revoque	9%	<3.0 mm
Total		100%

Fuente. Elaboración propia.

7.4.2 ANÁLISIS ECONOMICO

Este análisis estuvo sujeto al costo que implica producir 10 m³ de cada uno de los lodos tomando en cuenta: la cantidad de bentonita, aditivos y por supuesto material obturante presentes en el mismo.

Los costos unitarios de todos los materiales utilizados para las formulaciones propuestas están descritos en la Tabla 7.42

Tabla 7.42. Cuadro de costos unitarios de los materiales utilizados.

Materiales	Costo (\$)/kg³
Bentonita	0.35
Soda Caustica	0.72
Polypac	5.43
Aceite vegetal	1.00
Form-A-Set	14.07
Form-A-Squeeze	9.17
Diamond Seal	37.43
Magma Fiber	2.09
Wall-Nut	0.92
Mica	0.33
Granza de arroz	0.07
Cascarilla de café	0.02
Celofán	7.51
Carbón/grafito	2.43
Cal	0.39

Fuente: Elaboración propia.

³Por motivos de confidencialidad no se puede revelar el precio real de los aditivos, por lo que para efectos de cálculos se toma una base de \$1/kg para el aceite vegetal; los precios de los demás componentes estarán en función de la proporción del costo de éstos con relación al precio asumido para el aceite vegetal.

Una vez obtenidos los costos de las formulaciones se procede a asignarles una calificación que podría variar desde 1 a 10, siendo 1 para el más costoso hasta 10 para el más barato.

7.4.3 ANALISIS AMBIENTAL⁴.

Tuvo como fundamente la clasificación sustancias químicas de La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas ECHA, la cual clasifica las sustancias químicas según el riesgo que su uso y manejo representa para el ser humano y el medio ambiente. En la Tabla 7.43 se presenta dicha clasificación y la ponderación asignada según a ella.

Tabla 7.43. Ponderación por nivel de clasificación de sustancias químicas.

Nivel de clasificación	Ponderación
Material o sustancia química de no importancia	10
Material o sustancia química de importancia	8
Material o sustancia química de alta importancia	5

Fuente: Elaboración propia.

7.4.4 ELECCION DE LODOS.

La elección de los lodos se realizó con base en las 3 evaluaciones anteriores, para ello se hizo uso nuevamente del método de los factores ponderados. La ponderación de importancia de cada uno de estos análisis queda plasmada en la Tabla 7.44

Tabla 7.44. Criterios de decisión para elección de un lodo.

Criterio de decisión.	Peso relativo ⁵ %
Técnico-operativo	70%
Económico	20%
Ambiental	10%
Total	100%

Fuente: Elaboración propia

⁴ La fundamentación de la metodología ambiental se presenta de manera completa en el Anexo 1

⁵ El peso relativo de cada criterio de decisión es de acorde a su impacto en la operatividad de la perforación de pozos geotérmicos con base a lo encontrado en las diferentes fuentes y comunicación personal con profesionales relacionados con el tema (ingenieros de lodos).

8 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

En el presente capítulo se hace una presentación de los resultados obtenidos en las pruebas físico-químicas realizadas a los lodos propuestos en el Capítulo 7.3 con el propósito de efectuar la elección de una concentración en específico por cada lodo.

8.1 LODO 1. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: MAGMA FIBER FINO, CELOFÁN Y MAGMA FIBER GRUESO, PROPORCIÓN 1:1:1

8.1.1 REOLOGÍA LODO 1

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 1, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1.Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 1

Lodo 1		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	25	18	14	10	5	5
1	2	28	21	17	13	8	8
2	4	30	23	19	15	10	10
3	6	32	25	21	17	12	12
4	8	36	29	25	20	15	15
5	10	40	33	29	25	20	20
6	12	47	40	36	32	27	27
7	14	55	48	44	40	35	35
8	16	65	57	53	48	43	43
9	18	72	66	62	58	53	53
10	20	84	77	73	68	63	63

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 2 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl.

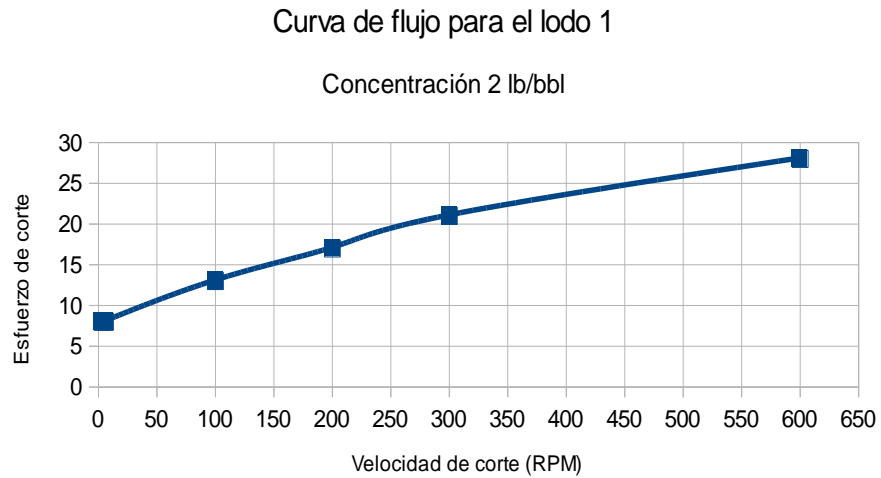


Gráfico 8.1. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.

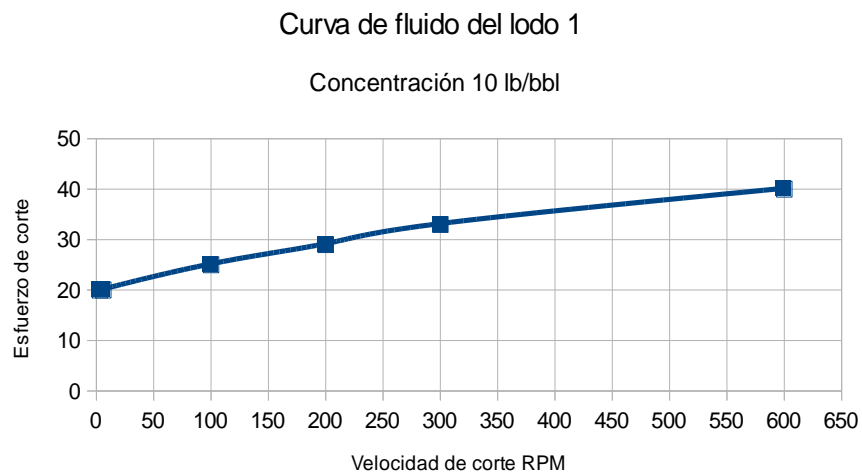


Gráfico 8.2. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes

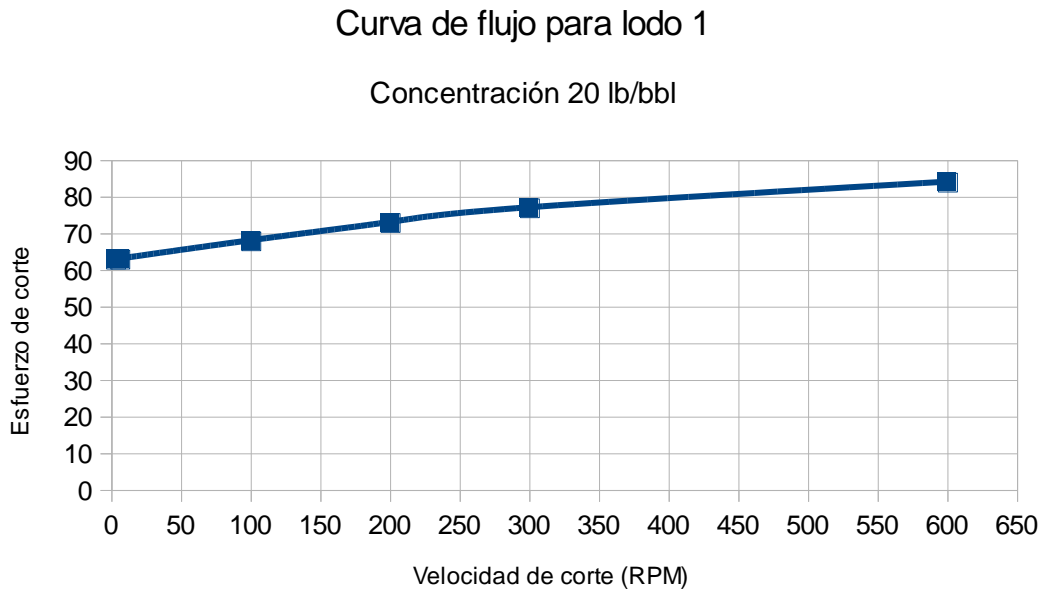


Gráfico 8.3. Curva de flujo para el lodo 1 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 1 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Es de importancia mencionar que el punto cedente (YP) es sustituido por el parámetro de viscosidad a baja velocidad de corte (LSRV) también conocido como punto cedente real, esto es debido a que el punto cedente matemáticamente representa el intercepto de una línea recta (Modelo plástico de Bingham) con el eje de esfuerzo de corte, sin embargo los gráficos que se generaron no son representados por una línea recta sobretodo en la zona de flujo de tapón (Esfuerzos de corte correspondientes a velocidades de corte bajas).

Aunque resulta interesante observar que a medida que la concentración de materiales obturantes aumenta, el comportamiento del lodo en la zona de *flujo de tapón* se va linealizando.

Con el objeto de representar matemáticamente lo anterior se hace uso de 2 parámetros:

- *Parámetro de comportamiento reológico “R”: Se define como la relación del punto cedente de Bingham con la viscosidad a baja velocidad de corte. Para un fluido plástico de Bingham; $R=1$.*
- *Índice de ley exponencial “n”: Exponente al cual está elevado la ecuación del modelo de Herschel-Bulkley. Para un fluido plástico de Bingham; $n=1$*

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real (viscosidad a baja velocidad de corte), índice de consistencia, esfuerzo de gel.

Tabla 8.2. Propiedades reológicas para el lodo 1.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp.)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft²)	Punto cedente real τ_y(lb/100 ft²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Exponente n	Gel 10 s	Gel 10 min
0	0	7	11	3.99	0.362	0.328	0.621	5	10
1	2	7	14	9.42	0.673	0.358	0.621	6	10
2	4	7	16	11.60	0.725	0.369	0.621	7	13
3	6	7	18	14.46	0.804	0.523	0.585	8	25
4	8	7	22	20.19	0.918	0.417	0.621	9	27
5	10	7	26	27.66	1.064	0.460	0.621	10	35
6	12	7	33	27.66	0.838	0.460	0.621	10	35
7	14	7	41	36.19	0.883	0.509	0.621	12	37
8	16	8	49	44.74	0.913	0.472	0.652	15	45
9	18	6	60	54.94	0.916	1.042	0.547	20	55
10	20	7	70	65.70	0.939	0.909	0.585	25	68

A continuación se procede a realizar los gráficos de variación de viscosidad plástica, viscosidad a baja velocidad de corte, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n , K) en función de la concentración de materiales obturantes.

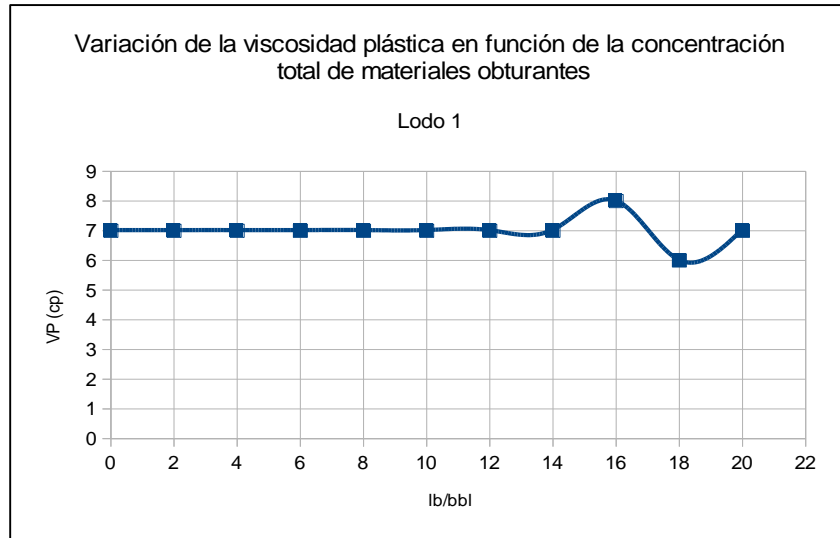


Gráfico 8.4. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.

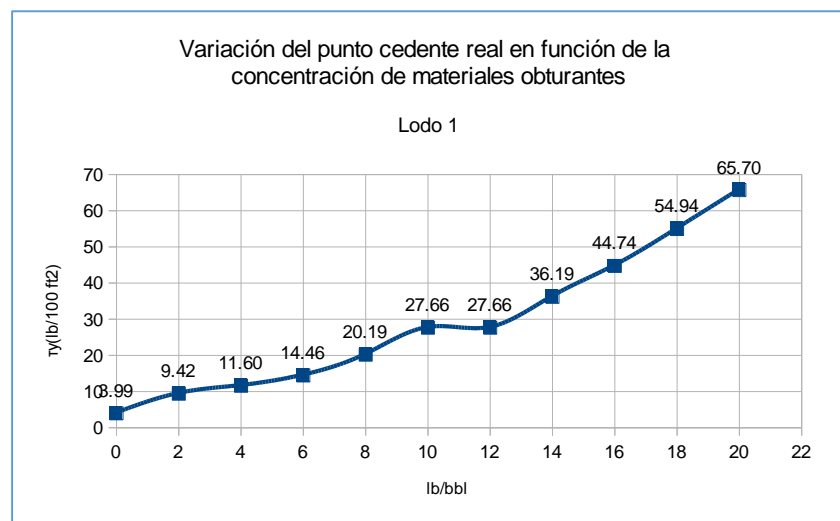


Gráfico 8.5. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.

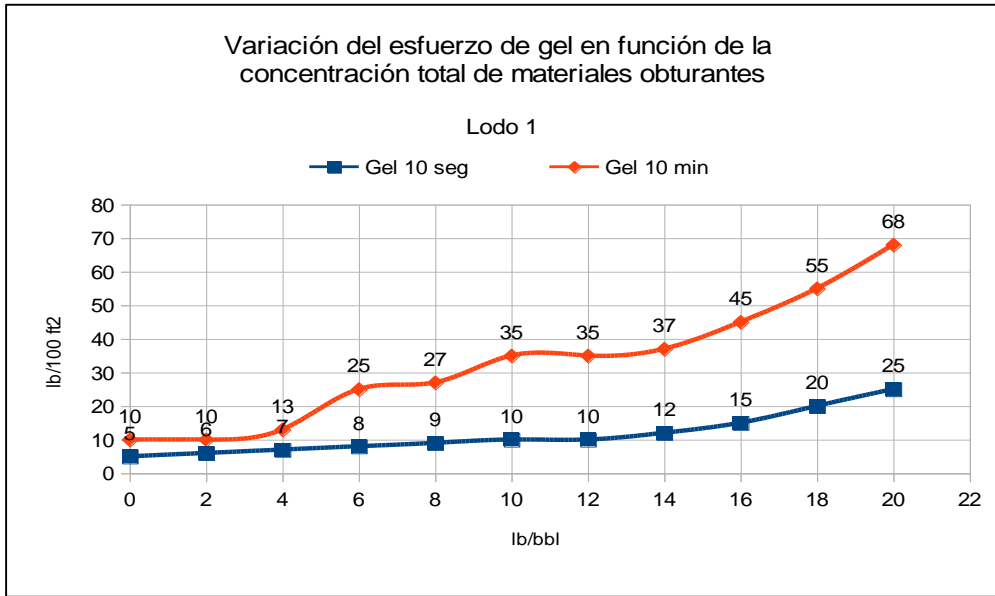


Gráfico 8.6. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 1.

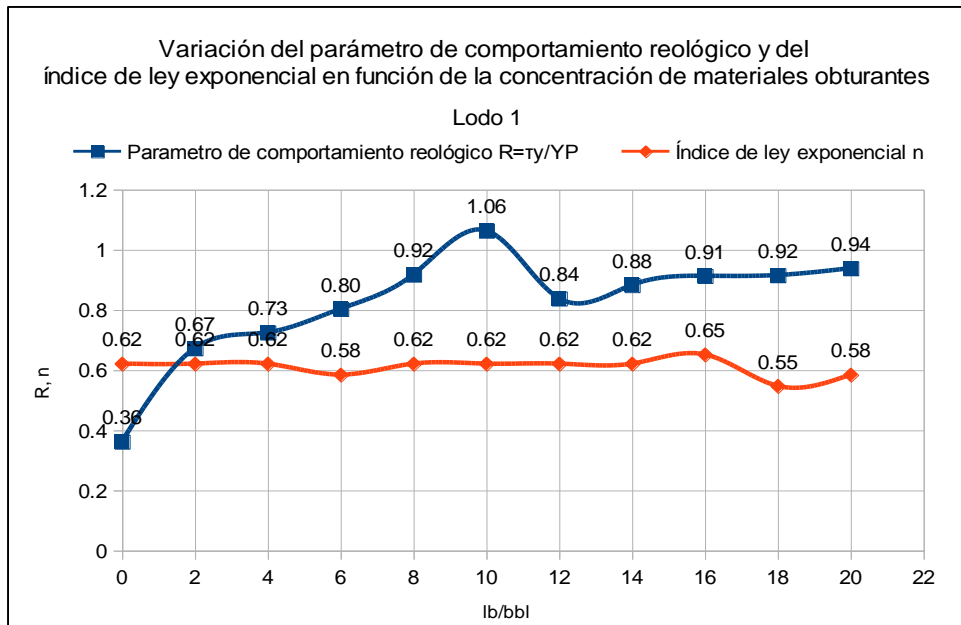


Gráfico 8.7. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 1

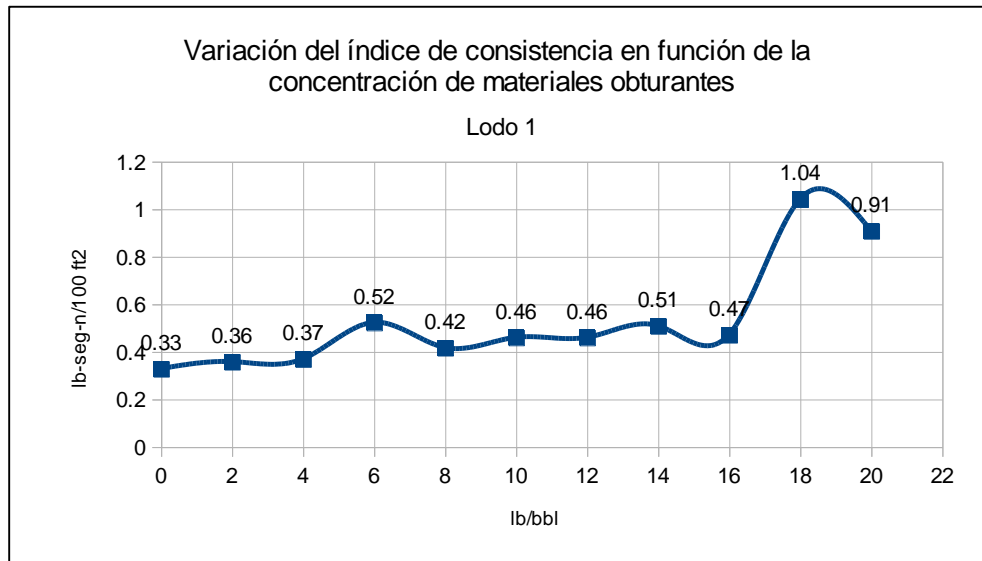


Gráfico 8.8. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo1.

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.4 y Gráfico 8.5):

1. El Gráfico 8.4 demuestra que los materiales obturantes y agentes químicos presentes en el lodo 1 no ejercen una acción viscosificante sobre el fluido de perforación, esto se refleja en el hecho de que los datos de viscosidad plástica no muestran una significativa variación a lo largo del rango de concentración de LCM'S, los valores no sobrepasan a los recomendados para este parámetro.
2. En cuanto al punto cedente real (Gráfico 8.5) se concluye que los datos generados hasta una concentración de 12 lb/bbl están dentro de los rangos establecidos en la Figura 7.3 tomando en cuenta el peso del lodo 1 medido, que fue de 8.5 lb/gal.

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.6):

1. A concentraciones menores de 12 lb/bbl, los LCM's presentes en el lodo 1 no producen un esfuerzo de gel instantáneo considerable, puesto que los valores de esfuerzo de gel a 10 seg no varían apreciablemente con respecto a la medición del

dial a 3RPM. Para concentraciones mayores de 12 lb/bbl el esfuerzo de gel instantáneo es notable sin embargo la fuerza necesaria para reanudar la circulación es aceptable.

2. La diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es notable a partir 10 lb/bbl de concentración de LCM's, esto indica que a partir de esta concentración el esfuerzo de gel no es plano. Esta característica no es deseable en un lodo ya que aumenta las probabilidades de problemas de retorno de lodo cuando se reanuda operaciones después de un paro.

Conclusiones referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.7 y Gráfico 8.8):

1. El demuestra que el comportamiento reológico general del lodo 1 se asemeja a un fluido pseudoplástico representado por el índice de ley exponencial, el cual es menor a uno en el intervalo de concertación de LCM, lo anterior se refuerza con el parámetro de comportamiento reológico R cuyos valores (en la mayoría de las concentraciones) están por debajo de la unidad indicando que el punto cedente real es menor al punto cedente de Bingham.
2. Para el caso del lodo 1, la adición de LCM's no influyó sustancialmente en la propiedad de limpieza de pozo ya que los valores de k y n no reflejaron mayor cambio por la adición de los mismos. La concentración donde el valor de n sea el mínimo y el valor de k el máximo es la concentración donde el lodo presenta la mejor limpieza de pozo, en este caso es la concentración de 18 lb/bbl.

8.1.2 FILTRADO LODO 1

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 1 los resultados se presentan en la tabla 8.3:

Tabla 8.3. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 1

Lodo 1					Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de celofán g/L	Concentración de magma fiber fino g/L	Concentración de magma fiber grueso g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque	% Reducción del filtrado
0	0.00	0.00	0.00	0	17.60	1.00	0.0
2	3.80	3.80	3.80	4	16.80	1.20	4.55
4	7.61	7.61	7.61	8	16.80	1.30	9.09
6	11.41	11.41	11.41	12	16.00	1.40	9.09
8	15.22	15.22	15.22	16	16.00	1.50	9.09
10	19.02	19.02	19.02	20	16.00	1.55	9.09

A continuación se presentan los gráficos de la variación del filtrado y revoque en función de la concentración de materiales obturantes.

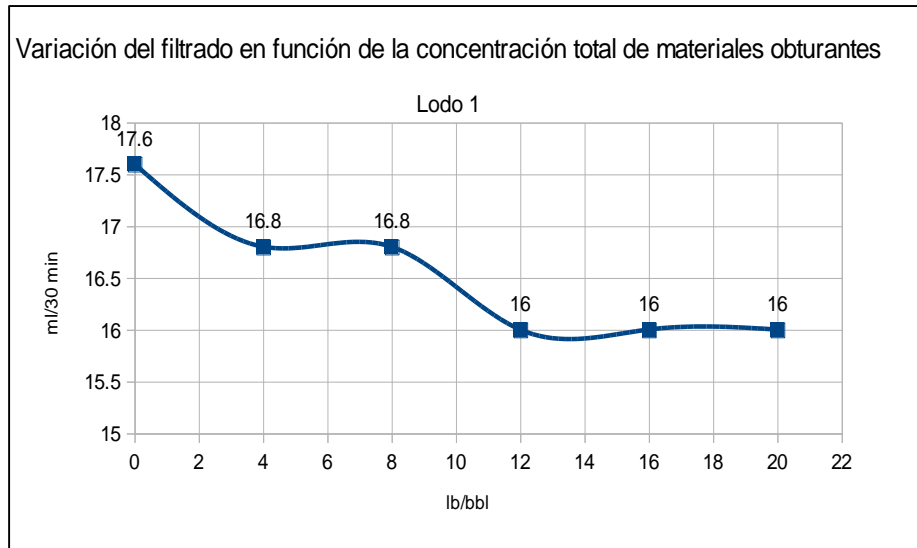


Gráfico 8.9. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 1.

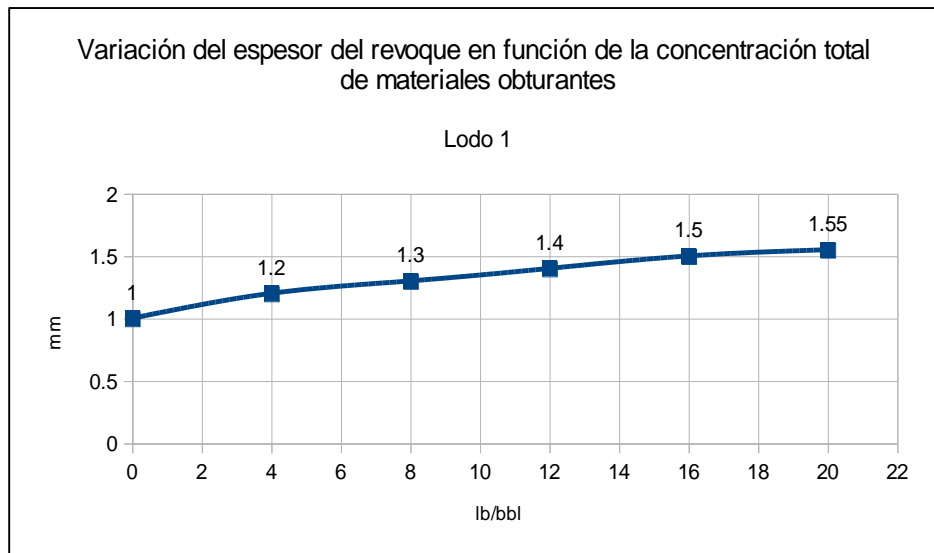


Gráfico 8.10. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 1.

De acuerdo a la Tabla 8.3 y al Gráfico 8.9 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a la concentración de 12 lb/bbl con una reducción de un 9.09% (nótese que el filtrado no varía desde esa concentración), el porcentaje reducción de filtrado no es satisfactoria para ser utilizada en pérdidas parciales superiores a 10 bbl/hr, sin embargo se puede utilizar en pérdidas menores debido a la distribución del tamaño de partículas (tamaño pequeño).

El Gráfico 8.10 muestra la variación del espesor del revoque, el cual no sobrepasa el límite planteado en el capítulo 7 que es de 3 mm, además cabe mencionar que los revoques obtenidos en este lodo no resultaron firmes y con un espesor pequeño. La mayoría de manuales recomiendan que el revoque tenga consistencia firme (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

Tabla 8.4. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 1

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	No hay restricciones, la viscosidad plástica obtenida en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4.
Punto cedente real	A partir de una concentración de 14 lb/bbl el punto cedente real excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.3esto es debido al gran volumen que ocupa principalmente el celofán (material obturante) que tiene el lodo.
Esfuerzo de gel	A partir de una concentración de LCM's de 14 lb/bbl el lodo 1 presenta geles tanto instantáneos como progresivos, lo anterior se manifiesta en la diferencia de esfuerzo de gel a 10 segundos y a 10 minutos, la cual va en aumento a partir de dicha concentración.
Parámetros de limpieza de pozo (n,K)	Las propiedades de limpieza de lodo no se ven apreciablemente modificadas por la adición de LCM'S, ya que no varían considerablemente en el rango de concentraciones consideradas. El punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 18 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.55) y el valor del índice de

Criterio	Restricciones u observaciones
	consistencia es mayor ($K=1.04 \text{ lb seg}^{0.263}/100 \text{ ft}^2$).
Prueba de filtrado	El filtrado es constante a partir de una concentración de 12lb/bbl
Espesor de revoque	Revoques no firmes y delgados.
<i>Concentración propuesta</i>	<i>12 lb/bbl</i>

8.1.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 1

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 12 lb/bbl.

Tabla 8.5. Pruebas químicas realizadas al lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.80	2.00	1.90	1.90	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.10	2.70	2.75	2.52	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.90	2.90	2.90	2.90	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf(ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	360.00	840.00	1,020.0	740.00	-
OH ⁻ (ppm)	510.00	442.00	357.00	436.33	-
Contenido de cloruros (mg/l)	500.00	500.00	500.00	500.00	0-5000
pH	11.15	11.10	11.12	11.12	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	18.7	18.5	18.7	18.67	20-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal (API, Manual de

Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (11.00) y de la alcalinidad Pf (1.90) obteniendo un valor de **0.65 lb/bbl**.

8.1.4 CARACTERIZACION DEL LODO 1

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 1 a la concentración escogida de 12 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (tabla 8.6).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 1 a la concentración de 12 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.2.
3. Mostrar la composición del lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl (tabla 8.7).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 1.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 1 en plataforma de perforación.

Tabla 8.6. Caracterización del lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	7 cp
Punto cedente real	27.66 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	10 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	35 lb/100 ft ²
Filtrado	16.00 ml
Espesor de revoque	1.40 mm
Densidad	8.5 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.90, 2.52 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.90 ml de 0.02 H ₂ SO ₄

Propiedad	Valor
pH	11.10
MBT	18.67
Contenido de cloruros	500 ppm

Gráfico 8.11. Curva reológica logarítmica para el lodo 1 a una concentración de 12 lb/bbl de LCM's

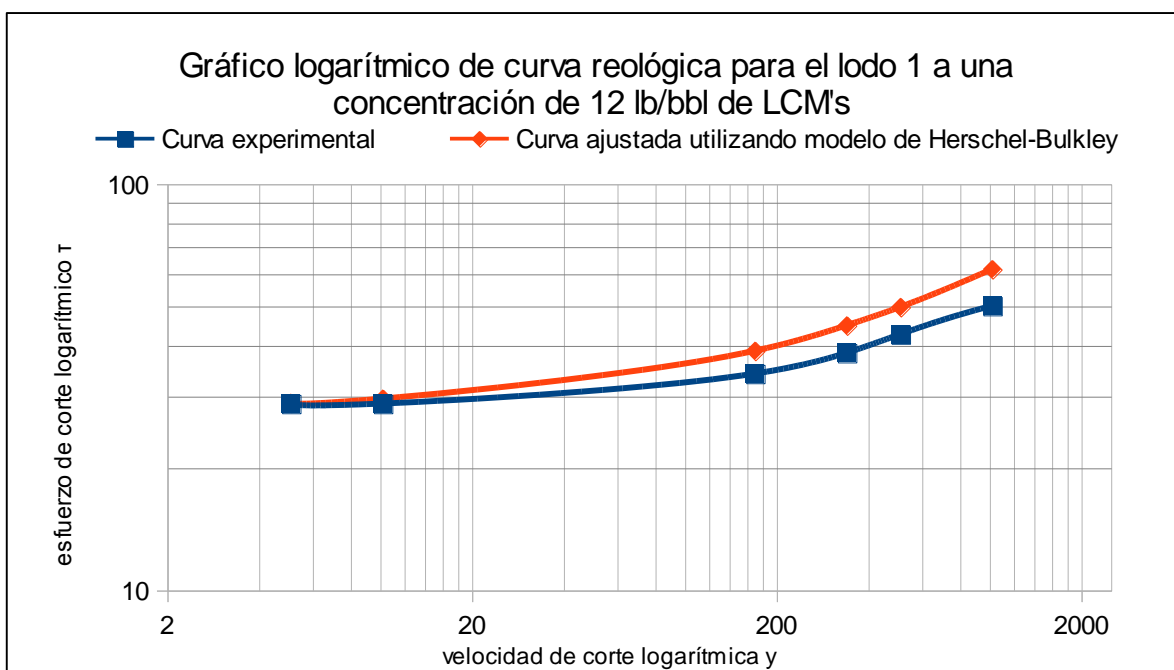


Tabla 8.7. Composición del lodo 1 a una concentración de materiales obturantes de 12 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000.00	93.65%
Bentonita	52.63	4.93%
NaOH	0.67	0.06%
Cal	2.47	0.23%

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Magma fiber grueso	4.00	0.37%
Magma fiber fino	4.00	0.37%
Celofán	4.00	0.37%
Total muestra	1067.77	100%

Comentarios lodo 1:

Se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo 1:

1. Presenta un esfuerzo de gel instantáneo y progresivo, lo cual puede generar problemas de retorno de lodo cuando existe paro de operaciones de perforación.
2. Las propiedades de limpieza de lodo no son notablemente modificadas.
3. Presenta reducciones de filtrado moderadas
4. Los revoques de la prueba de filtrado no son de consistencia muy firmes
5. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamiento correctivo en pérdidas leves de hasta 10 bbl/hr.*

8.2 LODO 2. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, MAGMA FIBER GRUESO, CASCARA DE NUEZ (NUT PLUG™) PROPORCIÓN 1:1:1.

8.2.1 REOLOGÍA LODO 2

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 2, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.8

Tabla 8.8. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 2

Lodo 2		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	22	15	11	7	2	2
1	2	22	15	12	7	2	2
2	4	22	16	12	7	3	3
3	6	32	25	21	16	10	9
4	8	40	34	29	23	17	15
5	10	47	40	35	30	25	24
6	12	56	50	46	40	34	32
7	14	65	58	53	48	42	41
8	16	75	69	63	58	53	53
9	18	84	77	72	68	62	60
10	20	95	89	83	78	73	70

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 2 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl.

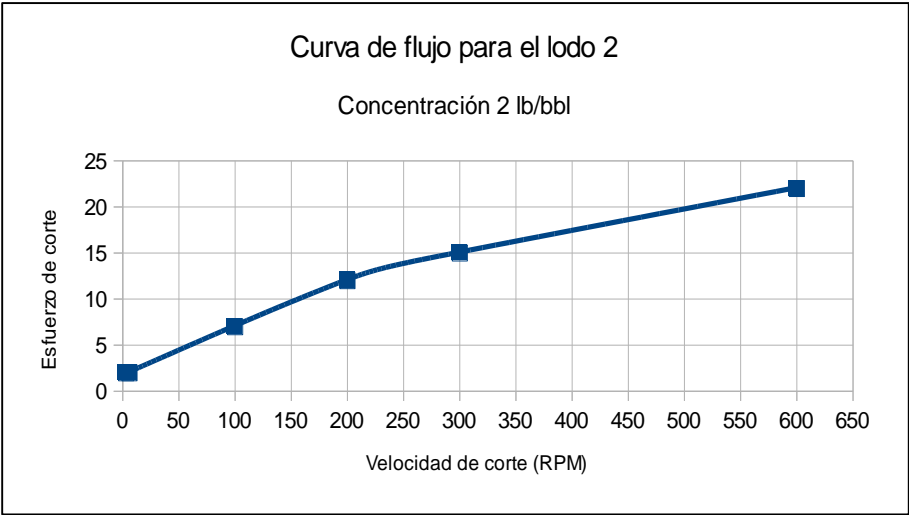


Gráfico 8.12. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.

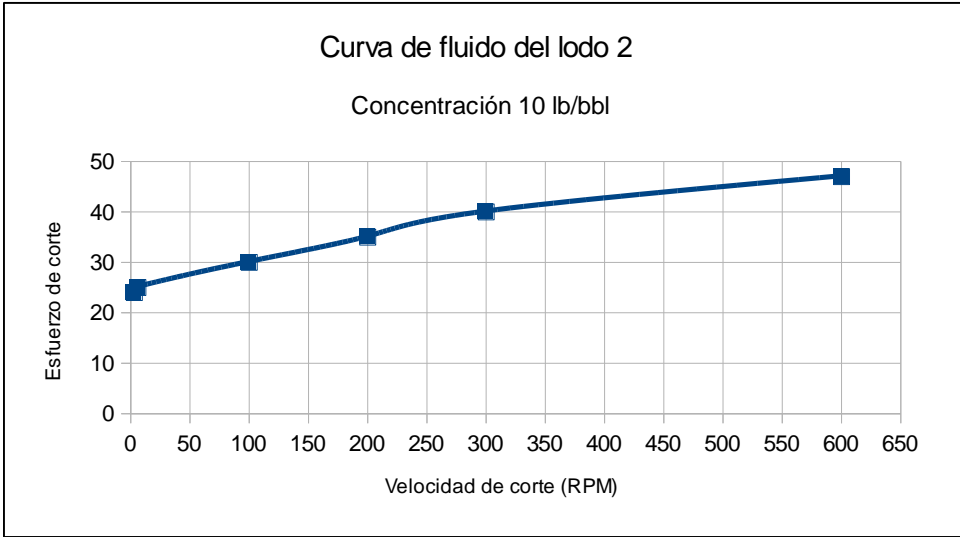


Gráfico 8.13. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.

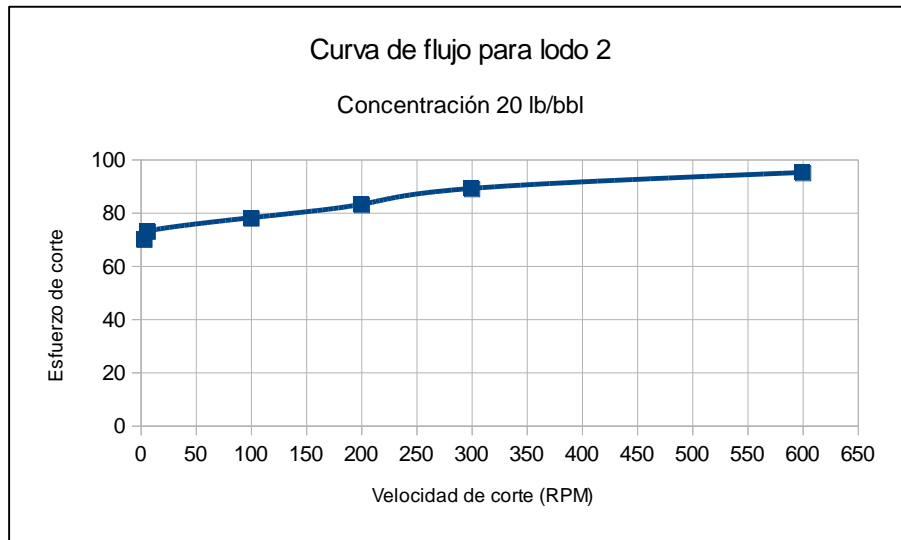


Gráfico 8.14. Curva de flujo para el lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 1 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, viscosidad a baja velocidad de corte, índice de consistencia, esfuerzo de gel.

Tabla 8.9. Propiedades reológicas para el lodo 6.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft ²)	Punto cedente real τ_y (lb/100 ft ²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Exponente n	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	7	8	0.79	0.098	0.310	0.621	4	11
1	2	7	8	1.24	0.155	0.506	0.547	7	15
2	4	6	10	7.82	0.782	0.943	0.497	6	17
3	6	7	18	12.11	0.673	2.924	0.362	7	35
4	8	6	28	23.71	0.847	1.162	0.497	7	35
5	10	7	33	31.15	0.944	3.197	0.378	7	35
6	12	6	44	31.22	0.710	3.187	0.378	7	35
7	14	7	51	41.68	0.817	1.739	0.474	8	37
8	16	6	63	53.56	0.850	2.110	0.459	7	50
9	18	7	70	62.30	0.890	2.441	0.452	7	52
10	20	6	83	71.16	0.857	6.015	0.348	8	52

En los gráficos 8.15 y 8.19 se procede a realizar los gráficos de variación de viscosidad plástica, viscosidad a baja velocidad de corte, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n, K) en función de la concentración de materiales obturantes.

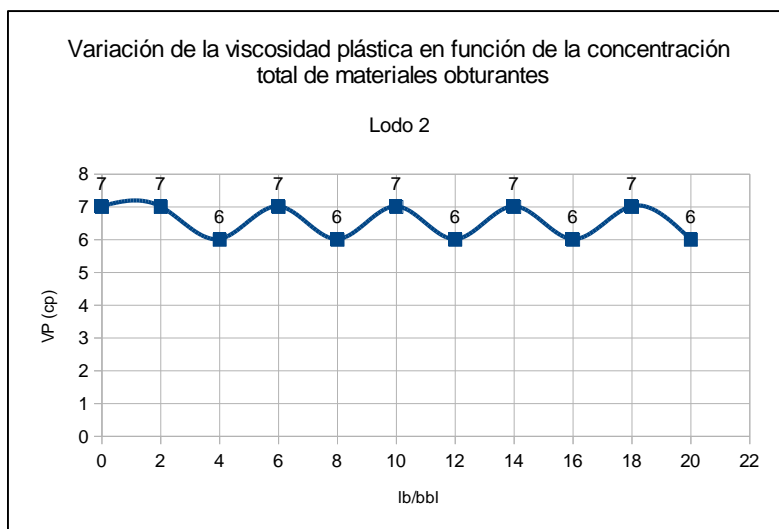


Gráfico 8.15. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2.

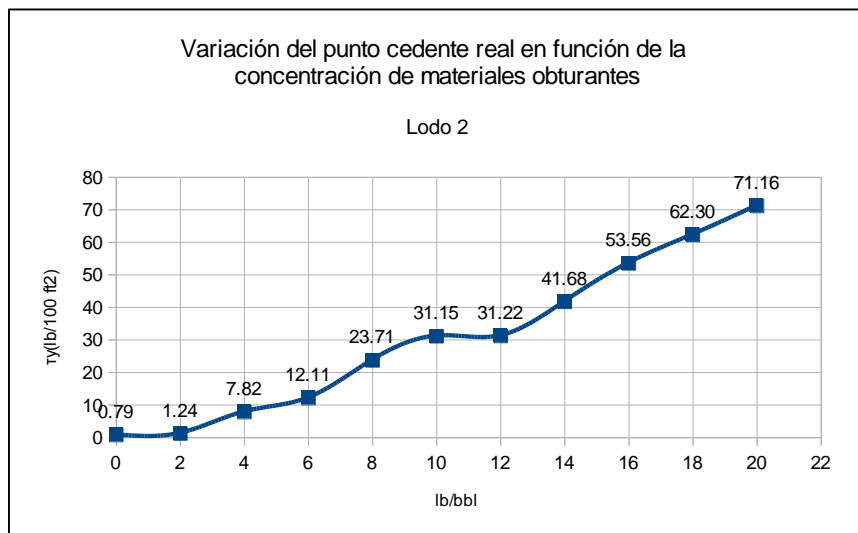


Gráfico 8.16. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2.

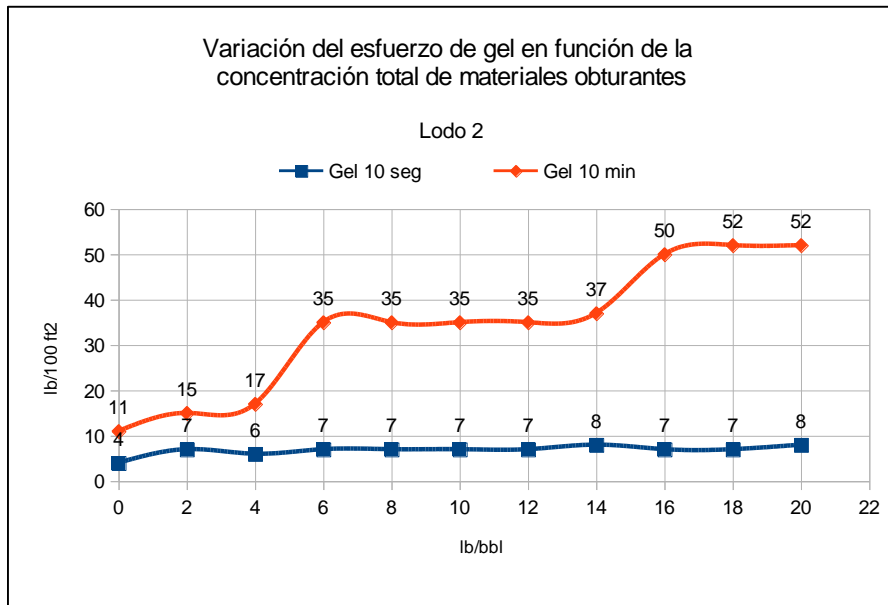


Gráfico 8.17. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 2

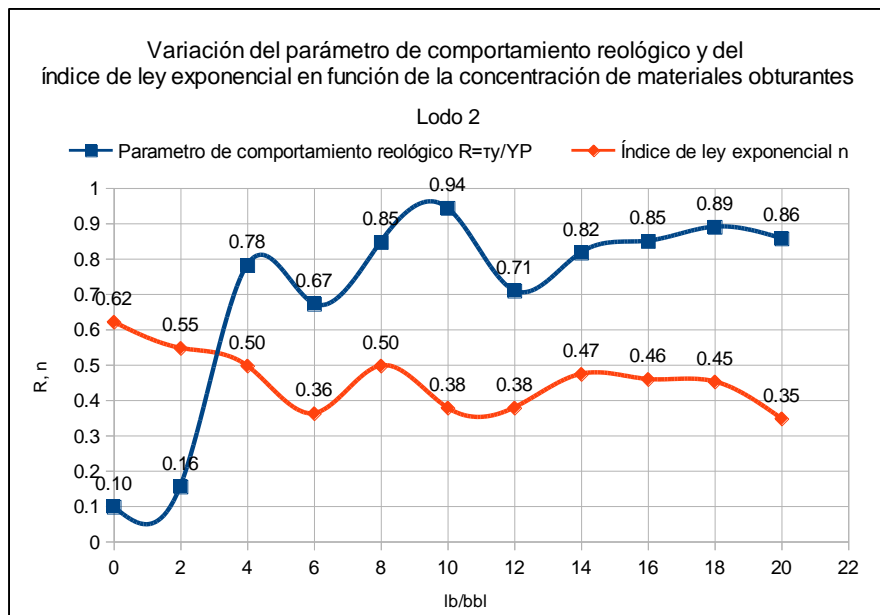


Gráfico 8.18. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 2

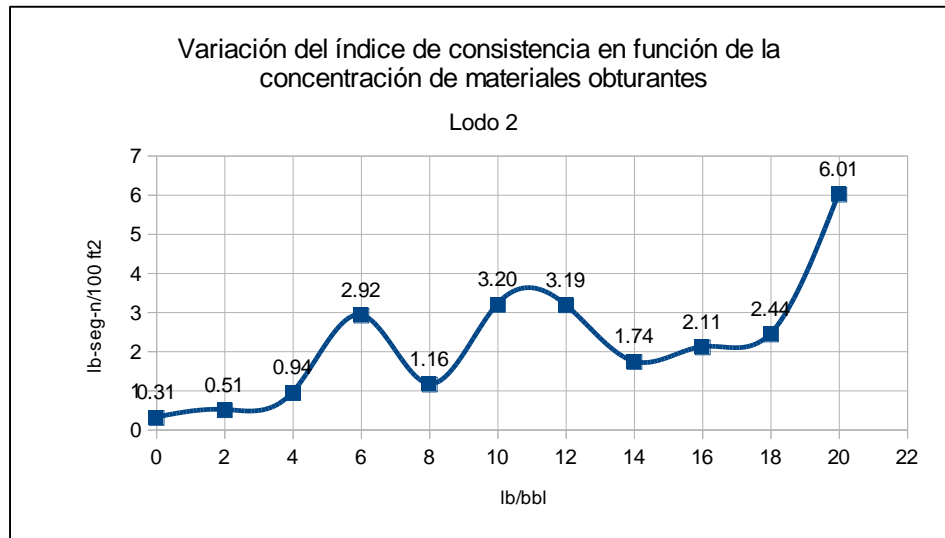


Gráfico 8.19. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 2.

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.15 y Gráfico 8.16):

1. El Gráfico 8.15 demuestra que los materiales obturantes y agentes químicos presentes en el lodo 2 no ejercen una acción viscosificante sobre fluido, esto se refleja en el hecho de que los datos de viscosidad plástica prácticamente no varían y están dentro de los rangos permitidos de la Figura 7.4.
2. En cuanto al punto cedente real (Gráfico 8.16) se concluye que los datos generados hasta una concentración de 12 lb/bbl están dentro de los rangos permisibles para este parámetro, establecidos en la Figura 7.3, tomando en cuenta el peso promedio del lodo 2, el cual fue de 8.6 lb/gal.

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.17):

1. Los LCM's presentes en el lodo 2 no producen un esfuerzo de gel instantáneo considerable, puesto que los valores de esfuerzo de gel a 10 seg no varían

apreciablemente con respecto a la medición del dial a 3RPM mediante se aumentaba la concentración de sólidos.

2. La diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es bastante evidente a partir de 6 lb/bbl de concentración de LCM's, esto indica que a partir de esta concentración el esfuerzo de gel es progresivo, aunque esta progresión se vuelve hacer considerablemente notable hasta la concentración de 16 lb/bbl. Esta característica no es deseable en un lodo ya que aumenta las probabilidades de problemas de retorno de lodo cuando se reanuda operaciones después de un paro.

Conclusiones referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.18 y Gráfico 8.19):

1. El Gráfico 8.18 demuestra que el comportamiento reológico general del lodo 2 se asemeja a un fluido pseudoplástico representado por el índice de ley exponencial, el cual es menor a uno en el intervalo de concertación de LCM, lo anterior se refuerza con el parámetro de comportamiento reológico R cuyos valores (en la mayoría de las concentraciones) están por debajo de la unidad indicando que el punto cedente real es menor al punto cedente de Bingham.
2. La formulación del lodo 2, en cuanto a limpieza de pozo se refiere, arrojó resultados aceptables dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.1 y 0.6) sumado a índices de consistencia (K) medianamente altos, principalmente entre 10-20 lb/bbl. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl.

8.2.2 FILTRADO LODO 2

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 2 los resultados se presentan en la tabla 8.10:

Tabla 8.10. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 2

Lodo 2					Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de granza de arroz g/L	Concentración de Magma Fiber g/L	Concentración de Walnut grueso g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque	% Reducción del filtrado
0	0	0	0	0	17.60	1.00	000%
4	3.8	3.8	3.8	4	16.40	1.70	6.82%
8	7.61	7.61	7.61	8	16.20	1.80	7.95%
12	11.41	11.41	11.41	12	15.80	2.20	10.23%
16	15.22	15.22	15.22	16	15.40	2.20	12.50%
20	19.02	19.02	19.02	20	15.20	2.25	13.64%

En los gráficos 8.20 y 8.21 se presentan la variación del filtrado y revoque en función de la concentración de materiales obturantes.

Variación del filtrado en función de la concentración total de materiales obturantes

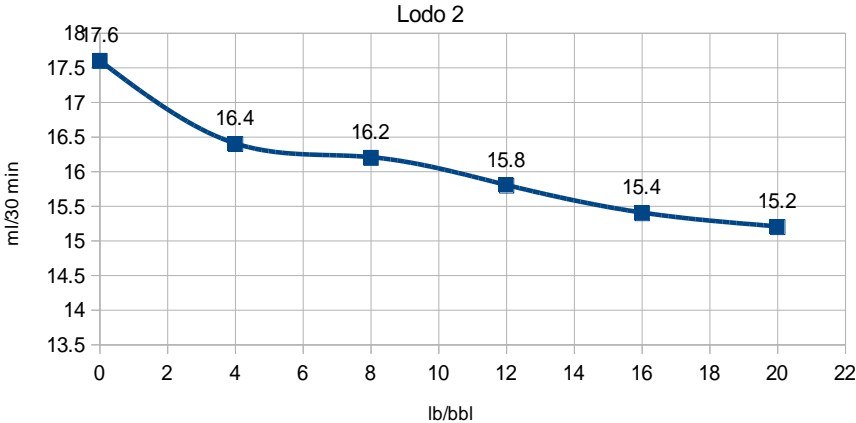


Gráfico 8.20. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 2

Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes

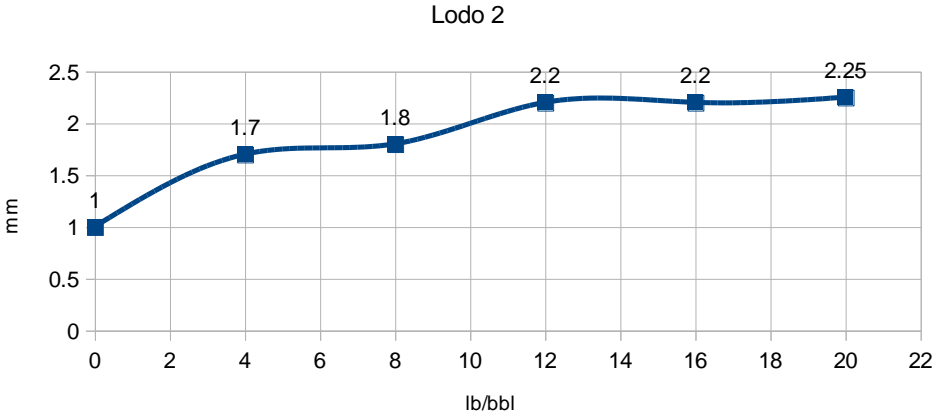


Gráfico 8.21. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 2

De acuerdo a la Tabla 8.10 y al Gráfico 8.20 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a la concentración de 20 lb/bbl con una reducción de un 13.64%, el porcentaje de reducción de filtrado es satisfactoria para ser utilizada en pérdidas de leves a superiores, sin embargo se puede se recomienda utilizarlo en pérdidas menores debido a la distribución del tamaño de partículas (tamaño pequeño).

El Gráfico 8.21 muestra la variación del espesor del revoque del lodo 2, éste no sobrepasa el limite planteado en el capítulo 7 que es de 3 mm, además cabe mencionar que los revoques obtenidos en este lodo resultaron firmes y con un espesor pequeño. Propiedades deseadas para esta prueba. (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001)

Tabla 8.11. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 2

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	No hay restricciones, la viscosidad plástica obtenida en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4
Punto cedente real	A partir de una concentración de 14 lb/bbl el punto cedente real excede notablemente el límite máximo recomendado (Figura 7.3), esto es debido probablemente a la presencia de sólidos inertes (Walnut grueso) en la formulación del lodo. La presencia de sólidos inertes hace que las partículas se acerquen más entre sí. Como el espacio entre las partículas disminuye, la atracción entre las partículas aumenta, aumentando el punto cedente real.
Esfuerzo de gel	El lodo no muestra esfuerzos de gel instantáneos , pero si progresivos evidenciándose este hecho en incremento en esfuerzos de geles a 10 min en las concentraciones de 6 lb/bbl y 16 lb/bbl
Parámetros de limpieza de pozo (n,K)	La adición de LCM's mejora moderadamente los parámetros de limpieza de pozo. El punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl en donde el índice de la ley exponencial es menor (n=0.35) y el valor del índice de consistencia es mayor

Criterio	Restricciones u observaciones
	(K=6.01 lb seg0.263/100 ft ²).
Prueba de filtrado	El porcentaje de reducción de filtrado es máximo a una concentración de 20 lb/bbl. (13.64 %)
Espesor de revoque	Revoques no firmes y delgados, lo cual representa otro punto a favor de este lodo.
<i>Concentración propuesta</i>	<i>20 lb/bbl</i>

8.2.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 2

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 20 lb/bbl.

Tabla 8.12. Pruebas químicas realizadas al lodo 1 a una concentración de 20 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.85	1.85	1.90	1.87	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.70	2.75	2.75	2.73	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.95	2.85	2.90	2.90	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	1,020.00	1,080.00	1,020.00	1,040.00	-
OH (ppm)	340.00	323.00	357.00	340.00	-
Contenido de cloruros (mg/l)	550.00	500.00	500.00	520.00	0-5000
pH	10.7	10.80	11.00	10.83	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	18.7	18.6	18.6	18.63	20-35

La caracterización química arrojó inconvenientes con el pH del lodo (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, ya que sobrepasan los rangos máximos permitidos. Por lo que el lodo debe tratarse con cal (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (10.83) y de la alcalinidad Pf (1.87) obteniendo un valor de **0.45 lb/bbl**.

8.2.4 CARACTERIZACION DEL LODO 2

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 2 a la concentración escogida de 20 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (tabla 8.13).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 2 a la concentración de 20 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.9.
3. Mostrar la composición del lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl (tabla 8.14).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 2.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 2 en plataforma de perforación.

Tabla 8.13. Caracterización del lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	6 cp
Punto cedente real	71.16 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	8 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	52 lb/100 ft ²
Filtrado	15.2 ml
Espesor de revoque	2.25 mm
Densidad	8.6 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.87, 2.73 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.90 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	10.83
MBT	18.63
Contenido de cloruros	520 ppm

Gráfico 8.22. Curva reológica logarítmica para el lodo 2 a una concentración de 20 lb/bbl de LCM's

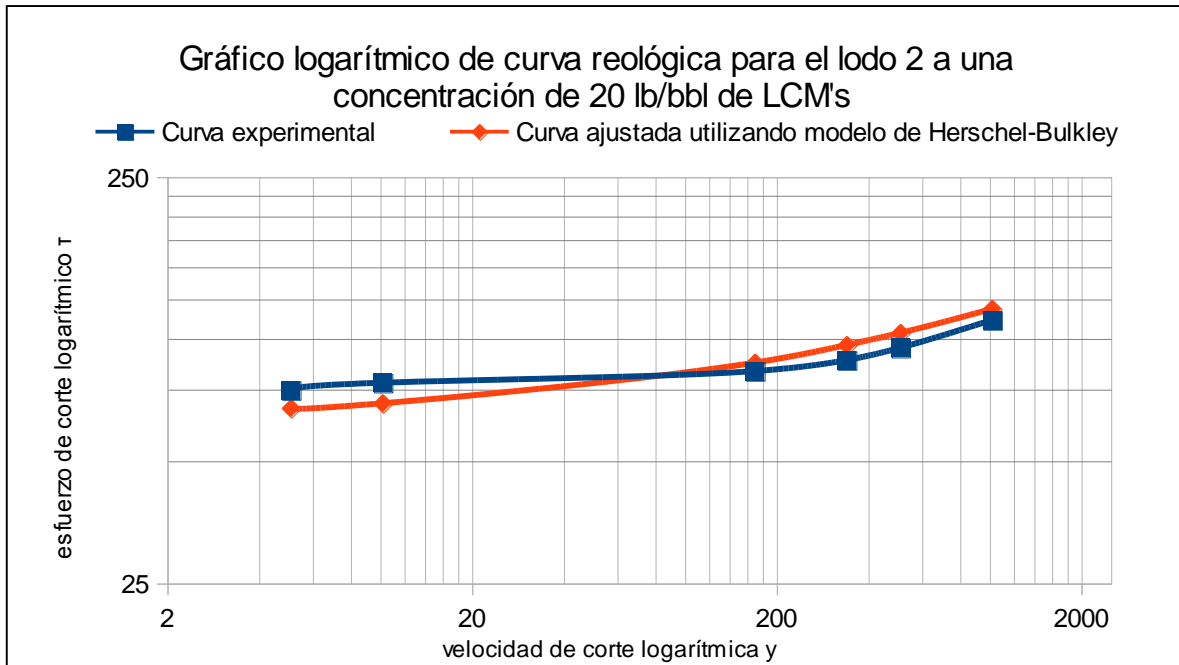


Tabla 8.14. Composición del lodo 2 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000	89.92%
Bentonita	52.63	4.73%
NaOH	0.67	0.06%
Cal	1.71	0.15%
Magma fiber grueso	19.02	1.71%
Granza de arroz	19.02	1.71%
Cáscara de nuez	19.02	1.71%
Total	1112.07	100%

Comentarios lodo2

Se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo 2:

1. No presenta esfuerzo de gel instantáneo pero si progresivo, lo cual puede generar problemas de retorno de lodo cuando existe paro de operaciones de perforación.
2. Las propiedades de limpieza de lodo son moderadamente mejoradas.
3. Presenta reducciones de filtrado aceptables
4. Los revoques de la prueba de filtrado no son de consistencia muy firmes
5. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamiento correctivo en pérdidas leves hasta 10 bbl/hr.*

8.3 LODO 3. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, MAGMA FIBER GRUESO, CELOFÁN, CASCARA DE NUEZ.

8.3.1 REOLOGÍA LODO 3

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 3, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.15.

Tabla 8.15. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 3

Lodo 3		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	20	14	12	9	5	5
1	2	21	15	12	9	5	5
2	4	25	16	12	10	5	5
3	6	26	17	13	10	5	6
4	8	28	20	15	10	5	6
5	10	30	22	18	14	10	8
6	12	33	24	18	16	12	9
7	14	35	25	20	17	12	9
8	16	38	27	22	18	12	10
9	18	40	29	24	18	12	10
10	20	45	31	26	20	12	10

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 0 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl.

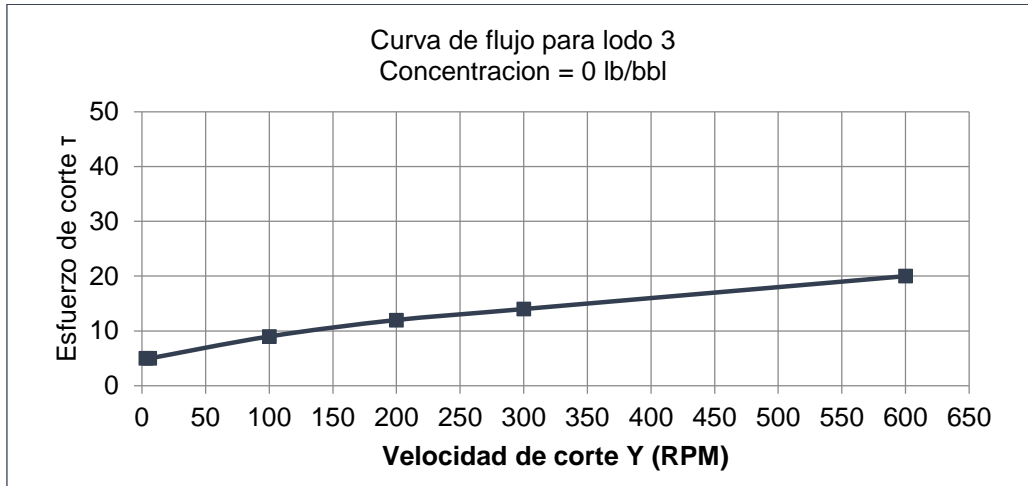


Gráfico 8.23. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentraci3n de 0 lb/bbl de materiales obturantes.

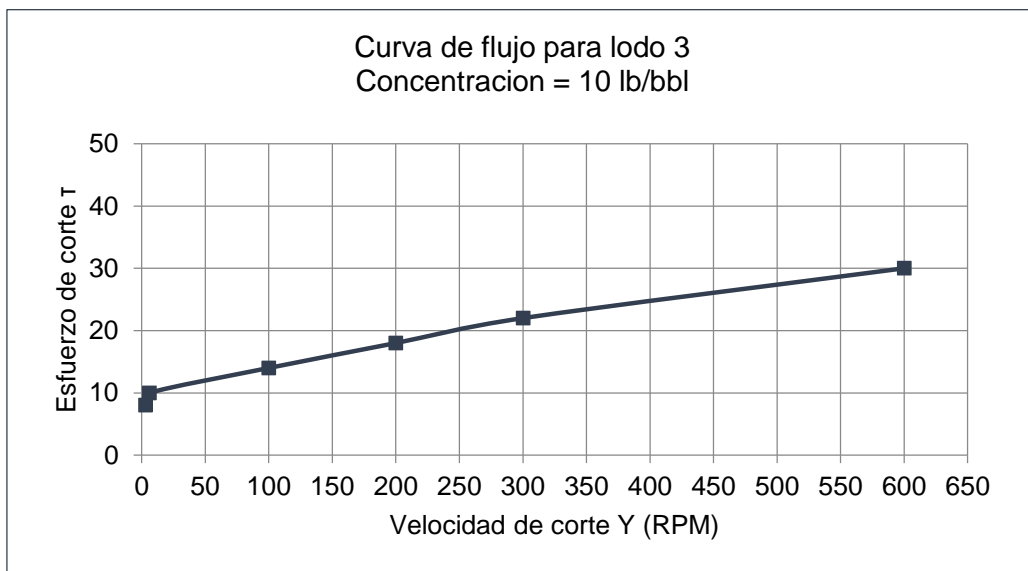


Gráfico 8.24. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentraci3n de 10 lb/bbl de materiales obturantes.

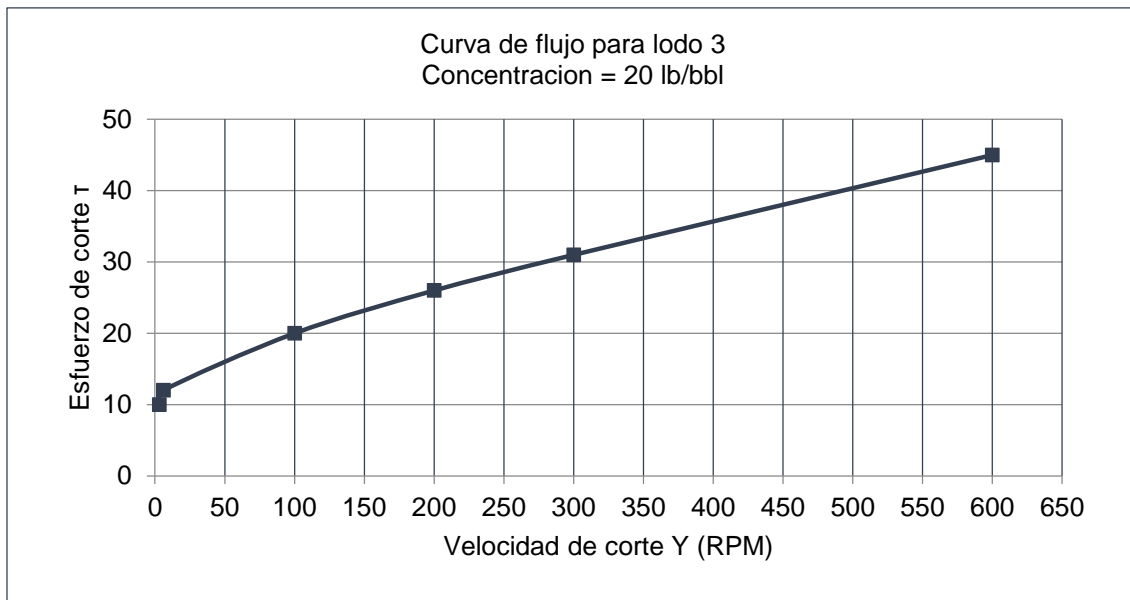


Gráfico 8.25. Curva de flujo para el lodo 3 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 5 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real) con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real, índice de ley exponencial, índice de consistencia y esfuerzos de gel.

Tabla 8.16. Propiedades reológicas para el lodo 3.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft ²)	Punto cedente real τ_y (lb/100 ft ²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Exponente n	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	6	8	5.05	0.63	0.11	0.74	5	15
1	2	6	9	4.60	0.51	0.18	0.68	6	16
2	4	9	7	5.21	0.74	0.06	0.86	7	18
3	6	9	8	5.94	0.74	0.04	0.93	7	24
4	8	8	12	4.52	0.38	0.23	0.69	7	30
5	10	8	14	7.66	0.55	0.47	0.58	10	35
6	12	9	15	9.07	0.60	0.50	0.58	10	38
7	14	10	15	9.51	0.63	0.45	0.61	12	44
8	16	11	16	10.42	0.65	0.35	0.66	15	47
9	18	11	18	9.82	0.55	0.54	0.61	16	51
10	20	14	17	10.60	0.62	0.36	0.69	18	55

En los gráficos 8.26 a 8.30 se presenta la variación de viscosidad plástica, viscosidad a baja velocidad de corte, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturantes

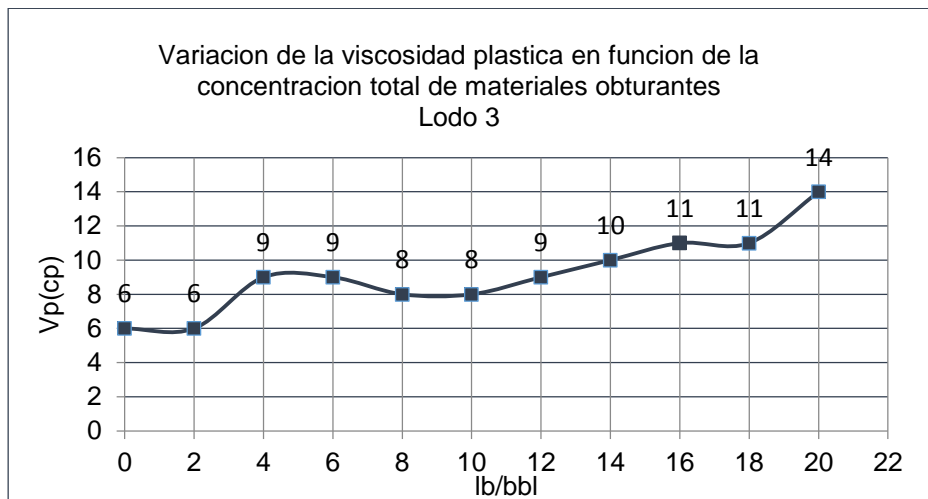


Gráfico 8.26. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3

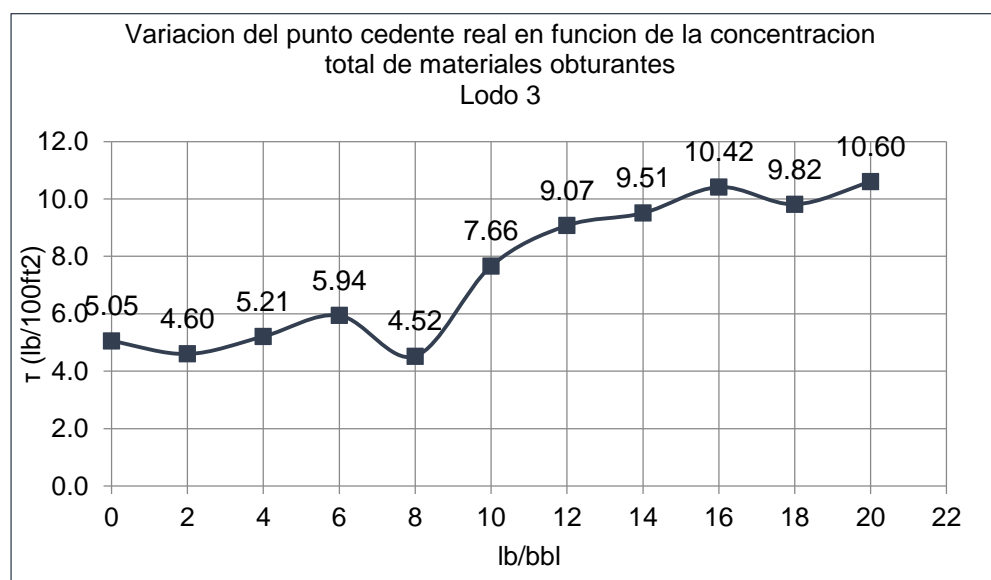


Gráfico 8.27. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3

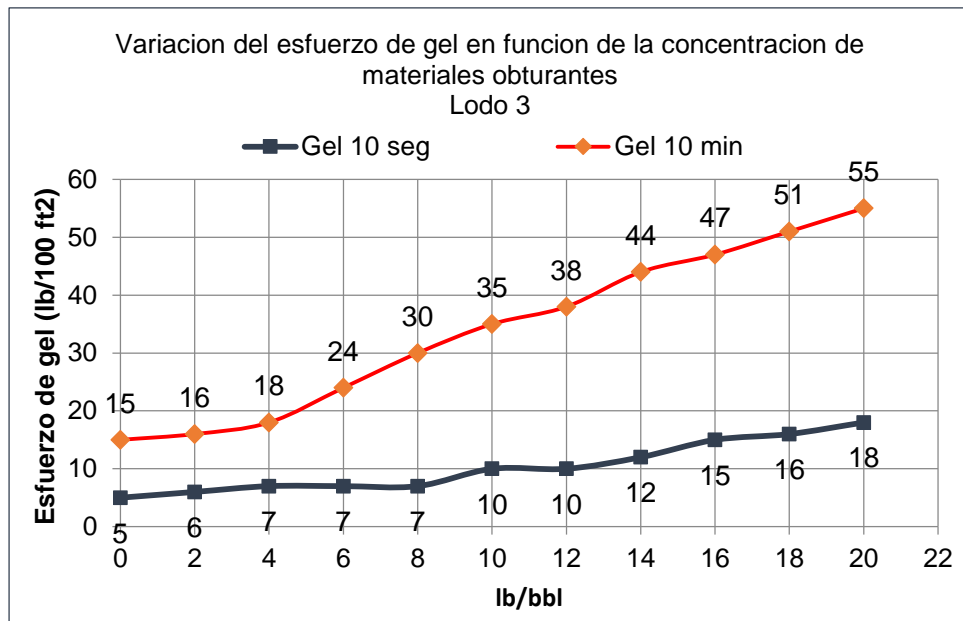


Gráfico 8.28. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 3

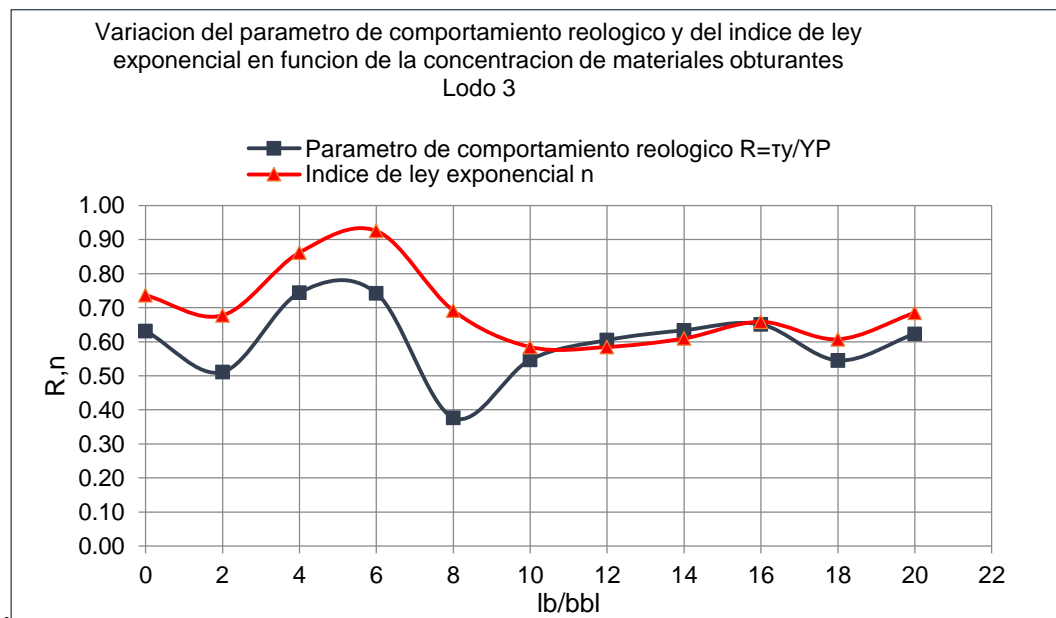


Gráfico 8.29. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 3

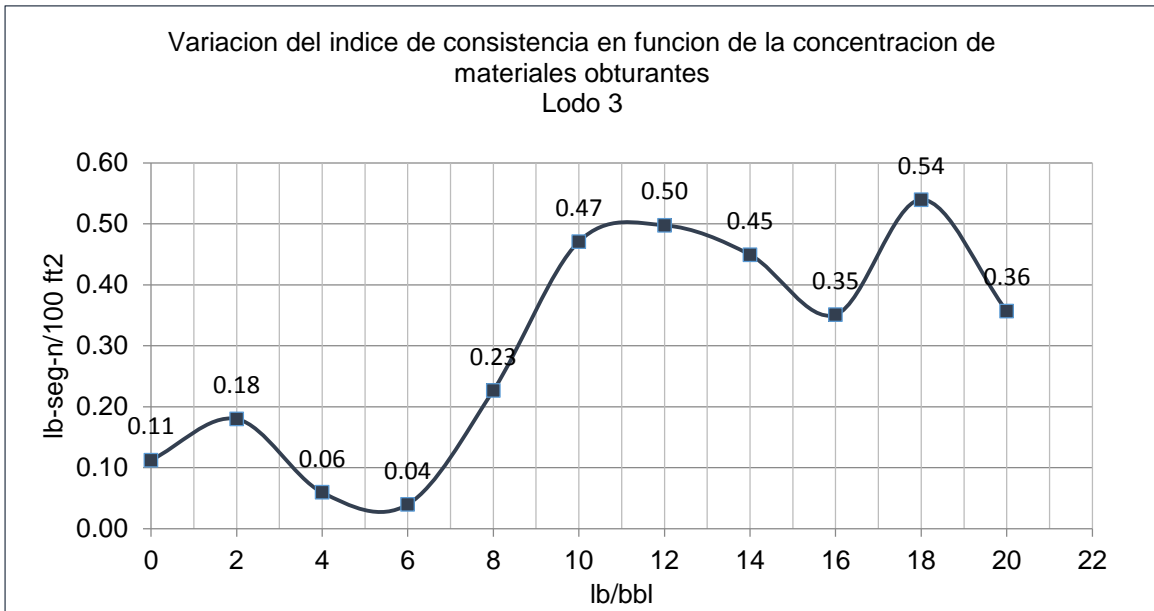


Gráfico 8.30. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 3

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.26 y Gráfico 8.27):

1. En el Gráfico 8.26 se presenta la variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes (LCM), observándose una tendencia ascendente a medida que la concentración de LCM se incrementa. Con una densidad promedio del lodo de 8.65 lb/gal (obtenido por mediciones experimentales en la balanza de lodos del campo geotérmico de Chinameca) y haciendo uso del grafico 7.4 con un valor aproximado de 9 lb/gal se analiza que a concentraciones de 0 lb/bbl y 2 lb/bbl con valores de viscosidad plástica de 6 cP se encuentran cerca del rango mínimo aceptable, mientras que de 4 lb/bbl y 18 lb/bbl los valores obtenidos de viscosidad de 9 - 11 cP se encuentran dentro del rango permitido, sin embargo a una concentración de 20 lb/bbl se obtiene un valor de viscosidad plástica de 14 cP sobrepasando el rango máximo aceptable.

2. En el Gráfico 8.27 se presenta la variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes (LCM) observándose un aumento de τ_y a medida se incrementa la concentración de LCM. Con una densidad promedio del lodo de 8.65 lb/gal (obtenido por mediciones experimentales en la balanza de lodos del campo geotérmico de Chinameca) y haciendo uso del grafico 7.3 con un valor aproximado de 9 lb/gal se observa que los datos obtenidos de punto cedente real que se encuentran entre 5.05 lb/100 pies² a una concentración de 0 lb/bbl y 10.60 lb/100 pies² a una concentración de 20 lb/bbl están entre los rangos permitidos. (Rango mínimo: 2 lb/100 pies² y Rango máximo: 30 lb/100 pies².)

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.28)

1. El Gráfico 8.28 muestra la variación del esfuerzo de gel en función de la concentración de materiales obturantes, en dicho grafico se observa que los valores de esfuerzo de gel instantáneo a 10 segundos de las concentraciones de 0 lb/bbl a 12 lb/bbl se consideran valores aceptables ya que estos llegan a ser cercanos a los obtenidos a 3RPM; a partir del punto 7 (14 lb/bbl) se observa un leve incremento en el esfuerzo o fuerza necesaria para romper la circulación.
2. La tendencia a seguir entre el esfuerzo de gel a 10 minutos y a 10 segundos es variante, existe un amplio rango entre el gel inicial y el de 10 minutos, lo cual da lugar a una gel progresiva ya que la fuerza para iniciar el movimiento será cada vez mayor a medida se incrementa la concentración de material obturante. Siendo este fenómeno indeseable al momento de realizar una perforación.

8.3.2 FILTRADO LODO 3

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 2 los resultados se presentan en la tabla 8.17:

Tabla 8.17. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 3.

Lodo 3						Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de granza de arroz g/L	Concentración de Magma Fiber g/L	Concentración de celofán g/L	Concentración de Walnut grueso g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	Volumen de filtrado (ml)	Espesor de revoque (mm)	% Reducción del filtrado
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	17.60	1.00	0%
2	2.28	2.28	2.28	4.56	4	17.60	1.35	0%
4	4.56	4.56	4.56	9.13	8	15.60	1.40	11.36%
6	6.85	6.85	6.85	13.69	12	15.20	1.40	13.64%
8	9.13	9.13	9.13	18.26	16	15.20	1.60	13.64%
10	11.41	11.41	11.41	22.82	20	15.00	1.75	14.77%

En los gráficos 8.31-8.32 se presentan los gráficos de la variación del filtrado y revoque en función de la concentración de materiales obturantes.

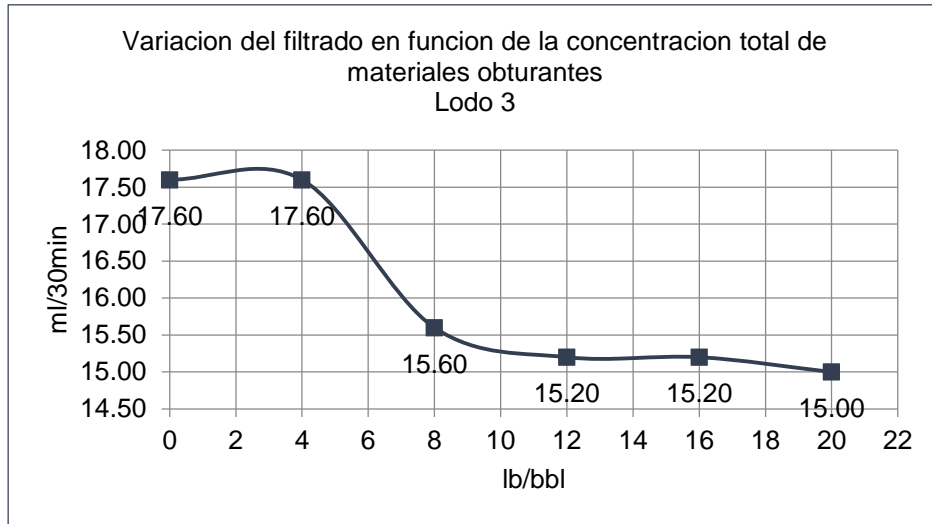


Gráfico 8.31. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 3.

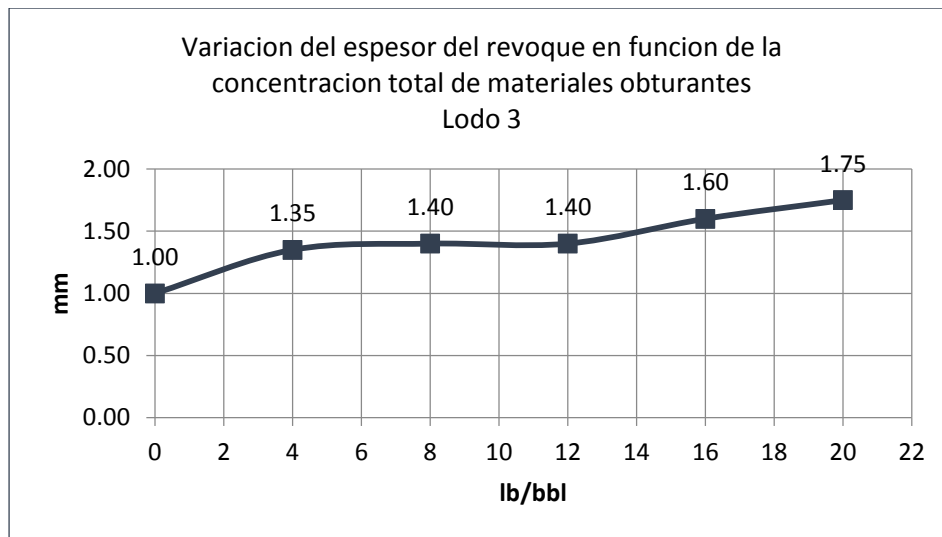


Gráfico 8.32. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 3.

De acuerdo a la Tabla 8.17 y al Gráfico 8.31 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los mejores resultados de reducción de filtrado fue la concentración 20 lb/bbl con una reducción de un 14.77%. Así también el Gráfico 8.32 muestra la variación del espesor del revoque, el cual no sobrepasa el límite planteado en el capítulo 7 que es de 3 mm, es importante mencionar que los revoques obtenidos en este lodo resultaron ser bastante levemente firmes y con un espesor pequeño.

Tabla 8.18. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 3

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	Restricciones aplican a concentraciones mayores a 20 lb/bbl, el valor de la viscosidad plástica obtenida a esta concentración es de 14 cP lo cual excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4.
Punto cedente	El punto cedente se encuentra entre los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.3. No presentando inconveniente en la limpieza del fluido
Esfuerzo de gel	El esfuerzo de gel observado es inestable, éste presenta un amplio rango entre el gel inicial y el de 10 min lo cual requiere una fuerza mayor a medida se incrementa la concentración de LCM.
Parámetros de limpieza de pozo (n,K)	En términos generales el lodo 3 tiene capacidades aceptables en cuanto a limpieza de pozo se refiere dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.58 y 0.93) Sin embargo se obtuvieron índices de consistencia (K) bajos con un valor mínimo de 0.04 y un valor máximo de 0.54. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 12 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.61) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=0.54 lb seg ^{0.61} /100 ft ²).
Prueba de filtrado	El filtrado disminuye levemente a medida se incrementa la concentración de materiales obturantes.
Espesor de revoque	Revoques levemente firmes y delgados, lo cual representa otro punto a favor de este lodo.
<i>Concentración propuesta</i>	<i>18 lb/bbl</i>

8.3.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 3

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 18 lb/bbl.

Tabla 8.19. Pruebas químicas realizadas al lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.9	1.85	1.80	1.85	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.70	2.70	2.75	2.72	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.9	2.95	2.90	2.92	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	960	1020	1140	1044	-
OH ⁻ (ppm)	374	340	289	333.2	-
Contenido de cloruros (mg/l)	500	550	550	533	0-5000
pH	11.72	11.66	11.6	11.66	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	18.4	18.3	18.5	18.4	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo y filtrado) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de yeso o cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (11.66) y de la alcalinidad Pf (1.85) obteniendo un valor de **0.50 lb/bbl**.

8.3.4 CARACTERIZACION DEL LODO 3

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 3 a la concentración escogida de 18 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (tabla 8.20).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 3 a la concentración de 18 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.16.
3. Mostrar la composición del lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl (tabla 8.14).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 3.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 3 en plataforma de perforación.

Tabla 8.20. Caracterización del lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	11 cP
Punto cedente	10.60 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	19 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	51 lb/100 ft ²
Filtrado	15.20 ml
Espesor de revoque	1.60 mm
Densidad	8.7 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.85, 2.72 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.92 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	11.66
MBT	18.40
Contenido de cloruros	533 ppm

Gráfico 8.33. Curva reológica logarítmica para el lodo 3 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's

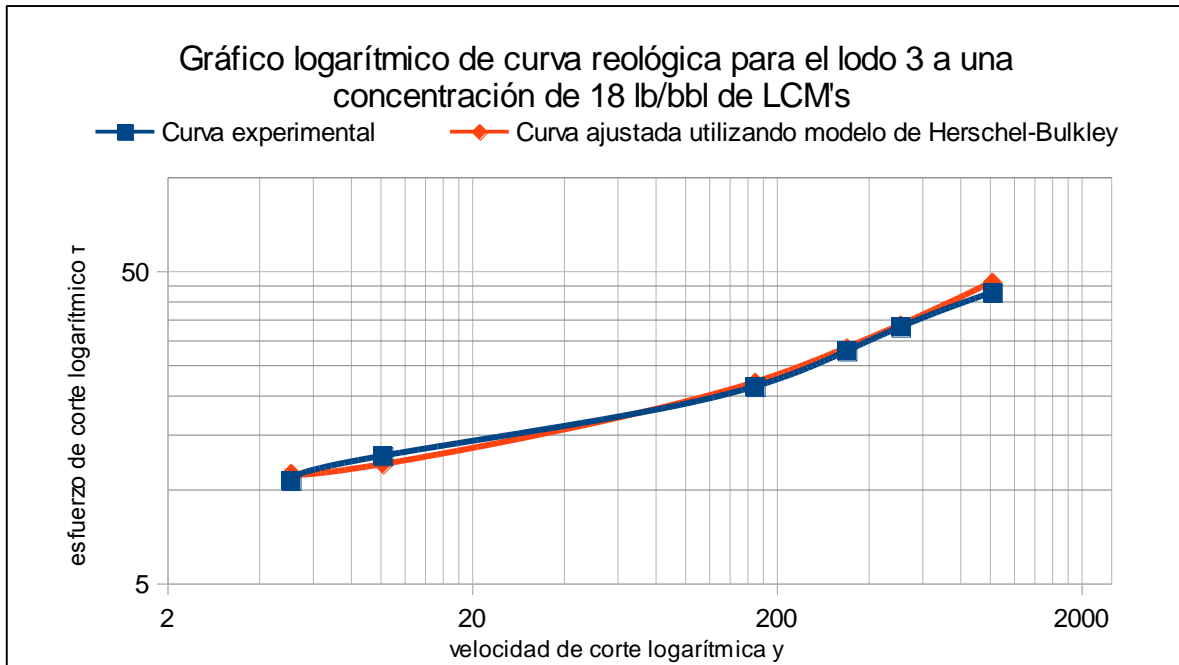


Tabla 8.21. Composición del lodo 3 a una concentración de materiales obturantes de 18 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000	90.30%
Bentonita	50.42	4.55%
NaOH	0.67	0.06%
Yeso	1.46	0.13%
Granza de arroz	47.24	4.27%
Magma fiber grueso	6.62	0.60%
Celofán	0.23	0.02%
Cascara de nuez	0.83	0.07%
Total	1107.47	100.00%

Comentarios lodo 3

Se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo 3:

1. Modifica en gran medida la viscosidad plástica debido al tipo de LCM utilizado.
2. Presenta un esfuerzo de gel inestable, el cual cambia con el tiempo.
3. Posee buenas propiedades de limpieza de lodo.
4. Presenta poca reducción de filtrado.
5. Ofrece revoques finos y levemente firmes.
6. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

2. *Tratamiento correctivo en pérdidas parciales de hasta 250 bbl/hr, tanto en pozos verticales como en direccionales*

8.4 LODO 4. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: ÚNICAMENTE MICA FINA.

8.4.1 REOLOGÍA LODO 4

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 4, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.22

Tabla 8.22. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 4.

Lodo 4		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	30	19	16	11	6	6
1	2	28	17	14	11	6	6
2	4	28	18	14	11	6	6
3	6	30	17	14	10	5	5
4	8	26	15	13	9	6	5
5	10	30	18	15	12	6	5
6	12	28	17	13	9	4	4
7	14	30	17	13	9	4	4
8	16	25	15	13	9	5	5
9	18	30	19	13	9	5	5
10	20	29	17	13	10	5	5

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 0 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl.

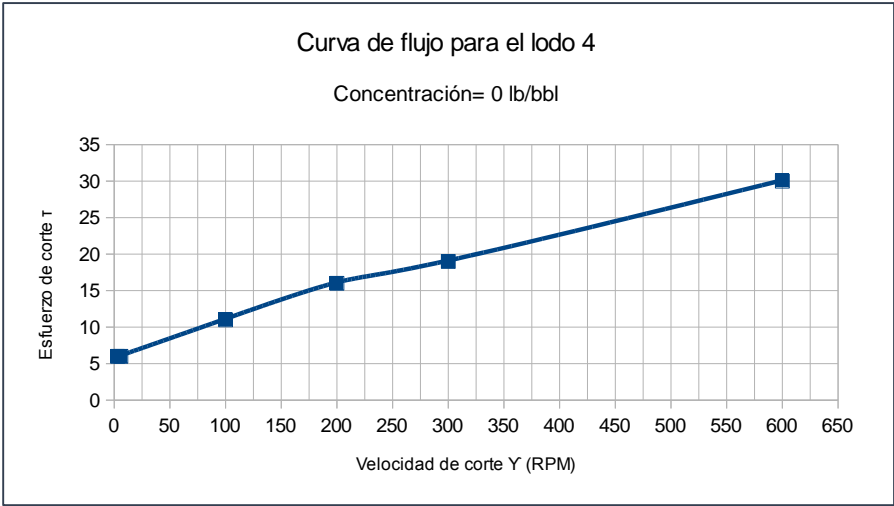


Gráfico 8.34. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.

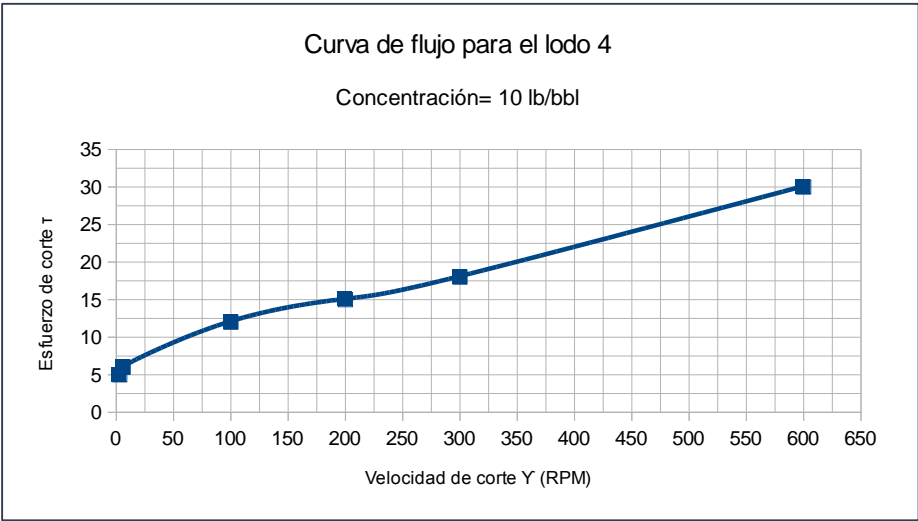


Gráfico 8.35. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.

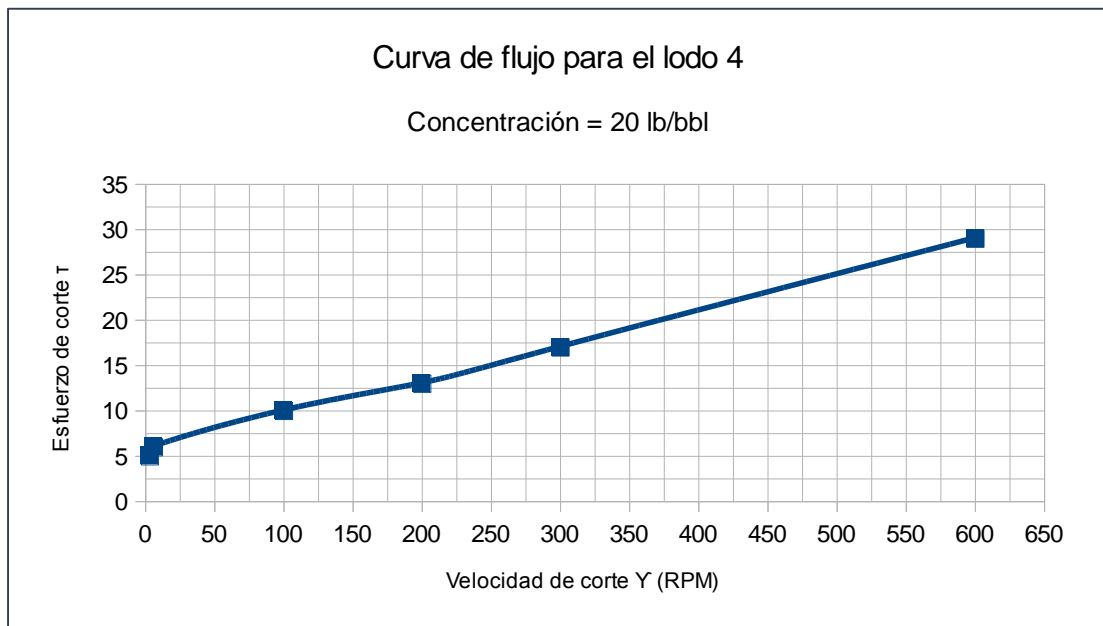


Gráfico 8.36. Curva de flujo para el lodo 4 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 4 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real, índice de ley exponencial, índice de consistencia y esfuerzos de gel.

Tabla 8.23. Propiedades reológicas para el lodo 4.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft ²)	Viscosidad a baja velocidad de corte τ_y (lb/100 ft ²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Índice de ley exponencial n	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	11	8	6.338	0.792	0.062	0.884	10	20
1	2	11	6	6.728	1.121	0.025	0.999	9	18
2	4	10	8	6.068	0.758	0.061	0.874	9	25
3	6	13	4	5.679	1.420	0.019	1.058	10	25
4	8	11	4	5.528	1.382	0.024	0.999	11	26
5	10	12	6	5.234	0.872	0.060	0.893	10	26
6	12	11	6	3.191	0.532	0.062	0.884	9	25
7	14	13	4	3.678	0.919	0.030	0.999	8	20
8	16	10	5	4.789	0.958	0.024	0.999	9	25
9	18	11	8	2.201	0.275	0.092	0.836	9	25
10	20	12	5	4.167	0.833	0.041	0.943	10	25

En los gráficos 8.37-8.41 se presentan las tendencias de variación de viscosidad plástica, punto cedente real, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturantes.

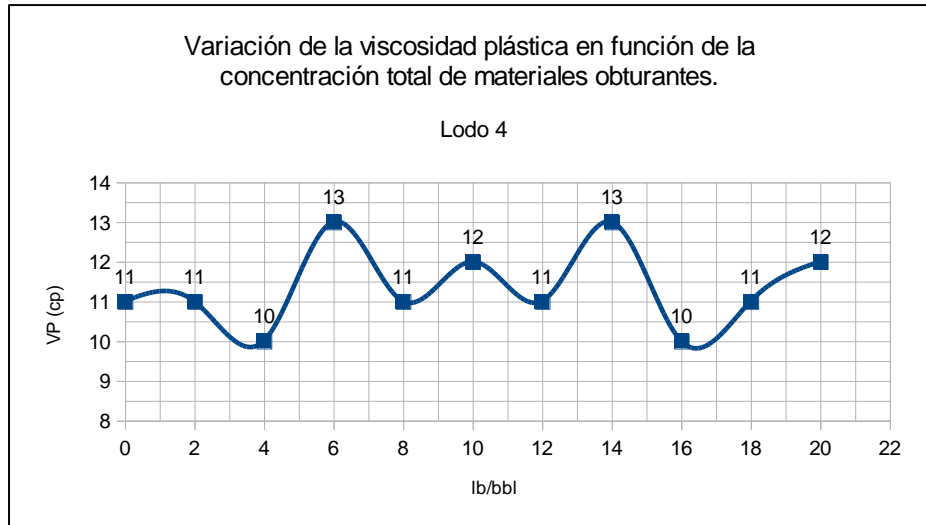


Gráfico 8.37. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 4.

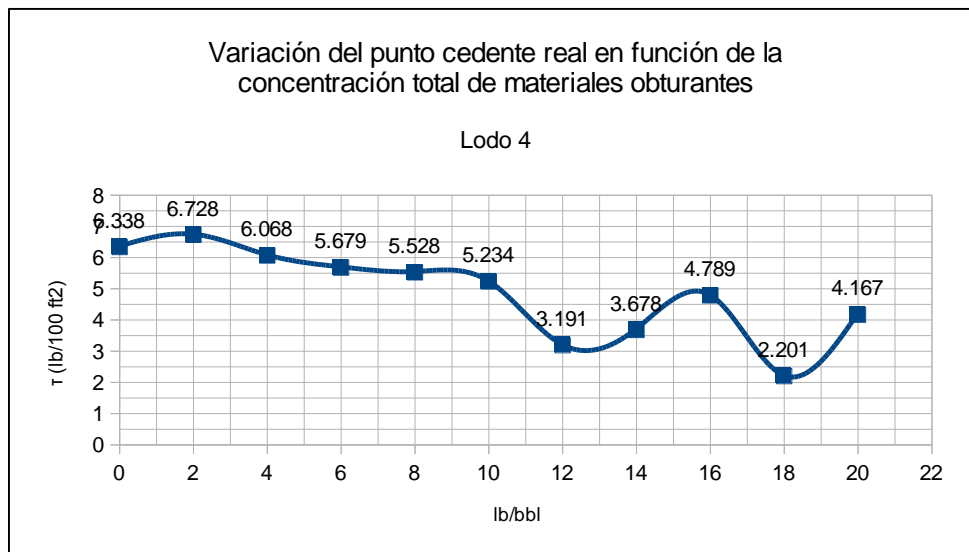


Gráfico 8.38. Variación del punto de cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 4.

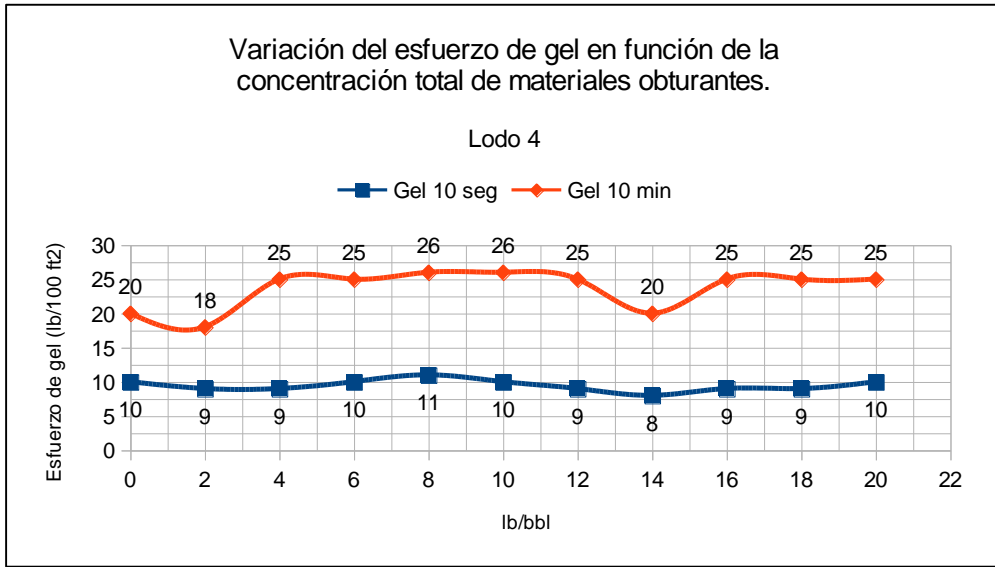


Gráfico 8.39. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 4

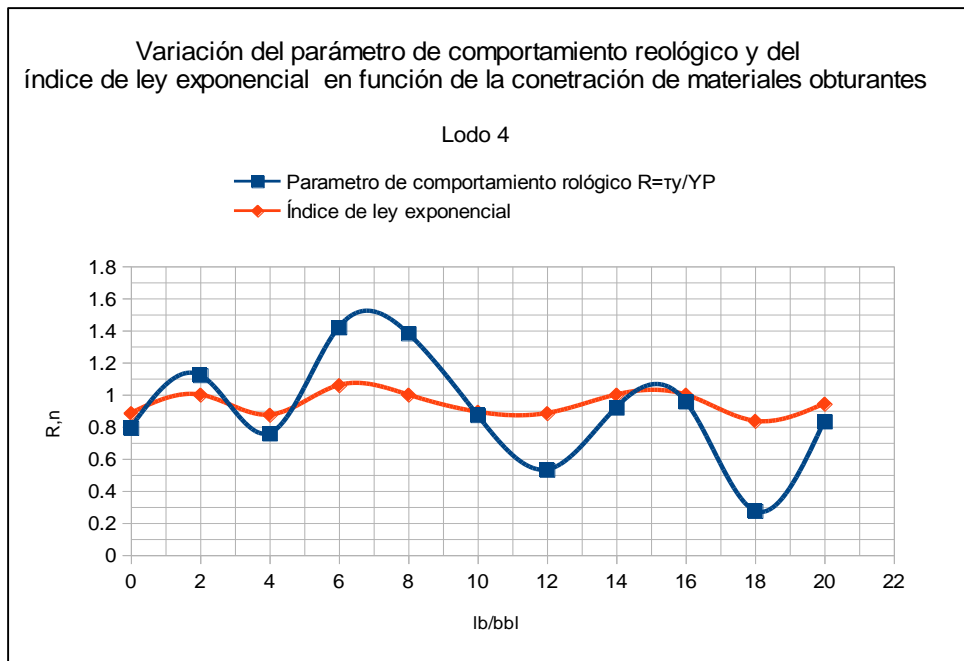


Gráfico 8.40. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4

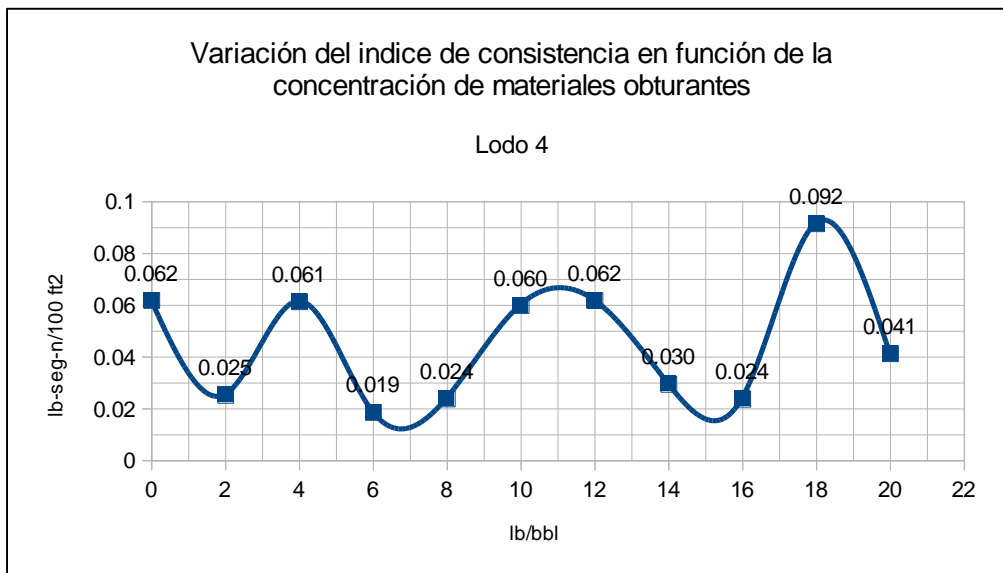


Gráfico 8.41. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4

Conclusiones de los gráficos anteriores.

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.37 y Gráfico 8.38):

1. Demuestran que la mica no es un viscosificante y que los valores de viscosidad plástica y punto cedente real están dentro de los rangos permitidos presentados en la Figura 7.4y Figura 7.3 respectivamente.

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.39):

1. El material obturante mica es prácticamente inerte y no ejerce ningún tipo de fuerzas de atracción en las moléculas del lodo, esto es debido a que los esfuerzos de gel prácticamente no varían con la adición del material.
2. El esfuerzo de gel no es instantáneo, puesto que los valores de esfuerzo de gel a 10 seg varían poco con respecto a la medición del dial a 3RPM.

3. El esfuerzo de gel no es instantáneo pero si progresivo, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es significativa, no obstante la presión necesaria para romper la circulación (un máximo de 25 lb/100 ft²) sigue siendo aceptable.

Conclusiones referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.40 y Gráfico 8.41):

1. El Gráfico 8.40 demuestra que el comportamiento general del fluido se asemeja a un fluido plástico de Bingham representado por el índice de ley exponencial, el cual es cercano a uno en el intervalo de concertación de LCM, no obstante dicha idealidad se pierde sobre todo a velocidades de corte bajas, la cual es representada por el parámetro reológico R y que representa relación entre el punto cedente real y el punto cedente de Bingham.
2. Como el índice de la ley exponencial (n) es cercano a uno y el índice de consistencia (K) es bajo en todo el rango de concentraciones, se concluye que el lodo tiene baja capacidad de limpieza. Lo anterior está relacionado a que el índice n ejerce una gran influencia sobre el perfil de velocidad del fluido, y a valores menores que uno el perfil se aplana y por tanto tiene más capacidad de arrastrar recortes.

8.4.2 FILTRADO LODO 4

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 4 los resultados se presentan en la tabla 8.24:

Tabla 8.24. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 4.

Lodo 4			Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de mica g/l	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque	% Reducción de filtrado
0	0.00	0	17.4	1.3	0.00%
2	11.41	4	16	1.4	8.05%
4	22.82	8	16	1.5	8.05%
6	34.23	12	16	1.7	8.05%
8	45.65	16	16	1.7	8.05%
10	57.06	20	15.8	1.9	9.20%

En los gráficos 8.42 y 8.43 se presentan la variación del filtrado y la variación del espesor del revoque en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 4.

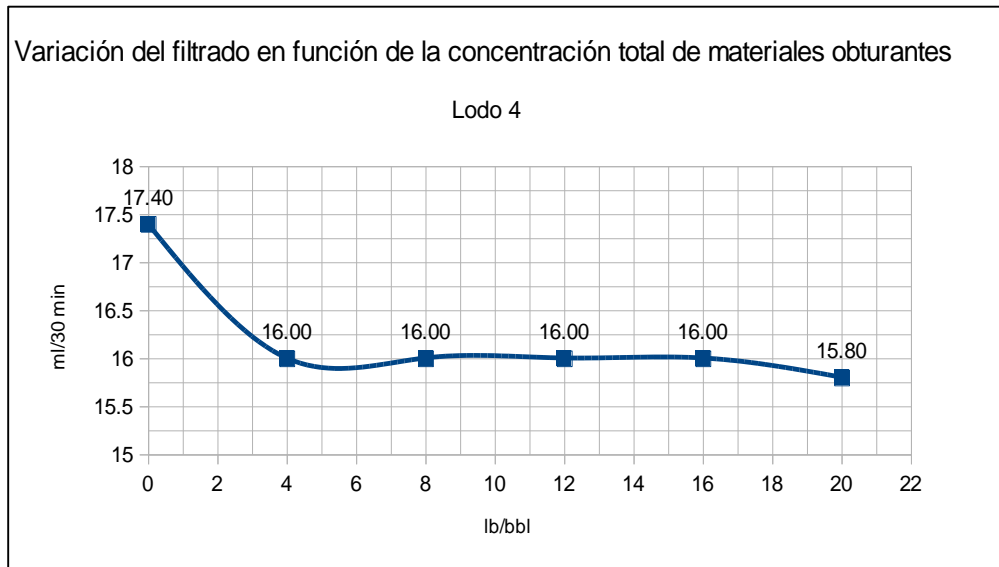


Gráfico 8.42. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 4

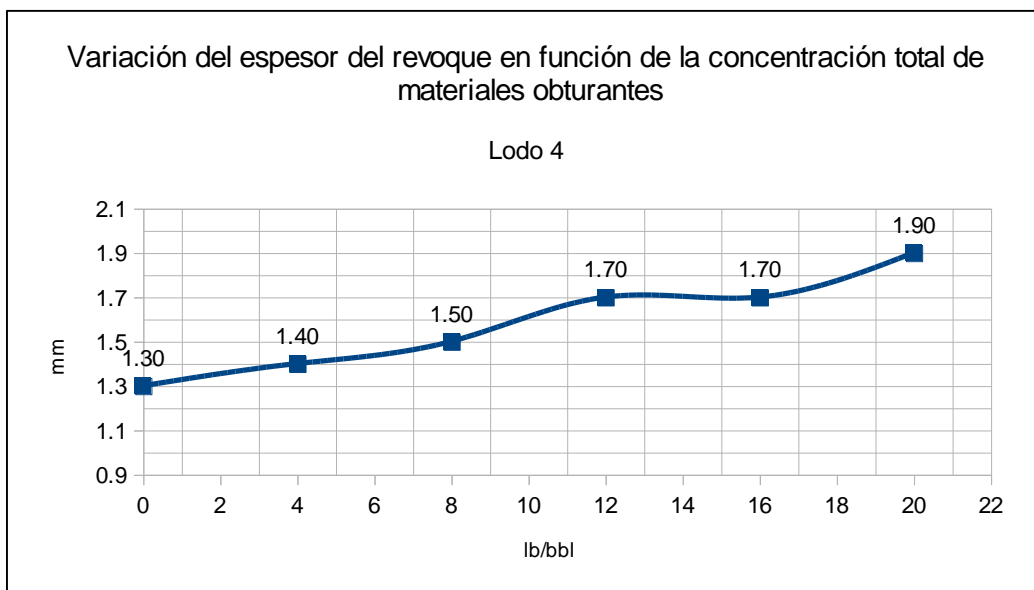


Gráfico 8.43. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 4

De acuerdo a la Tabla 8.24y al Gráfico 8.42 se observó que la concentración de mica que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a una concentración de 20 lb/bbl con una reducción de un 9.02%, sin embargo nótese que entre una concentración de 4 lb/bbl y 16 lb/bbl el filtrado no varió por lo que desde un punto de vista económico resulta más viable tomar una concentración de mica entre 4 lb/bbl y 16 lb/bbl

El Gráfico 8.43 muestra la variación del espesor del revoque, el cual no sobrepasa el limite planteado en la sección 7.1.4 (un máximo de 1.90 mm para 20 lb/bbl) que es de 3 mm, no obstante los revoques obtenidos a partir de una concentración de 12 lb/bbl mostraron tener mayor firmeza.

Tabla 8.25. Criterios de decisión para la elección de una concentración en específico. Lodo

4

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	No hay restricciones, la viscosidad plástica obtenida en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4
Punto cedente real	No hay restricciones, el punto cedente obtenido en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.3
Esfuerzo de gel	No hay restricciones. La diferencia de esfuerzo de gel a 10 minutos y 10 segundos es casi constante para cada uno de los puntos evaluados.
Parámetros de limpieza del pozo (n,K)	En general la capacidad de limpieza del fluido es baja en todo el rango de concentraciones, empero la concentración que genera los resultados más aceptables (n bajo y k alto) es la de 18 lb/bbl; con un exponente de 0.836 y un índice de consistencia de $0.092 \text{ lb-seg}^{-0.836}/100 \text{ ft}^2$.
Prueba de filtrado	El filtrado es casi constante a partir de una concentración de 4lb/bbl
Espesor de revoque	A partir de una concentración de 12 lb/bbl el revoque es más firme y cumple con el límite de espesor, el cual es de 3 mm
<i>Concentración propuesta</i>	<i>18 lb/bbl</i>

8.4.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 4

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 18 lb/bbl y son presentadas en la Tabla 8.26.

Tabla 8.26. Pruebas químicas para el lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.80	1.85	1.90	1.85	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.65	2.75	2.75	2.72	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02N H ₂ SO ₄)	2.85	2.90	2.90	2.88	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	1020.00	1080.00	1020.00	1040.00	-
OH ⁻ (ppm)	323.00	323.00	357.00	334.33	-
Contenido de cloruros (mg/l)	450.00	550.00	550.00	516.67	0-5000
pH	11.40	11.50	11.40	11.43	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	17.90	18.04	17.95	17.96	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal, sin embargo cuando el pH supera un valor de 11.40 se recomienda tratar únicamente con yeso (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (11.43) y de la alcalinidad Pf (1.85) obteniendo un valor de **0.51 lb/bbl**.

8.4.4 CARACTERIZACION DEL LODO 4.

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 4 a la concentración escogida de 18 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.27).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 4 a la concentración de 18 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.23.
3. Mostrar la composición del lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl (Tabla 8.28).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 4.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 4 en plataforma de perforación.

Tabla 8.27. Caracterización del lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	11 cp
Punto cedente real	2.201 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	9 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	25 lb/100 ft ²
Índice de ley exponencial	0.836
Índice de consistencia (lb-seg ^{-0.836} /100 ft ²)	0.092
Filtrado	16.0 ml
Espesor de revoque	1.70 mm
Densidad	8.5 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.85, 2.78 ml de 0.02 H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.88 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	11.43
MBT	17.96
Contenido de cloruros	516.67 ppm

Gráfico 8.44. Curva reológica logarítmica para el lodo 4 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's

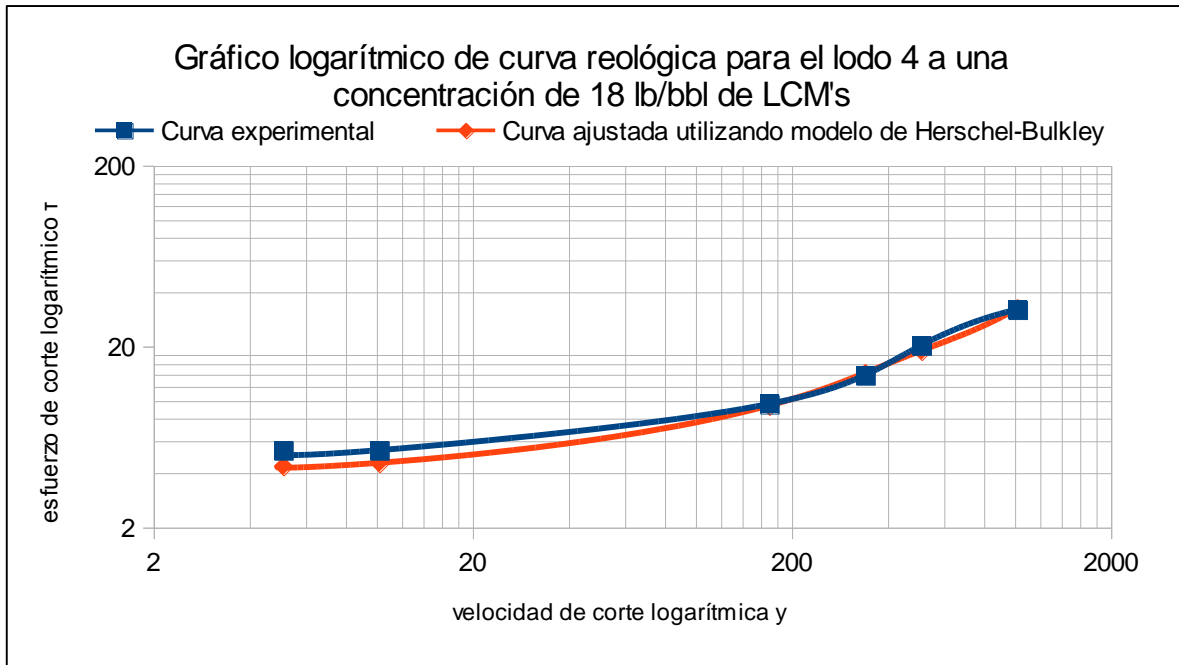


Tabla 8.28. Composición de lodo 4 a una concentración propuesta de materiales obturantes de 18 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000	92.02%
Bentonita	50.42	4.64%
NaOH	0.67	0.06%
Mica	34.23	3.15%
Cal	1.46	0.13%
Total	1086.78	100.00%

Comentarios lodo 4

En conclusión se determinó que el material obturante mica presente en el lodo bentonítico:

1. No altera significativamente las propiedades reológicas del fluido.
2. En términos generales no beneficia en términos de capacidad de limpieza de pozo
3. A concentraciones mayores de 4 lb/bbl los ml de filtrado son prácticamente constantes.
4. A concentraciones mayores a 12 lb/bbl el revoque tiene una mejor consistencia.
5. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamientos preventivos como lo es en fortalecimiento de las paredes del pozo tanto en perforaciones verticales como horizontales/direccionales.*
2. *Tratamiento correctivo en pérdidas inferiores a 10 bbl/hr debido a los pequeños tamaños de partícula y a la pobre reducción del filtrado.*

8.5 LODO 5. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: CASCARILLA DE CAFÉ, MAGMA FIBER GRUESO, CELOFÁN Y MICA PROPORCIÓN 1:1:1:4.

8.5.1 REOLOGÍA LODO 5

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 5, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.29.

Tabla 8.29. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 5.

Lodo 5		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	48	31	26	20	12	12
1	3	42	30	26	19	13	12
2	6	45	30	25	2	15	14
3	9	45	3	28	22	13	13
4	12	55	35	30	22	12	12
5	15	58	42	33	28	17	17
6	18	60	30	25	19	10	10
7	21	63	40	30	22	15	10
8	24	70	45	35	28	18	16
9	27	72	45	31	22	12	10

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 0 lb/bbl, 12 lb/bbl y 27 lb/bbl.

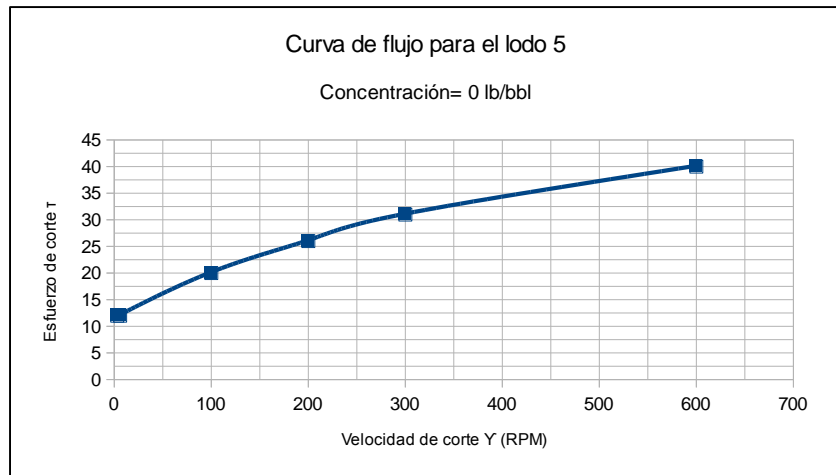


Gráfico 8.45. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.

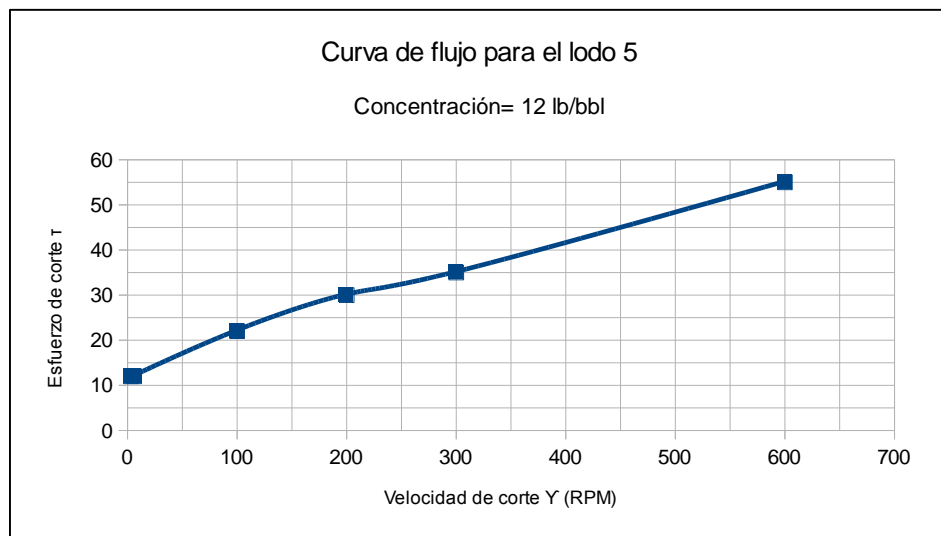


Gráfico 8.46. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 12 lb/bbl de materiales obturantes.

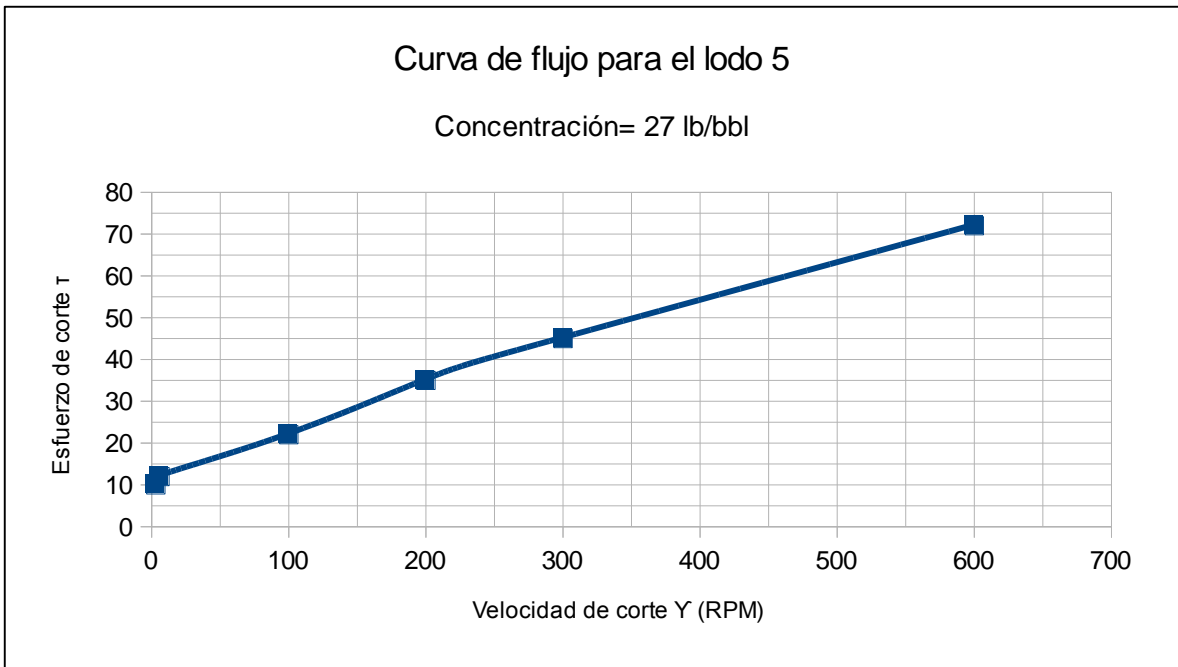


Gráfico 8.47. Curva de flujo para el lodo 5 a una concentración de 27 lb/bbl de materiales obturantes

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 5 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real, índice de ley exponencial, índice de consistencia y esfuerzos de gel.

Tabla 8.30. Propiedades reológicas para el lodo 5.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft²)	Punto cedente real τ_y (lb/100 ft²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	índice de ley exponencial	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	9	22	10.481	0.476	0.769	0.559	19	35
1	3	12	18	12.214	0.679	0.281	0.706	20	39
2	6	15	15	14.971	0.998	0.069	0.912	22	40
3	9	13	19	13.583	0.715	0.221	0.752	20	40
4	12	20	15	13.172	0.878	0.098	0.902	19	40
5	15	16	26	16.539	0.636	0.371	0.713	25	46
6	18	16	28	4.065	0.145	1.245	0.556	15	39
7	21	23	17	10.438	0.614	0.378	0.728	15	43
8	24	25	20	16.966	0.848	0.172	0.853	19	45
9	27	27	18	9.536	0.530	0.295	0.790	15	50

En los gráficos 8.48-8.52 se presentan las tendencias de variación de viscosidad plástica, punto cedente real, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturantes

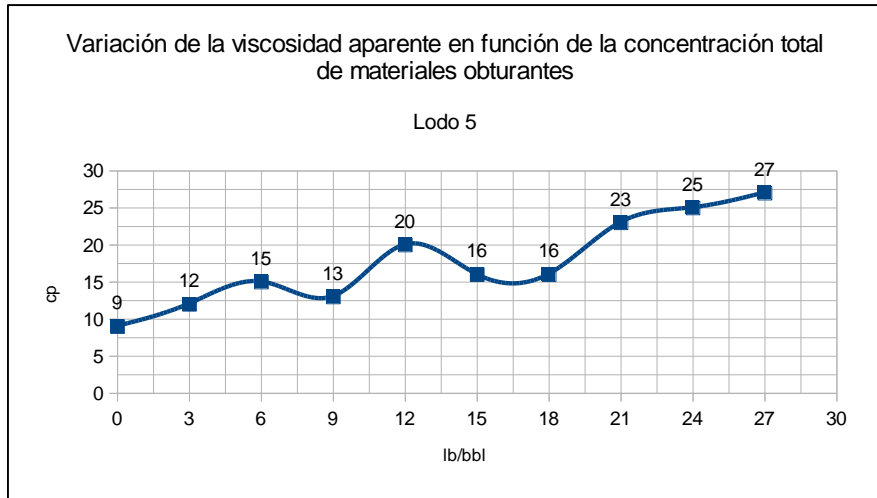


Gráfico 8.48. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.

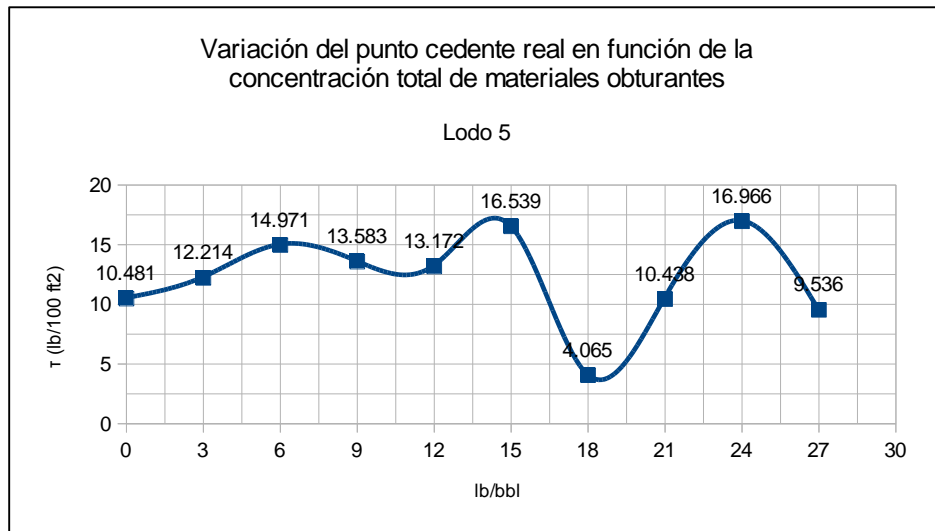


Gráfico 8.49. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.

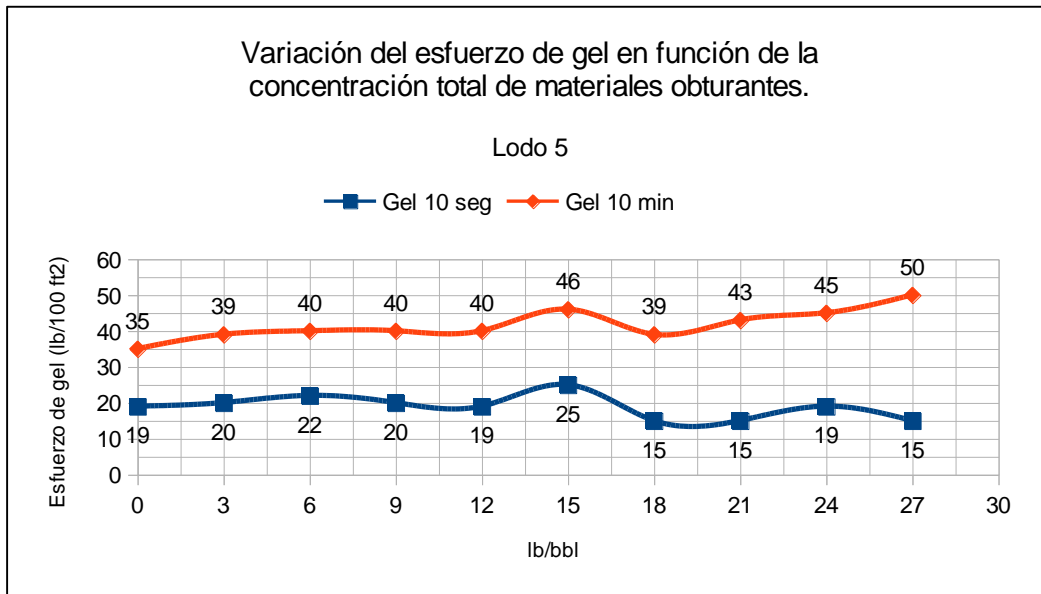


Gráfico 8.50. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 5.

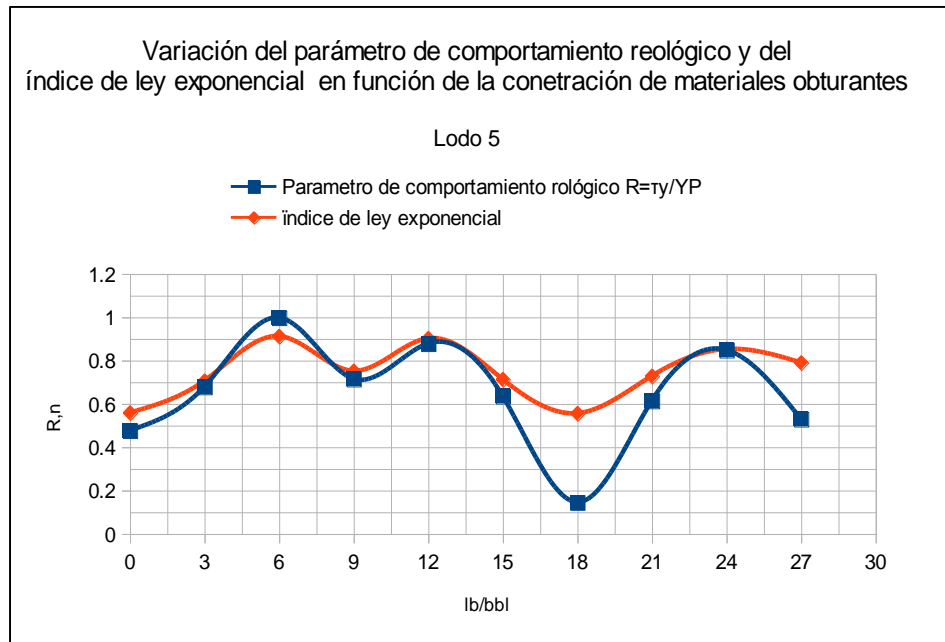


Gráfico 8.51. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 5

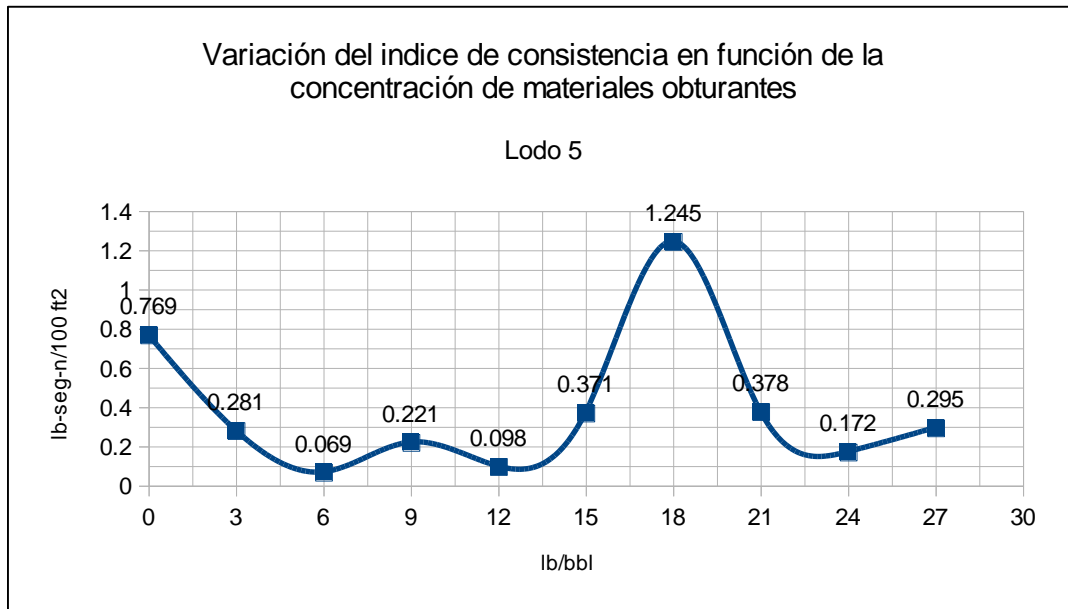


Gráfico 8.52. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 5.

Conclusiones de los gráficos anteriores.

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.48 y Gráfico 8.49):

1. El Gráfico 8.48 demuestra que los materiales obturantes presentes en el lodo 5 ejercen una acción viscosificante progresiva y que a partir de una concentración de 21 lb/bbl los datos difieren de los rangos permitidos presentados en la Figura 7.4.
2. En cuanto al punto cedente real se concluye que los datos generados están dentro de los rangos establecidos en la Figura 7.3.

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.50):

1. Los LCM's presentes en el lodo 5 producen un esfuerzo de gel no instantáneo, puesto que los valores de esfuerzo de gel a 10 seg varían poco con respecto a la medición del dial a 3RPM.

2. El esfuerzo de gel no es instantáneo pero si progresivo, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es significativa. A partir de una concentración de 21 lb/bbl el comportamiento progresivo es más agudo, lo anterior se ve reflejado en la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg.

Conclusiones referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.51 y Gráfico 8.52):

1. El Gráfico 8.51 demuestra que el comportamiento reológico general del lodo 5 se asemeja a un fluido pseudoplástico representado por el índice de ley exponencial, el cual es menor a uno en el intervalo de concentración de LCM, lo anterior se refuerza con el parámetro de comportamiento reológico R cuyos valores están por debajo de la unidad indicando que el punto cedente real es menor al punto cedente de Bingham.
2. En general el lodo 5 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 18 lb/bbl, en donde el exponente es menor ($n=0.556$) y el valor del índice de consistencia es mayor ($K=1.245 \text{ lb seg}^{0.556}/100 \text{ ft}^2$).

8.5.2 FILTRADO LODO 5

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 5 los resultados se presentan en la tabla 8.31:

Tabla 8.31. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 5.

Lodo 5						Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de magma fiber g/L	Concentración de cascarilla de café g/L	Concentración de celofán g/L	Concentración de mica g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	espesor de revoque	% Reducción de filtrado
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	15.4	1.80	0.00%
2	2.45	2.45	2.45	9.78	6	13.8	2.00	10.39%
4	4.89	4.89	4.89	19.56	12	13.6	2.00	11.69%
6	7.34	7.34	7.34	29.34	18	13.4	2.00	12.99%
8	9.78	9.78	9.78	39.12	24	13.5	2.05	12.34%
10	12.23	12.23	12.23	48.91	30	13.4	2.20	12.99%

En el Gráfico 8.53 y Gráfico 8.54 se presentan la variación del filtrado y la variación del espesor del revoque en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 5.

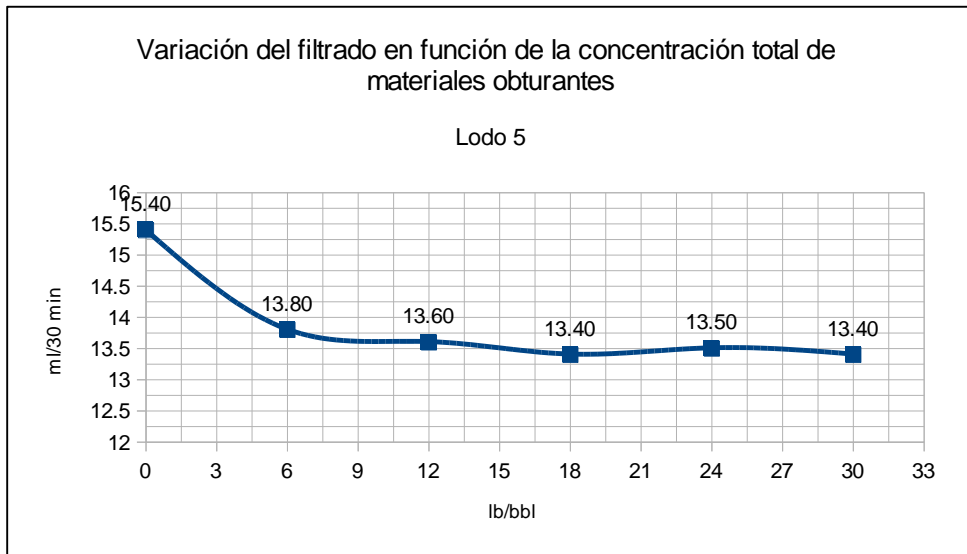


Gráfico 8.53. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 5

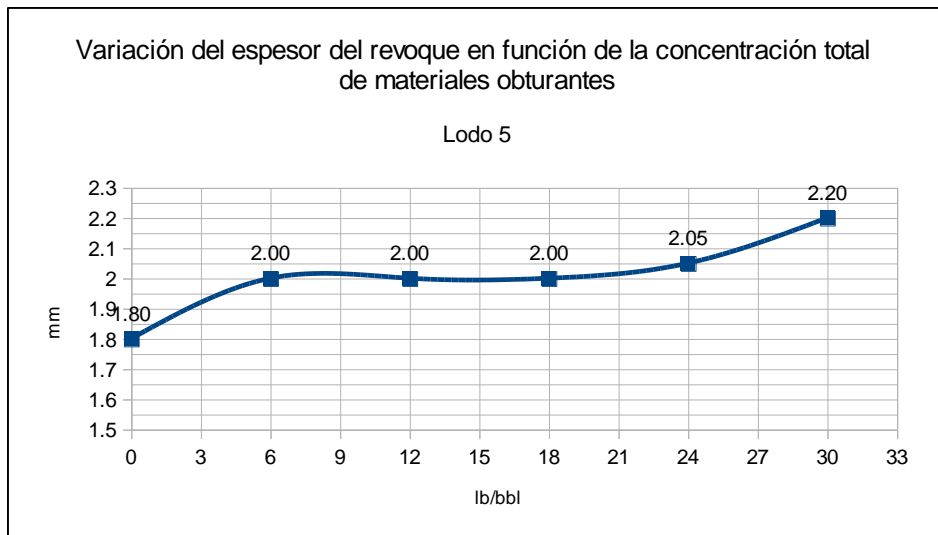


Gráfico 8.54. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 5.

De acuerdo a la Tabla 8.31 y al Gráfico 8.53 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a la

concentración de 18 lb/bbl con una reducción de un 12.99%, sin embargo es de tomar en cuenta que los ml de filtrado relativamente menores en comparación a los lodos anteriores se debe no solo a la combinación de materiales puenteantes sino también a la presencia de una mayor cantidad de bentonita.

El Gráfico 8.54 muestra la variación del espesor del revoque, el cual no sobrepasa el límite planteado en el capítulo 7 (un máximo de 2.20 mm a una concentración de 20 lb/bbl) que es de 3 mm, no obstante los revoques obtenidos a partir de una concentración de 18 lb/bbl mostraron tener mayor firmeza.

Tabla 8.32. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 5.

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	Aceptable hasta 21 lb/bbl, a una concentración mayor excede los límites propuestos en la Figura 7.4.
Punto cedente real	No hay restricciones, el punto cedente obtenido en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.3.
Esfuerzo de gel	Tiene valores de gel medios debido a la presencia de sólidos esparcidos en el lodo, a una concentración de 21 lb/ bbl el esfuerzo de gel tiende a crecer de manera progresiva.
Parámetros de limpieza de pozo (n,K)	En general el lodo 5 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 18 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.556) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=1.245 lb seg ^{0.556} /100 ft ²).
Prueba de filtrado	Filtrados bajos en comparación a los demás lodos por una mayor cantidad tanto de materiales obturantes (hasta 30 lb/bbl) como de bentonita.

Criterio	Restricciones u observaciones
Espesor de revoque	A partir de una concentración de 18 lb/bbl el revoque es más firme y cumple con el límite de espesor, el cual es de 3 mm
<i>Concentración propuesta</i>	<i>18 lb/bbl</i>

8.5.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 5

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 18 lb/bbl y son presentadas en Tabla 8.33.

Tabla 8.33. Pruebas químicas realizadas al lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.90	1.90	1.95	1.92	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.75	2.70	2.70	2.72	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.90	2.95	2.90	2.92	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	1020.00	960.00	900.00	960.00	-
OH ⁻ (ppm)	357.00	374.00	408.00	379.67	-
Contenido de cloruros (mg/l)	550.00	550.00	550.00	550.00	0-5000
pH	11.66	11.60	11.60	11.62	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	20.66	20.61	20.87	20.71	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal, sin embargo cuando el pH supera un valor de 11.40 se recomienda tratar únicamente con yeso (API, Manual de

Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (11.62) y de la alcalinidad Pf (1.92) obteniendo un valor de **1.00 lb de cal/bbl**.

8.5.4 CARACTRIZACION DEL LODO 5

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 5 a la concentración escogida de 18 lb/bbl se procede a:

6. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.34).
7. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 5 a la concentración de 18 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.30.
8. Mostrar la composición del lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl (Tabla 8.35).
9. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 5.
10. Sugerir los usos posibles del lodo 5 en plataforma de perforación.

Tabla 8.34. Caracterización del lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	16 cp
Punto cedente	4.065lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	15 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	39 lb/100 ft ²
Filtrado	13.4 ml
Espesor de revoque	2.00 mm
Densidad	9.0 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.92, 2.7 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.92 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	11.62
MBT	20.71
Contenido de cloruros	550 ppm

Gráfico 8.55. Curva reológica logarítmica para el lodo 5 a una concentración de 18 lb/bbl de LCM's

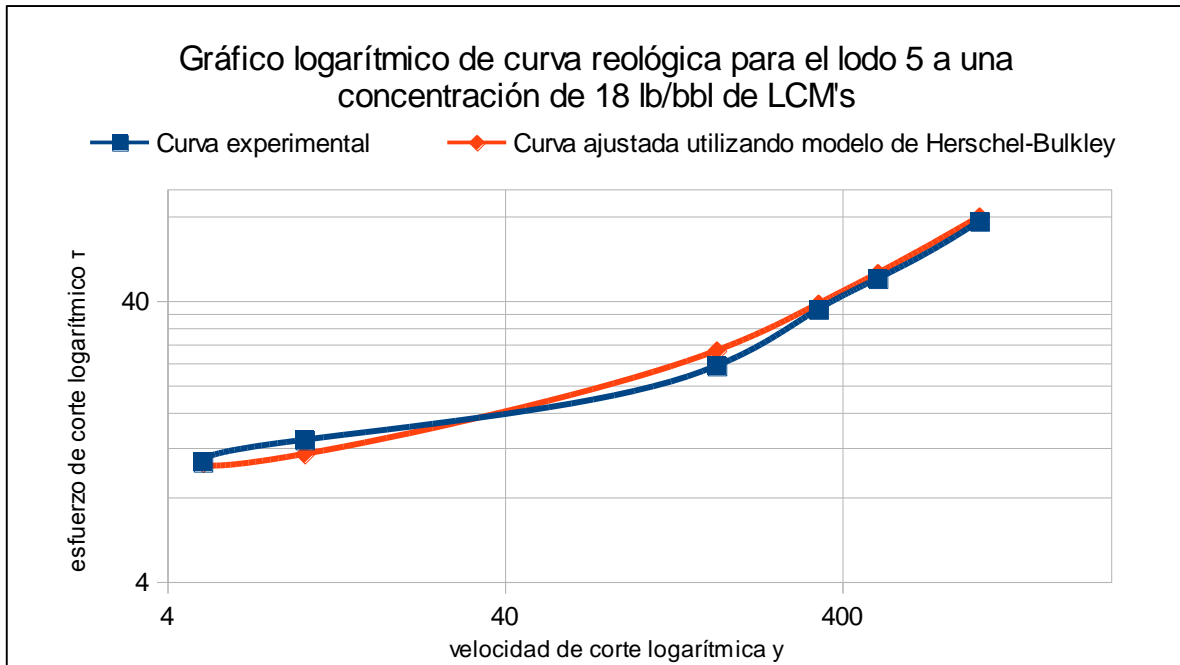


Tabla 8.35. Composición de lodo 5 a una concentración propuesta de materiales obturantes de 18 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000.00	89.78%
Bentonita	58.57	5.26%
NaOH	1.00	0.09%
Yeso	2.85	0.26%
Magma Fiber	7.34	0.66%
Cascarilla de café	7.34	0.66%
Celofán	7.34	0.66%
Mica	29.36	2.64%
Total	1111.95	100%

Comentario lodo 5

En conclusión se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo bentonítico:

1. Modifica las propiedades reológicas del fluido, especialmente a una concentración de 21 lb/bbl.
2. Posee características aceptables de limpieza del pozo, por lo que puede ser utilizado en profundidades mayores.
3. A concentraciones mayores a 18 lb/bbl el revoque tiene una mejor consistencia
4. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

Tratamiento correctivo en pérdidas parciales de hasta 250 bbl/hr.

8.6 LODO 6. MATERIALES OBTURANTES Y ADITIVOS INVOLUCRADOS: GRANZA DE ARROZ, CASCARA DE NUEZ, CARBÓN FINO, CARBOXIMETILCELULOSA, ACEITE VEGETAL. TOMADO DE PATENTE EUA NO. 5, 599,776 (1998.)

8.6.1 REOLOGÍA LODO 6

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 6, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.36.

Tabla 8.36. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 6.

Lodo 6		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	23	17	13	7	2	1
1	2	25	19	16	12	9	9
2	4	32	24	19	14	9	9
3	6	42	35	25	20	18	18
4	8	55	45	36	30	20	20
5	10	61	51	45	35	25	25
6	12	72	62	55	45	28	28
7	14	80	70	65	53	30	30
8	16	89	78	69	58	33	30
9	18	95	83	75	63	34	31
10	20	102	90	85	69	34	32

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 2 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl.

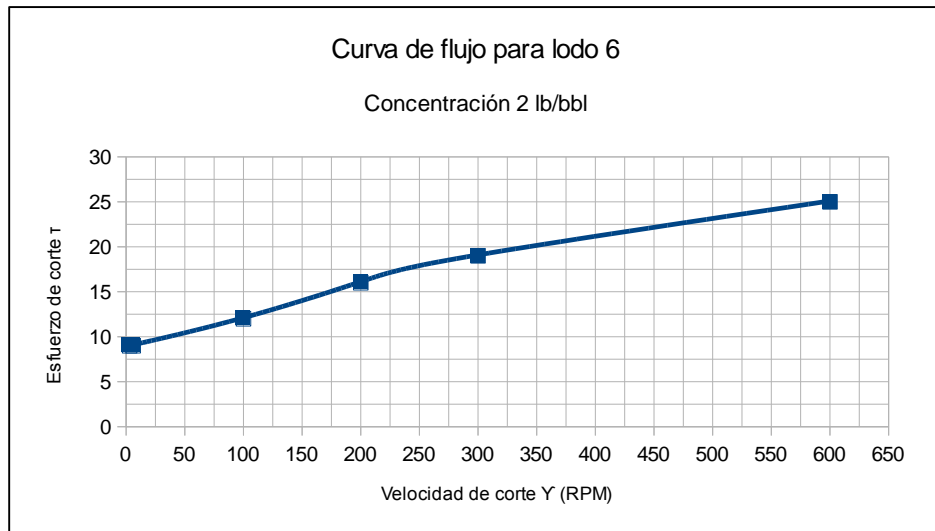


Gráfico 8.56. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.

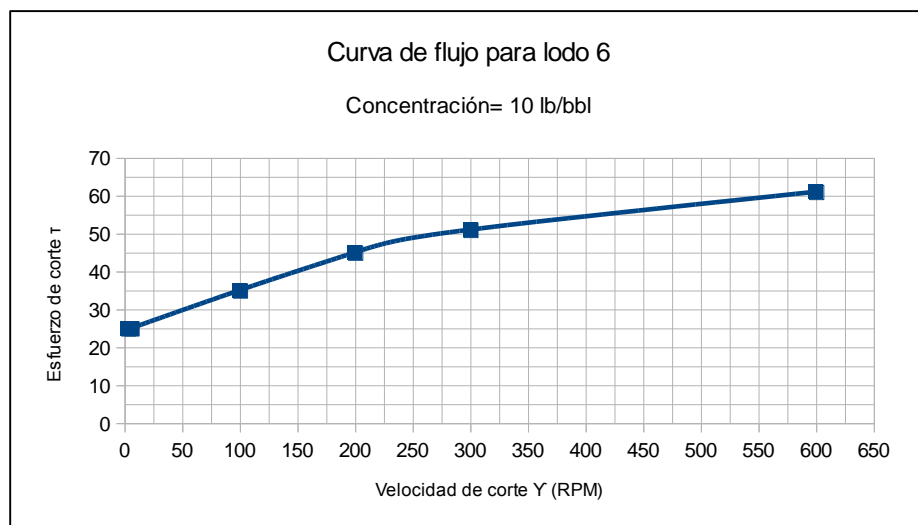


Gráfico 8.57. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes

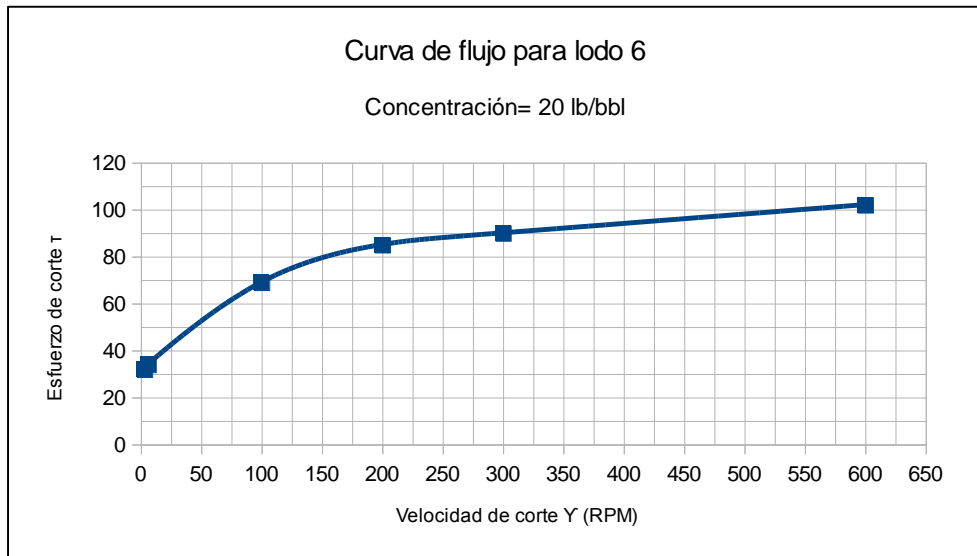


Gráfico 8.58. Curva de flujo para el lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 6 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real, índice de ley exponencial, índice de consistencia y esfuerzos de gel.

Tabla 8.37. Propiedades reológicas para el lodo 6.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft2)	Punto cedente real τ_y(lb/100 ft2)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Índice de ley exponencial n	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	6	11	2.039	0.185	0.643	0.514	6	17
1	2	6	13	8.701	0.669	0.196	0.678	21	22
2	4	8	16	7.972	0.498	0.408	0.616	19	22
3	6	7	28	15.112	0.540	1.100	0.497	22	32
4	8	10	35	17.448	0.499	1.676	0.485	25	33
5	10	10	41	22.660	0.553	2.045	0.469	28	35
6	12	10	52	22.507	0.433	5.036	0.372	25	30
7	14	10	60	21.429	0.357	8.312	0.322	26	35
8	16	11	67	17.625	0.263	12.458	0.282	28	34
9	18	12	71	18.157	0.256	13.167	0.285	29	37
10	20	12	78	14.102	0.181	17.121	0.263	30	40

En los gráficos 8.59-8.63 se presentan las tendencias de variación de viscosidad plástica, punto cedente real, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturantes.

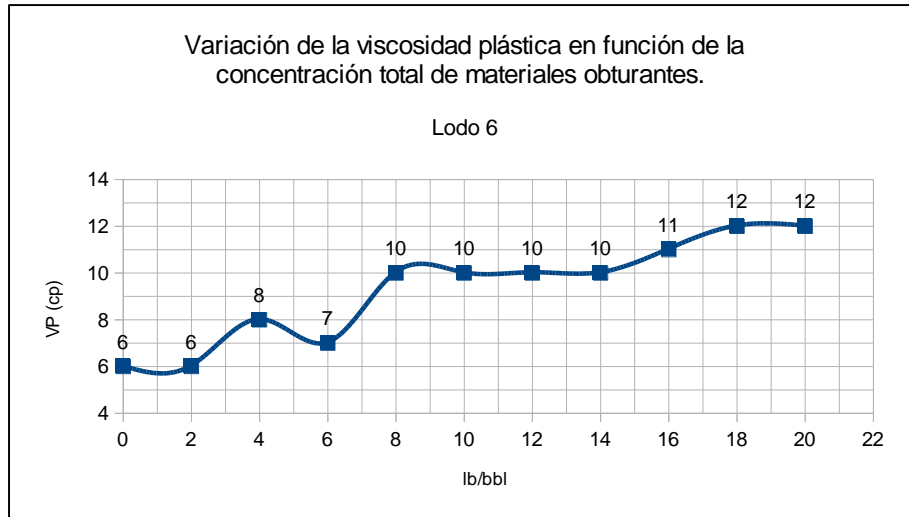


Gráfico 8.59. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.

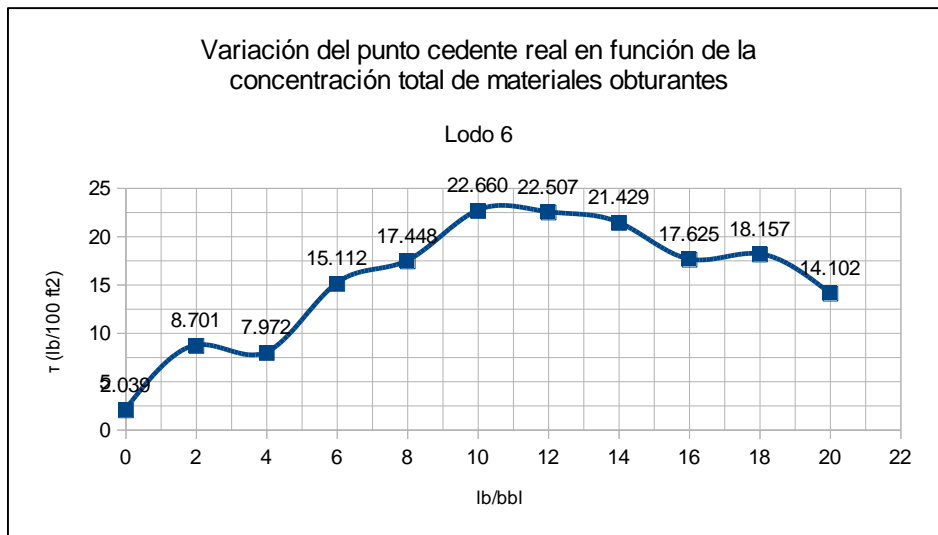


Gráfico 8.60. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.

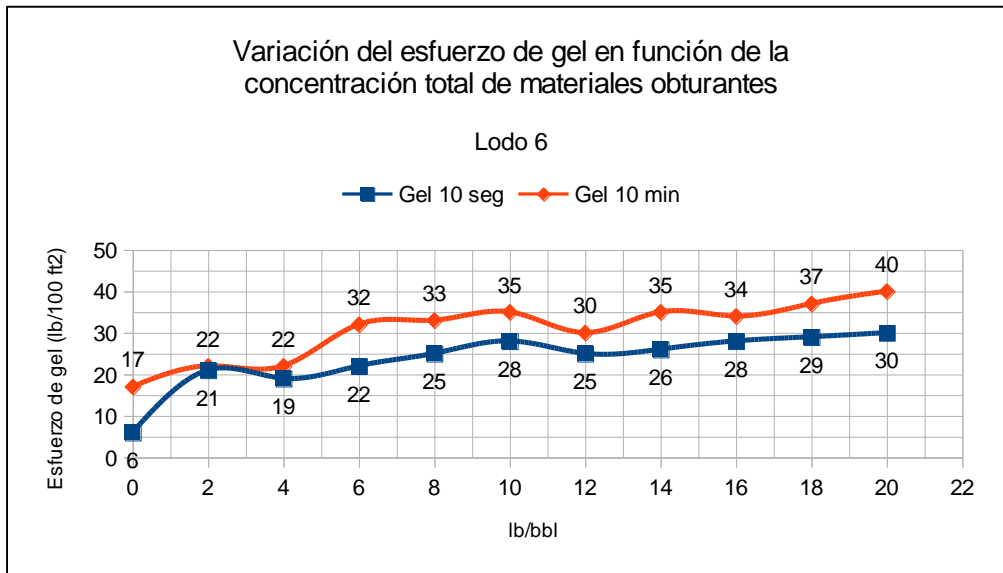


Gráfico 8.61. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 6.

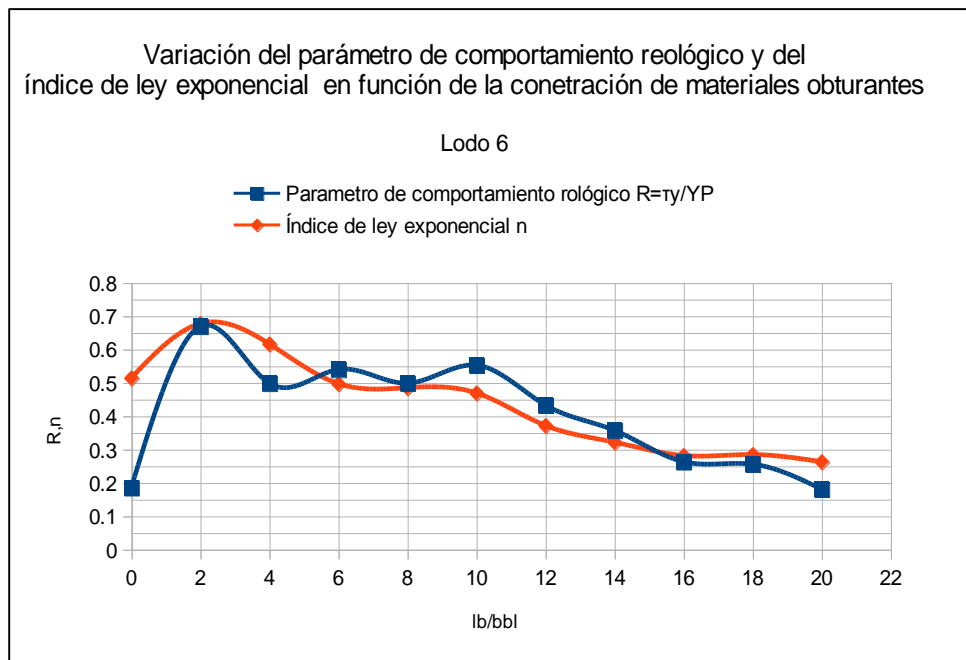


Gráfico 8.62. Variación de R y n en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 6

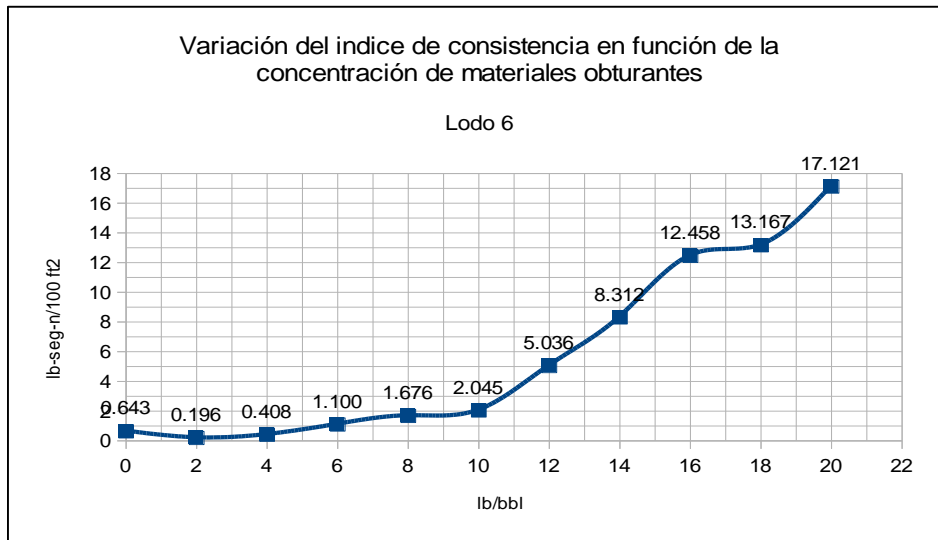


Gráfico 8.63. Variación de índice consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 6.

Conclusiones referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.59 y Gráfico 8.60)

1. El Gráfico 8.59 demuestra que los materiales obturantes y agentes químicos presentes en el lodo 6 no ejercen una acción viscosificante sobre fluido, esto se refleja en el hecho de que los datos de viscosidad plástica están dentro de los rangos permitidos de la Figura 7.4
2. En cuanto al punto cedente real (Gráfico 8.60) se concluye que los datos generados están dentro de los rangos establecidos en la Figura 7.3

Conclusiones referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.61):

1. Los LCM's presentes en el lodo 6 producen un esfuerzo de gel instantáneo, puesto que los valores de esfuerzo de gel a 10 seg varían considerablemente con respecto a la medición del dial a 3RPM, sin embargo la fuerza necesaria para romper la circulación es aceptable.

2. El esfuerzo de gel es instantáneo pero es plano, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es poca y prácticamente constante, esta es una característica excelente puesto que significa que el lodo permanece estable asegurando un retorno de lodo aun en paro de operaciones.

Conclusiones referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.62 y Gráfico 8.63):

1. El Gráfico 8.62 demuestra que el comportamiento reológico general del lodo 6 se asemeja a un fluido pseudoplástico representado por el índice de ley exponencial, el cual es menor a uno en el intervalo de concentración de LCM, lo anterior se refuerza con el parámetro de comportamiento reológico R cuyos valores están por debajo de la unidad indicando que el punto cedente real es menor al punto cedente de Bingham.
2. En términos generales el lodo 6 tiene capacidades excelentes en cuanto a limpieza de pozo se refiere dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.1 y 0.6) sumado a índices de consistencia (K) altos, principalmente entre 12-20 lb/bbl. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.263) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=17.121 lb seg^{0.263}/100 ft²).

8.6.2 FILTRADO LODO 6

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 6 los resultados se presentan en la tabla 8.38:

Tabla 8.38.Datos para el análisis de filtrado. Lodo 6.

Lodo 6							Prueba de filtrado		
Punto	Concentración de granza de arroz g/L	Concentración de cascara de nuez g/L	Concentración de carbón fino g/L	Concentración de carboximetilcelulosa g/L	Concentración de aceite vegetal g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque	% Reducción del filtrado
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	17.60	1.00	0.00%
2	9.45	1.32	0.43	0.05	0.17	4	14.80	1.40	15.91%
4	18.90	2.65	0.87	0.09	0.34	8	14.60	1.40	17.05%
6	28.35	3.97	1.30	0.14	0.51	12	14.00	1.50	20.45%
8	37.79	5.29	1.73	0.18	0.68	16	14.00	1.70	20.45%
10	47.24	6.62	2.17	0.23	0.86	20	14.00	1.95	20.45%

En los Gráfico 8.64 y Gráfico 8.65 se presentan la variación del filtrado y la variación del espesor del revoque en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 6.

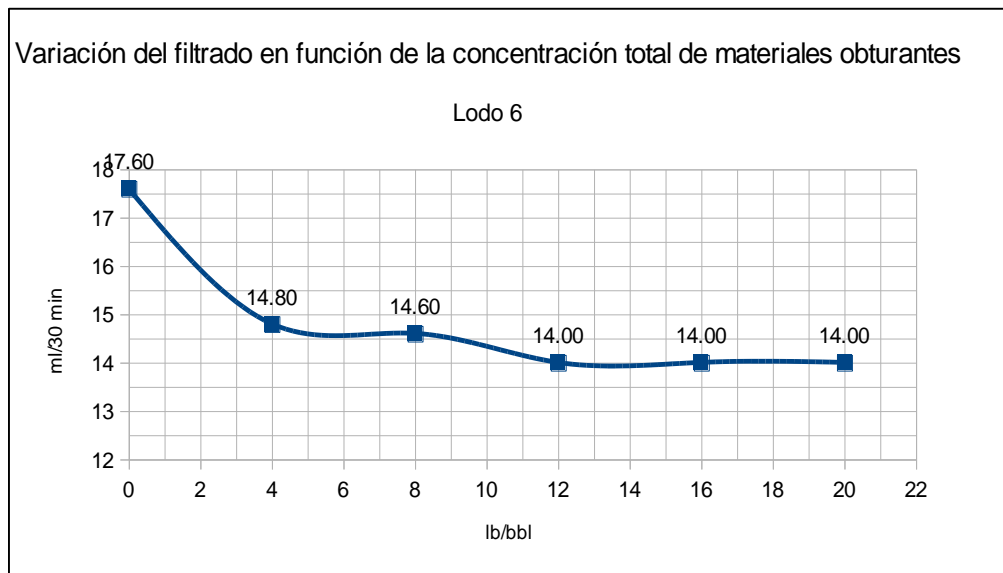


Gráfico 8.64. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 6

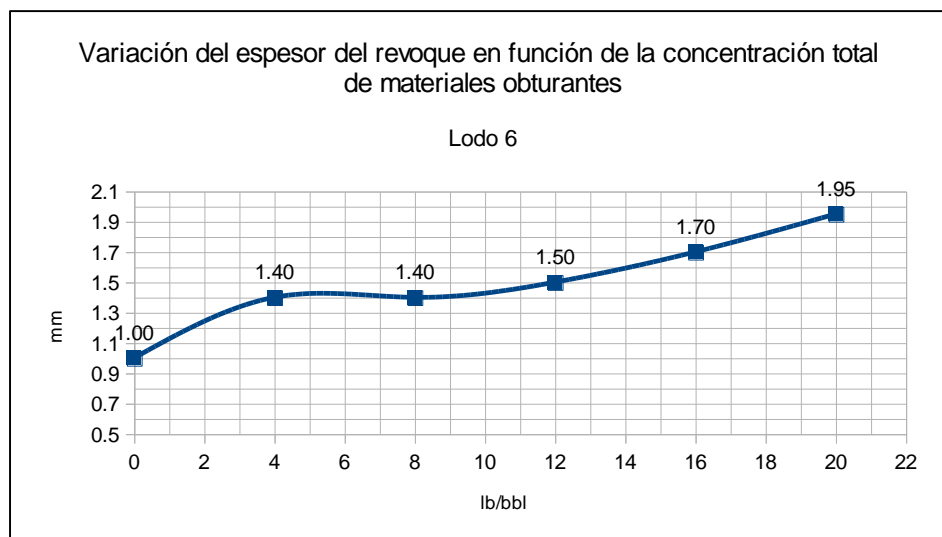


Gráfico 8.65. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 6.

De acuerdo a la Tabla 8.38 y al Gráfico 8.64 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a la

concentración de 12 lb/bbl con una reducción de un 20.54% (nótese que el filtrado no varía desde esa concentración), el resultado es muy bueno sobre todo porque el principal material obturante es la granza de arroz, la cual es mucho más económica que la gran mayoría de materiales obturantes.

El Gráfico 8.65 muestra la variación del espesor del revoque, el cual no sobrepasa el límite planteado en la sección 7.1.4 que es de 3 mm; es importante mencionar que los revoques obtenidos en este lodo resultaron ser bastante firmes y con un espesor pequeño.

Tabla 8.39. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 6

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	No hay restricciones, la viscosidad plástica obtenida en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4
Punto cedente	No hay restricciones, el punto cedente obtenido en cada una de las concentraciones no excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.3
Esfuerzo de gel	Excelente resultado, el esfuerzo de gel se manifiesta como un gel casi plano es decir estable con el tiempo.
Parámetros de limpieza de pozo (n,K)	En términos generales el lodo 6 tiene capacidades excelentes en cuanto a limpieza de pozo se refiere dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.1 y 0.6) sumado a índices de consistencia (K) altos, principalmente entre 12-20 lb/bbl. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.263) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=17.121 lb seg ^{0.263} /100 ft ²).
Prueba de filtrado	El filtrado es constante a partir de una concentración de 12lb/bbl
Espesor de revoque	Revoques firmes y delgados, lo cual representa otro punto a favor de este lodo.
<i>Concentración propuesta</i>	<i>20 lb/bbl</i>

8.6.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 6

Las pruebas químicas se realizaron a la concentración propuesta de 20 lb/bbl y se presentan en la Tabla 8.40.

Tabla 8.40. Pruebas químicas realizadas al lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.6	1.85	1.82	1.76	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.63	2.7	2.77	2.7	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02N H ₂ SO ₄)	2.8	2.7	2.9	2.8	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ⁻² (ppm)	1236.00	1020.00	1140.00	1132.00	-
OH ⁻ (ppm)	193.80	340.00	295.80	276.53	-
Contenido de cloruros (mg/l)	750	600	800	720	0-5000
pH	10.65	10.60	10.57	10.61	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	17.75	17.66	17.98	17.80	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (10.61) y de la alcalinidad Pf (1.76) obteniendo un valor de **0.51 lb/bbl**.

8.6.4 CARACTERIZACION DEL LODO 6

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 6 a la concentración escogida de 20 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.41).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 6 a la concentración de 20 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la Tabla 8.37.
3. Mostrar la composición del lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl (Tabla 8.42).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 6.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 6 en plataforma de perforación.

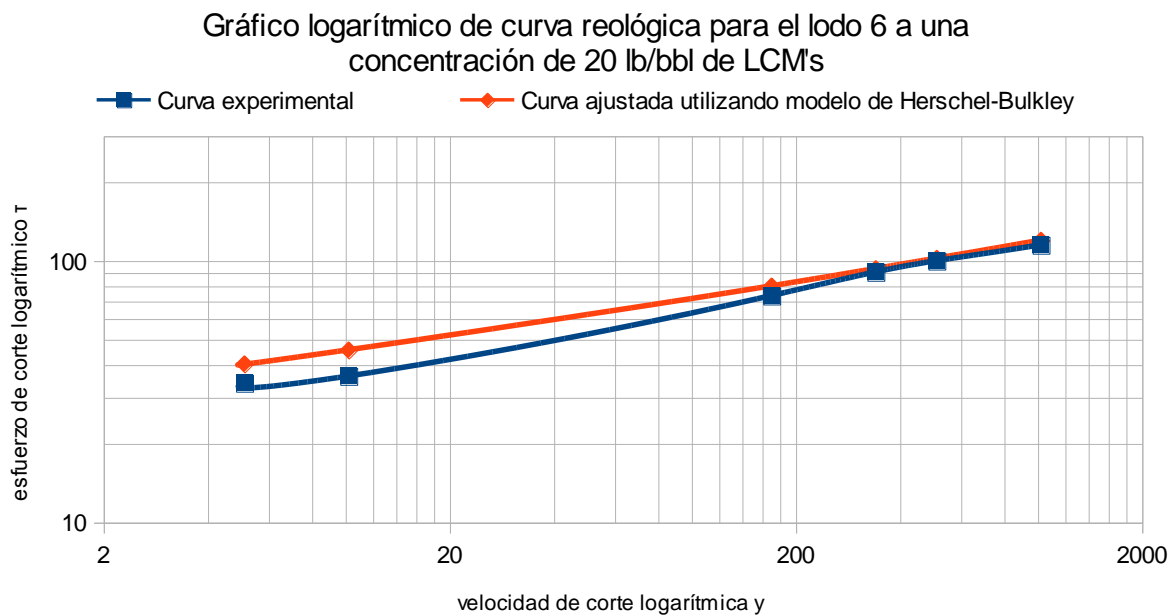
Tabla 8.41. Caracterización del lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	12 cp
Punto cedente	14.102 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	30 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	40 lb/100 ft ²
Filtrado	14.0 ml
Espesor de revoque	1.95 mm
Densidad	8.6 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.76, 2.7 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.80 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	10.61
MBT	17.80
Contenido de cloruros	720 ppm

Tabla 8.42. Composición del lodo 6 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000.00	90.12%
Bentonita	50.42	4.54%
NaOH	0.67	0.06%
Yeso	1.46	0.13%
Granza de arroz	47.24	4.26%
Cascara de nuez	6.62	0.60%
Polypac	0.23	0.02%
Aceite vegetal	0.83	0.07%
Grafito	2.17	0.20%
Total	1109.64	100%

Gráfico 8.66. Curva reológica logarítmica para el lodo 6 a una concentración de 20 lb/bbl de LCM's



Comentarios lodo 6

Se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo 6:

1. Presenta un esfuerzo de gel plano, el cual es una característica excelente puesto que el valor del esfuerzo de gel cambia muy poco con el tiempo.
2. Posee buenas propiedades de limpieza de lodo.
3. Presenta excelentes reducciones de filtrado.
4. Ofrece revoques finos y más firmes en comparación a los 5 lodos anteriores.
5. Resulta ser muy económica debido a que el principal material obturante es la granza de arroz.
6. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamiento correctivo en pérdidas parciales de hasta 250 bbl/hr.*

**8.7 LODO 7. LODO DE INYECCIÓN DE POLÍMERO ENTRECruzADO.
MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: FORM A SET.**

8.7.1 REOLOGÍA LODO 7

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 7, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.43.

Tabla 8.43. Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 7.

Lodo 7		Datos para la generación de gráficos.					
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	30	19	16	11	5	5
1	2	73	30	15	10	5	5
2	4	79	39	26	15	5	5
3	6	80	33	25	18	5	4
4	8	82	45	32	20	5	5
5	10	96	42	32	23	6	5
6	12	125	74	51	35	10	7
7	14	125	70	52	37	10	7
8	16	127	70	55	38	9	7

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 2 lb/bbl, 6 lb/bbl, 10 lb/bbl y 14 lb/bbl.

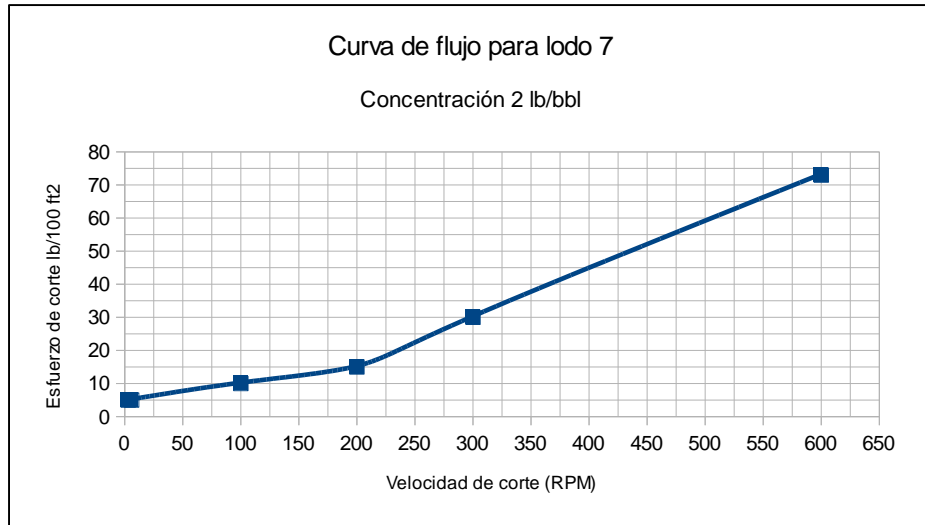


Gráfico 8.67. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 2 lb/bbl de materiales obturantes.

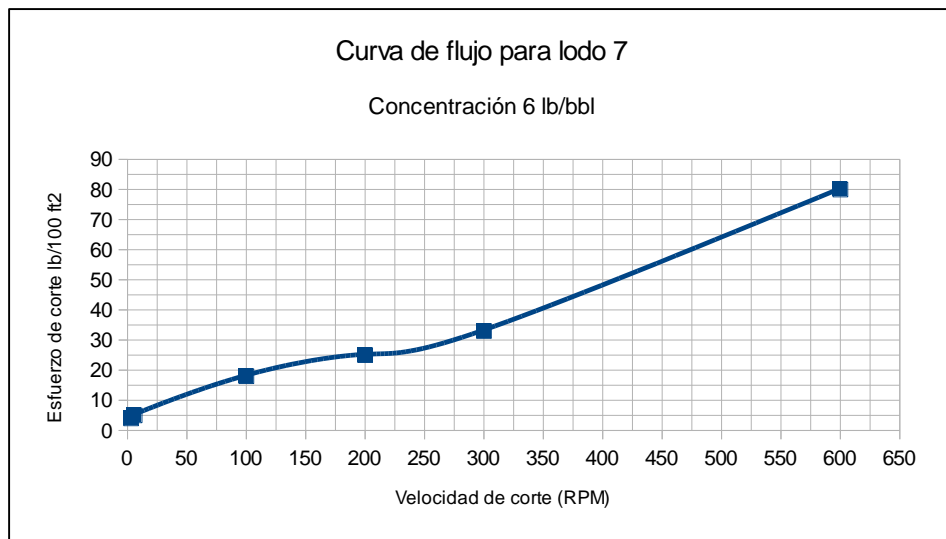


Gráfico 8.68. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 6 lb/bbl de materiales obturantes.

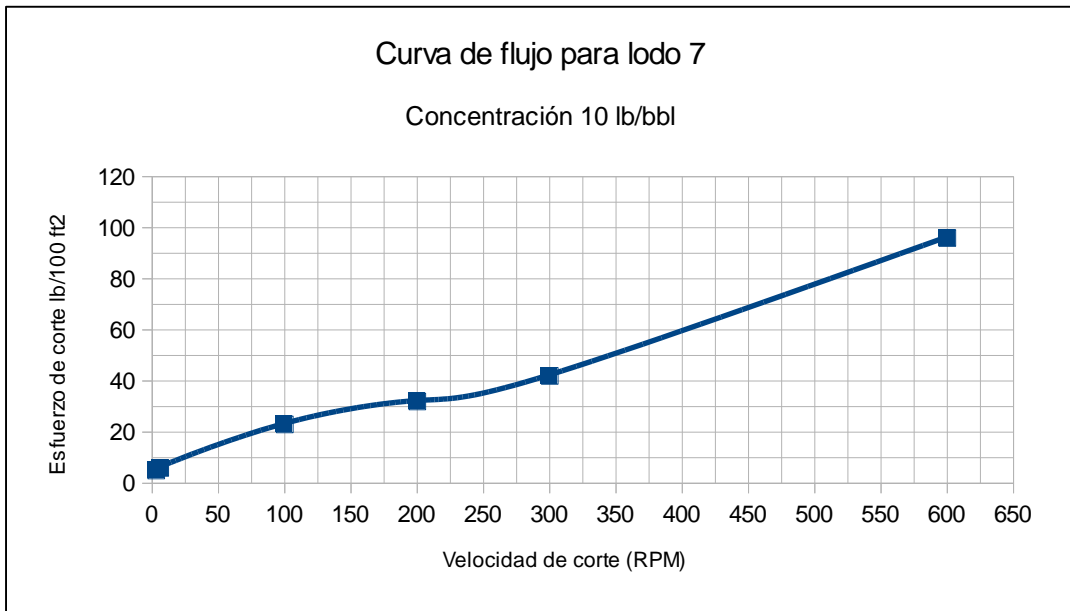


Gráfico 8.69. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.

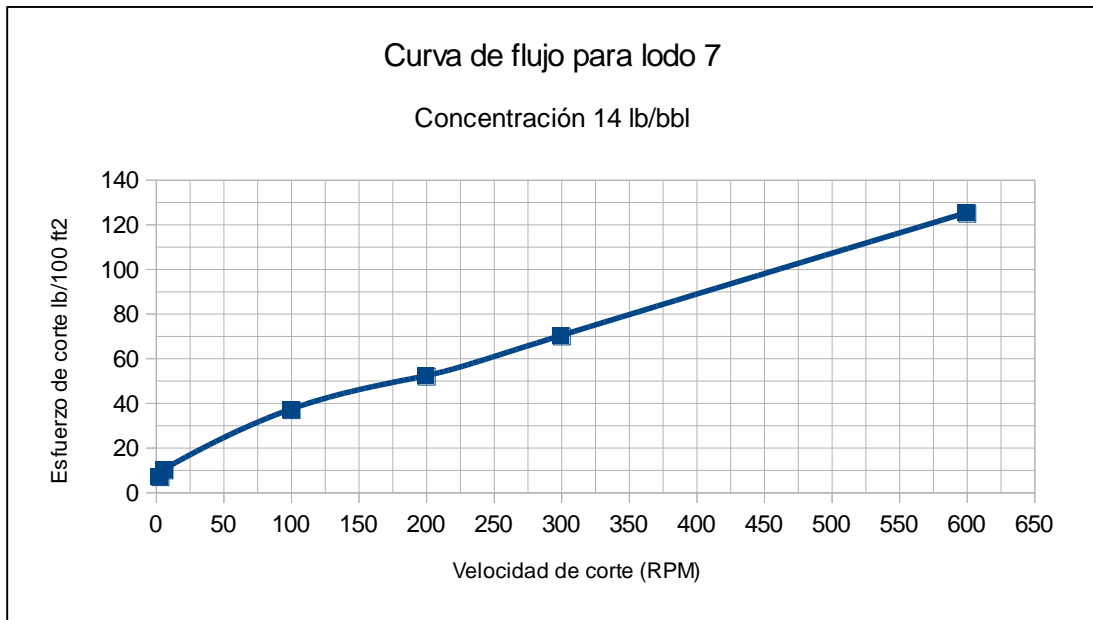


Gráfico 8.70. Curva de flujo para el lodo 7 a una concentración de 14 lb/bbl de materiales obturantes.

Conclusión: Observando los gráficos anteriores se concluye que a medida que la concentración de Form-A-Set aumenta, las curvas de flujo pasan de un flujo dilatante a un flujo pseudoplástico, de hecho para concentraciones entre 6-10 lb/bbl la curva está seccionada, por un lado a altas velocidades de corte (más de 200 rpm) el fluido se comporta como un fluido dilatante, mientras que a bajas velocidades de corte (menores a 200 rpm) el fluido se comporta como un fluido pseudoplástico, en ese sentido la generación de parámetros reológicos será realizada excluyendo los datos de esfuerzo de corte a altas velocidades (datos obtenidos a partir de una velocidad angular superior a 200 rpm), lo anterior está fundamentado en el hecho de que el análisis reológico es más importante a bajas velocidades de corte puesto que a esas velocidades de corte ocurre la limpieza del pozo.

Con el planteamiento anterior se procede a utilizar el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, con la restricción de analizar únicamente los datos obtenidos a una velocidad de corte inferior a 200 rpm, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las expuestas en la sección 6.3.4

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, punto cedente real, índice de ley exponencial, índice de consistencia y esfuerzos de gel.

Tabla 8.44. Propiedades reológicas para el lodo 8.

Propiedades Reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft2)	Punto cedente real τ_y(lb/100 ft2)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Índice de ley exponencial	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	11	8	1.786	0.223	0.119	0.874	2	17
1	2	43	-13	1.878	-0.144	0.055	1.000	4	12
2	4	40	-1	1.673	-1.673	0.061	1.070	5	16
3	6	47	-14	-0.069	0.005	1.044	0.553	5	14
4	8	37	8	1.362	0.170	0.264	0.848	6	17
5	10	54	-12	0.339	-0.028	1.376	0.559	5	18
6	12	51	23	1.408	0.061	1.691	0.600	5	22
7	14	55	15	1.055	0.070	2.441	0.541	5	18
8	16	57	13	1.435	0.110	1.836	0.599	6	15

En los gráficos 8.71-8.74 se presentan las tendencias de variación de viscosidad plástica, punto cedente real, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturante

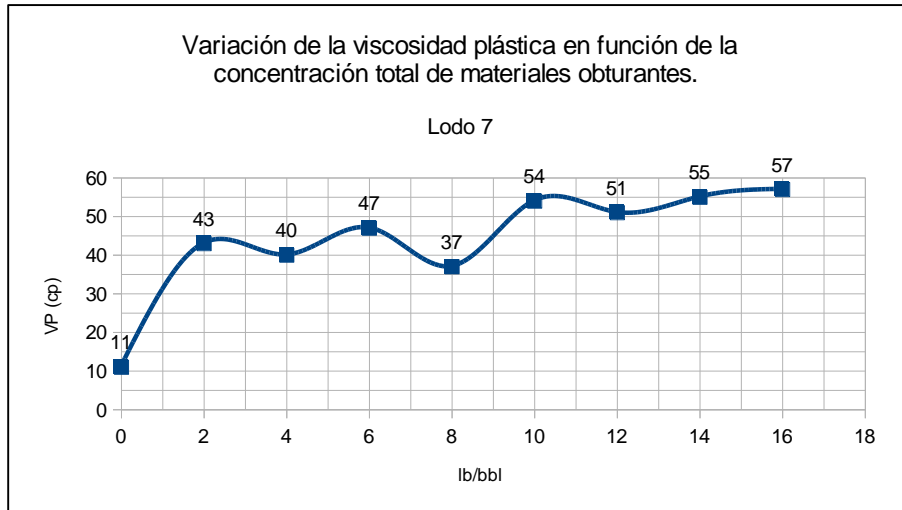


Gráfico 8.71. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.

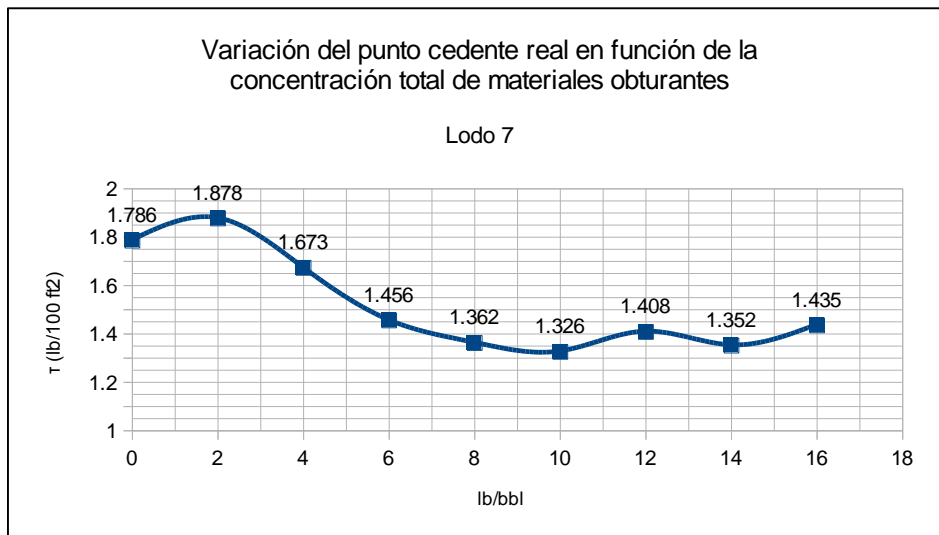


Gráfico 8.72. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.

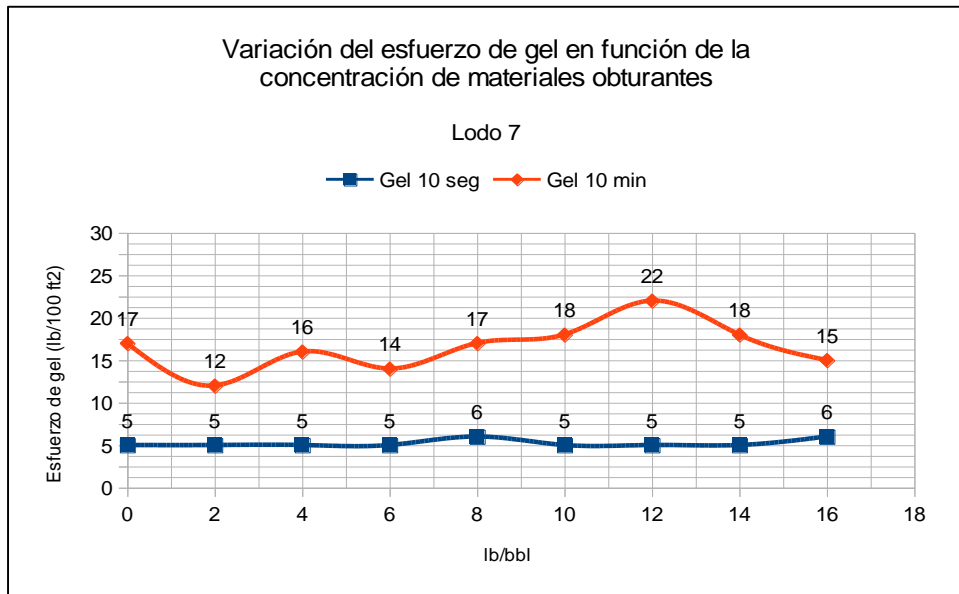


Gráfico 8.73. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 7.

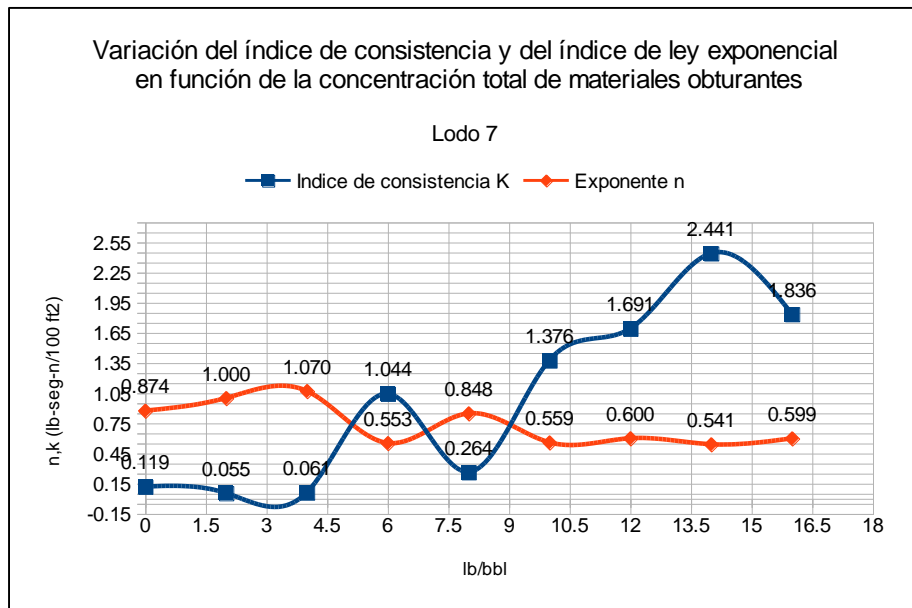


Gráfico 8.74. Variación de k y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 7.

Comentarios de los gráficos anteriores.

Comentarios referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.71 y Gráfico 8.72):

1. El demuestra que los materiales obturantes y agentes químicos presentes en el LCM's ejercen una acción viscosificante progresiva sobre el lodo y cuyos valores se salen de los límites establecidos en la Figura 7.4, esto se debe a que el Form-A-Set está compuesto de una red de polímeros, los cuales aumentan en gran medida la viscosidad a cambio de otros beneficios como lo es el control de filtrado y el encapsulamiento del lodo.
2. En cuanto al punto cedente real, se concluye que los datos generados están dentro de los rangos establecidos en la Figura 7.3

Comentarios referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.73):

1. Los LCM's y agentes químicos presentes en el lodo 7 no producen un esfuerzo de gel instantáneo conforme se aumenta la concentración, lo antes mencionado es producto de que el Form-A-Set altera las propiedades reológicas del lodo a grandes velocidades de corte, sin embargo los parámetros a bajas velocidades de corte como el punto cedente real y los esfuerzos de gel no se ven afectados.
2. El esfuerzo de gel no es instantáneo ni progresivo, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es baja y constante, ambas características son muy deseables para un fluido de perforación, dado que se evitan varios problemas como la pega de tubería y la necesidad de utilizar más presión para romper la circulación.

Comentarios referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.74):

1. El comportamiento reológico del lodo con Form-A-Set es el más complejo de todos los lodos, debido a los polímeros inmersos en el material, los cuales ocasionan que a bajas velocidades de corte el fluido se comporte pseudoplástico, mientras que a altas velocidades el fluido se comporta de

manera dilatante a tal grado que en algunas curvas de flujo el gráfico parece estar seccionado

2. El Gráfico 8.74 demuestra que no existe un comportamiento reológico general para el lodo 7, a concentraciones bajas es un claro fluido dilatante (Gráfico 8.67), a concentraciones entre 6-10lb/bbl es un híbrido de fluido pseudoplástico y dilatante (Gráfico 8.68 y Gráfico 8.69) y a concentraciones superiores su comportamiento se asemeja más a una flujo pseudoplástico.
3. En general el lodo 7 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo a partir de una concentración de 6 lb/bbl dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 14 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.541) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=2.441 lb seg^{0.541}/100 ft²).

8.7.2 FILTRADO LODO 7

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 7 los resultados se presentan en la tabla 8.45:

Tabla 8.45. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 7.

Lodo 7			Prueba de filtrado		
Punto	Concentración DE FORM-A SET g/l	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque	% de reducción de filtrado
0	0.00	0	17.4	1.00	0.00%
2	11.41	4	10.4	1.25	40.23%
4	22.82	8	9.2	2.00	47.13%
5	28.53	12	8.2	2.00	52.87%
6	34.23	16	8.0	2.50	54.02%
8	45.65	20	7.2	2.50	58.62%

En el Gráfico 8.75 y Gráfico 8.76 se presenta la variación del filtrado y la variación del espesor del revoque en función de la concentración de materiales obturantes.

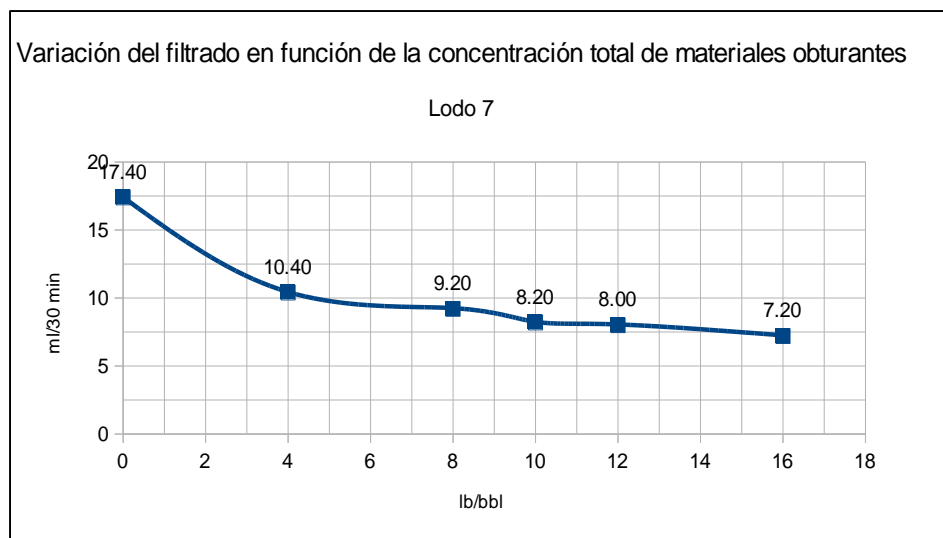


Gráfico 8.75. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 7.

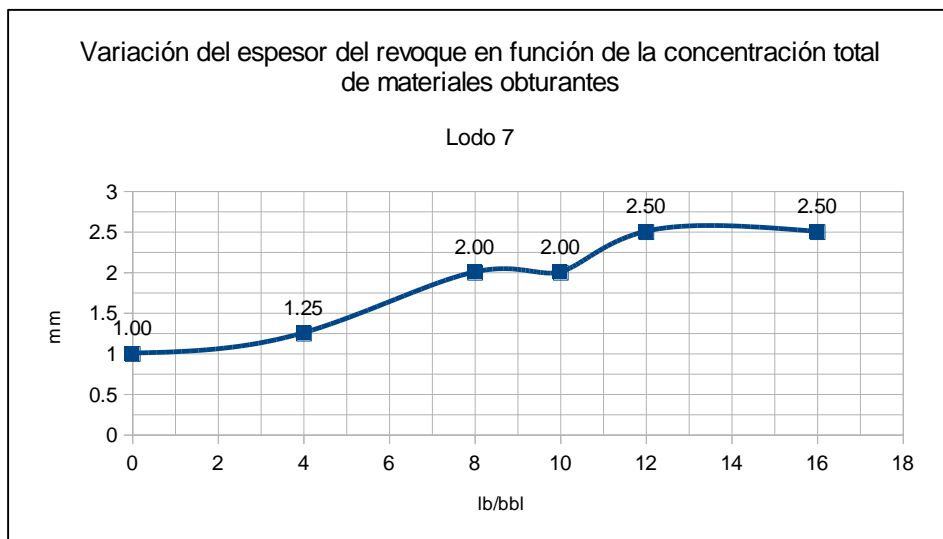


Gráfico 8.76. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 7.

De acuerdo a la Tabla 8.45 y al Gráfico 8.75 se observó que el Form-A-Set ofreció los mejores resultados en términos de reducción de filtrado (en comparación a todos los otros lodos) y que la concentración de materiales obturantes a la cual el filtrado tuvo un menor valor fue a 16 lb/bbl, logrando un valor de 7.2 ml. En cuanto al Gráfico 8.76, el cual muestra la variación del espesor del revoque, se puede concluir que todas las concentraciones cumplen con el límite establecido en la sección 7.1.4 que es de 3 mm, es importante mencionar que los revoques obtenidos en este lodo resultaron ser en muy firmes y de espesor considerablemente mayor.

Tabla 8.46. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 7.

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	Toda concentración superior a 0 lb/bbl de Form-A-Set presente en el lodo excede los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4
Punto cedente y esfuerzo de gel	El material Form-A-Set no altera las propiedades reológicas a baja velocidad de corte. El esfuerzo de gel no es instantáneo ni progresivo, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es baja y constante, ambas características son muy deseables para un fluido de perforación, dado que se evitan varios problemas como la pega de tubería y la necesidad de utilizar más presión para romper la circulación.
Parámetros de limpieza de pozo (n, K)	En general el lodo 7 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo a partir de una concentración de 6 lb/bbl dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 14 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.541) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=2.441 lb seg ^{0.541} /100 ft ²).

Criterio	Restricciones u observaciones
Prueba de filtrado	Presenta los mejores resultados en términos de reducción de filtrado. La concentración de 16 lb/bbl manifestó los mejores resultados obteniendo un filtrado de 7.2 ml, que en términos de reducción es equivalente a un 58.62%
Espesor de revoque	Revoques gruesos y firmes.
<i>Concentración propuesta</i>	<i>16 lb/bbl</i>

8.7.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 7.

Las pruebas químicas se presentan a la concentración propuesta de 16 lb/bbl y son expuestas en la Tabla 8.47.

Tabla 8.47. Pruebas químicas realizadas al lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.90	1.90	1.95	1.92	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.70	2.70	2.75	2.72	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.40	2.30	2.35	2.35	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	960.00	960.00	960.00	960.00	-
OH ⁻ (ppm)	374.00	374.00	391.00	379.67	-
Contenido de cloruros (mg/l)	550.00	550.00	500.00	533.33	0-5000
pH	9.60	9.62	9.58	9.60	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	17.87	17.64	17.56	17.69	20-35

Observación importante:

El material Form-A-Set modifica el valor del pH conforme se aumenta su concentración (ver gráfico 8.77).

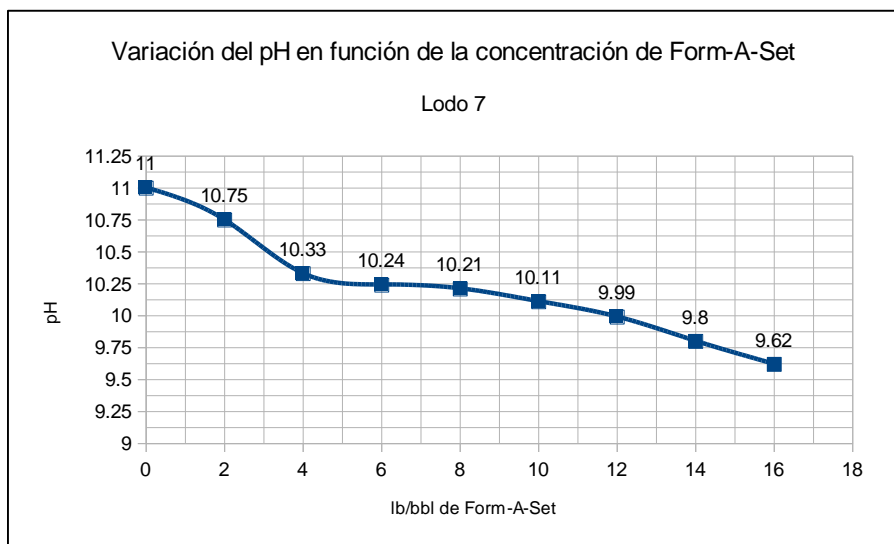


Gráfico 8.77. Variación del pH en función de la concentración de Form-A-Set.

Form-A-Set fue el único material obturante en modificar una propiedad química específicamente el pH, los problemas relacionados a un bajo pH son los siguientes:

1. El principal problema es que la bentonita no es hidratable a un pH inferior a 8.00.
2. A un pH inferior a 10 los carbonatos se transforman en bicarbonatos, los cuales irán disminuyendo progresivamente el pH.

Resultados de pruebas químicas

Con los resultados anteriores se determinó que el lodo 7 presenta dos problemas: el primero de ellos referente a la alta alcalinidad tanto de filtrado como de lodo, y el segundo es un bajo pH producto de la interacción de los agentes químicos del Form-A-Set. La primera inconveniencia se resuelve con yeso o cal, la cantidad respectiva a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (9.60) y de la alcalinidad Pf (1.92) obteniendo un valor de **0.75 lb de yeso/bbl o 0.7 lb de cal/bbl**. El segundo inconveniente se resuelve agregando hidróxido de sodio hasta alcanzar un pH de 10.5 acorde a la Figura 7.7 se tiene que la cantidad de soda cáustica extra a agregar es de 0.2 lb extra de NaOH /bbl.

8.7.4 CARACTERIZACION LODO 7

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 7 a la concentración escogida de 16 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.48).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 7 a la concentración de 16 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.44.
3. Mostrar la composición del lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl (Tabla 8.49).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 7.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 7 en plataforma de perforación.

Tabla 8.48. Caracterización del lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	57 cp
Punto cedente real	1.435 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	6 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	15 lb/100 ft ²
Índice de ley exponencial	0.599
Índice de consistencia	1.83 lb-seg ^{-0.599} /100 ft ²
Filtrado	7.2 ml
Espesor de revoque	2.50 mm
Densidad	8.6 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.92, 2.72 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.35 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	9.60
MBT	17.69
Contenido de cloruros	533.33 ppm

Gráfico 8.78. Curva reológica logarítmica para el lodo 7 a una concentración de 16 lb/bbl de LCM's.

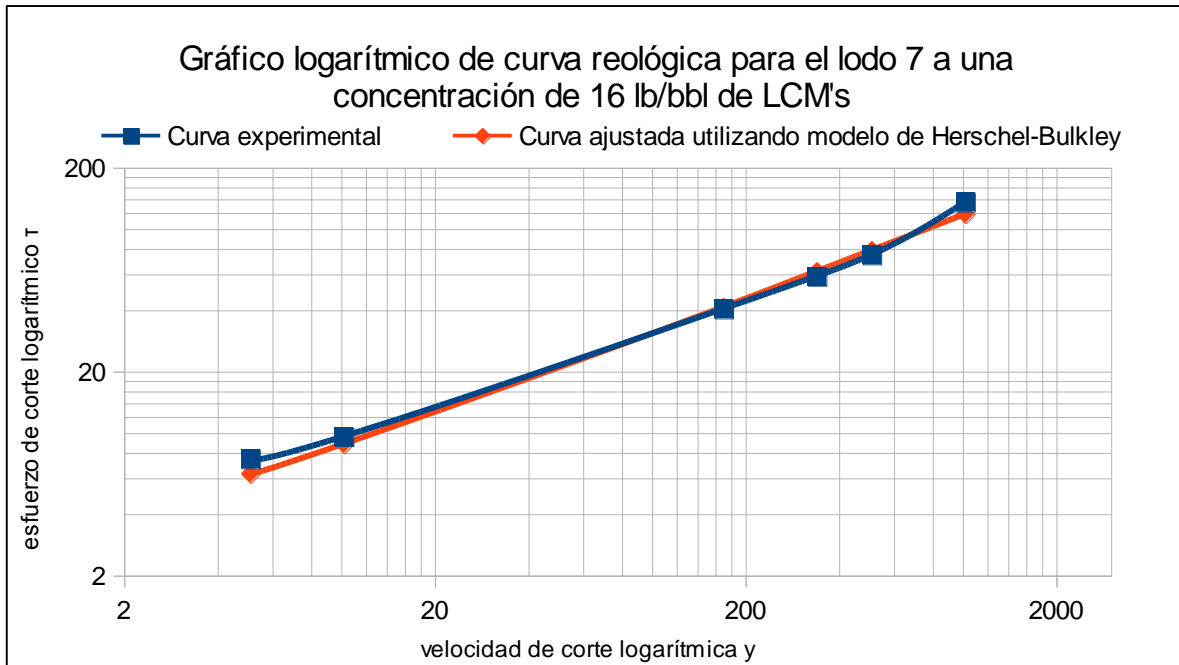


Tabla 8.49. Composición del lodo 7 a una concentración de materiales obturantes de 16 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000	90.00%
Bentonita	50.42	4.54%
NaOH	0.67	0.06%
yeso	2.92	0.26%
Form-A-Squeeze	57.06	5.14%
Total	1111.07	100.00%

Comentarios del lodo 7

En conclusión se determinó que la combinación de materiales obturantes y agentes químicos presentes en el lodo 7:

1. Modifica en gran medida la viscosidad plástica debido a los polímeros inmersos en material.
2. No modifica los parámetros reológicos correspondientes a bajas velocidades de corte (punto cedente real, esfuerzos de gel).
3. Posee características de limpieza de pozo aceptables.
4. Presenta los mejores resultados de reducción de filtrado (un máximo de 58.62%).
5. Reduce el pH conforme se incrementa la concentración.
6. Es el material más costoso de entre todos los materiales obturantes.

Recomendaciones.

1. Mantener la densidad del fluido baja.
2. Puede ser utilizado para encapsular el lodo sobre todo cuando se perforan arcillas hidratables.
3. Usarlo en formaciones cavernosas o en fracturas inducidas.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamiento correctivo en pérdidas totales.*
2. *Pérdidas en formaciones no consolidadas en las que la fuga de filtrado pueda conllevar a derrumbes.*

8.8 LODO 8. LODO DE ALTA TAZA DE FILTRADO. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: FORM A SQUEEZE.

8.8.1 REOLOGÍA LODO 8

Paso 1: Identificación del modelo reológico.

Las lecturas obtenidas utilizando un reómetro rotacional para el lodo 8, a diferentes velocidades de corte, se muestran en la Tabla 8.50.

Tabla 8.50.Datos para la generación de curvas de flujo. Lodo 8.

Lodo 8		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	0600	0300	0200	0100	06	03
0	0	33	22	18	14	9	9
1	2	33	23	20	16	10	10
2	4	39	28	24	20	13	13
3	6	45	35	31	25	17	17
4	8	51	45	39	30	21	21
5	10	65	50	45	37	28	27
6	12	63	50	45	38	29	29
7	14	98	75	67	56	43	41
8	16	110	81	70	59	45	45
9	18	120	90	79	65	47	47
10	20	145	120	100	75	52	52

Para determinar el modelo reológico es necesario realizar gráficos de curva de flujo del fluido, a continuación se realizan las respectivas curvas a las concentraciones de 0 lb/bbl, 10 lb/bbl y 20 lb/bbl

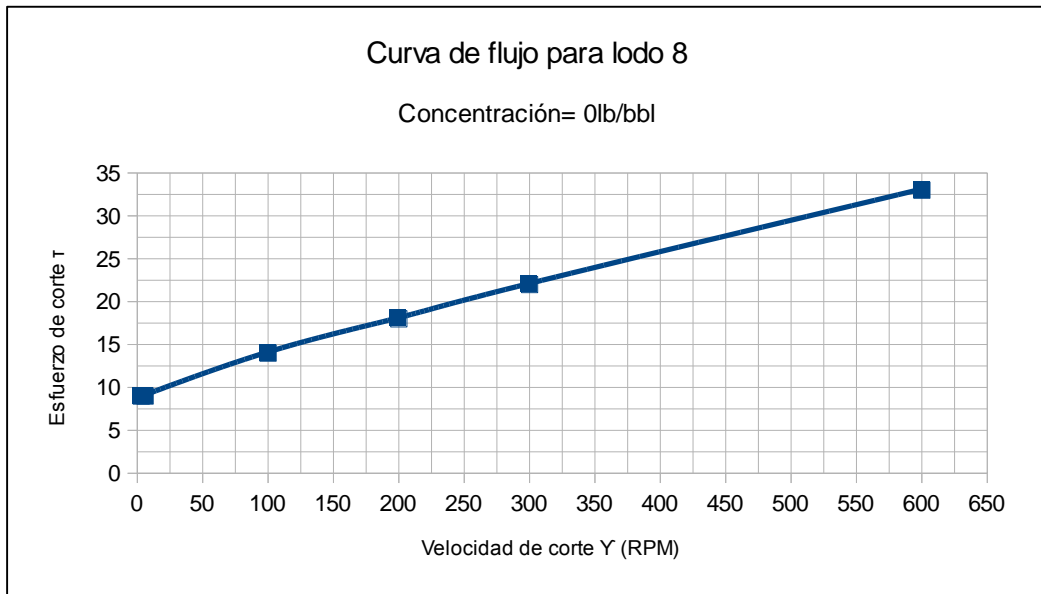


Gráfico 8.79. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 0 lb/bbl de materiales obturantes.

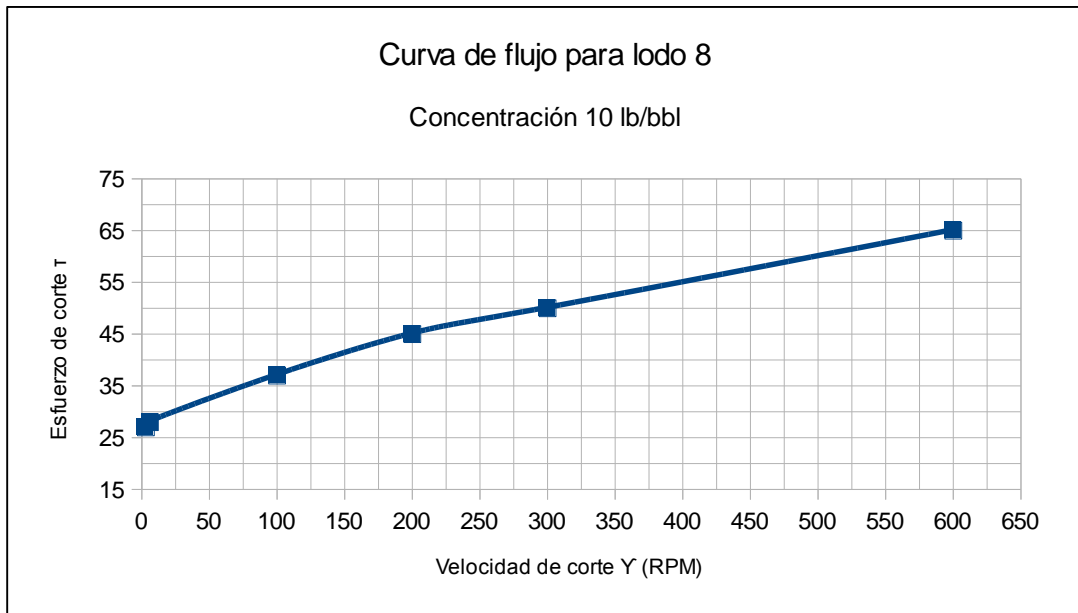


Gráfico 8.80. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 10 lb/bbl de materiales obturantes.

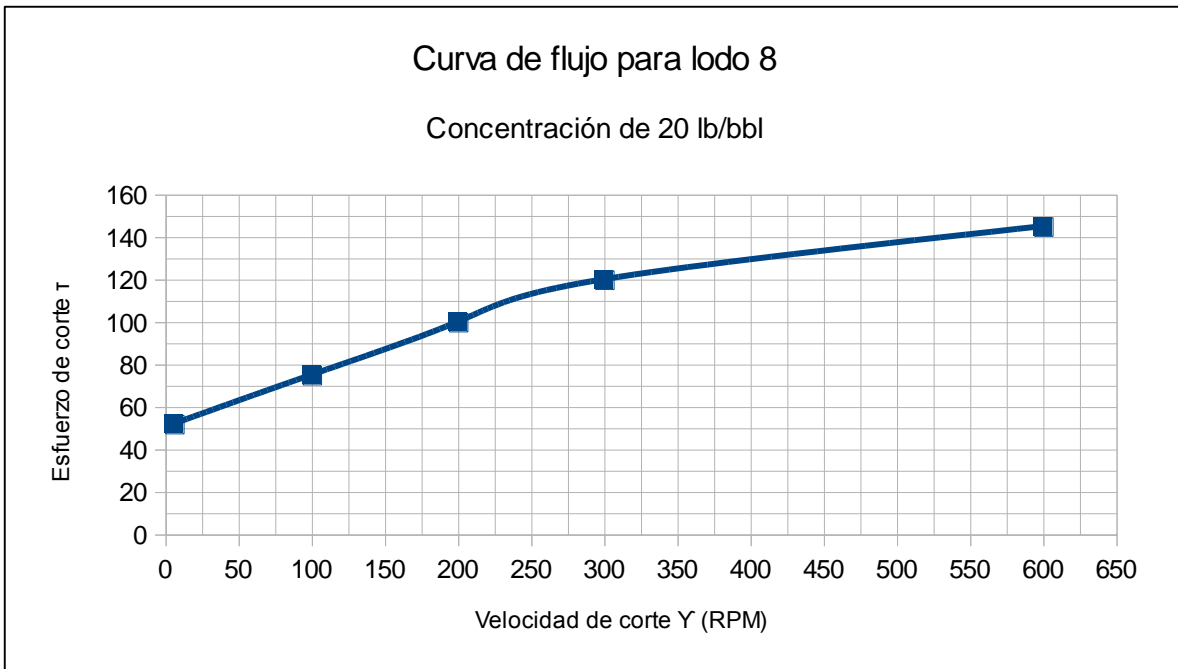


Gráfico 8.81. Curva de flujo para el lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl de materiales obturantes.

***Conclusión:** Observando los gráficos anteriores se concluye que el modelo reológico a utilizar en el lodo 5 es el modelo de Herschel-Bulkley o modelo de Ley exponencial modificada, por lo tanto las ecuaciones a utilizar son las correspondientes a dicho modelo, las cuales son expuestas en la sección 6.3.4*

Al igual que con el lodo 1 se toman las mismas consideraciones para el punto cedente (YP) (sustituido por el parámetro de punto cedente real), con base en el modelo matemático ahí descrito.

Paso 2: Propiedades reológicas: viscosidad plástica, punto cedente, esfuerzo de gel.

Tabla 8.51. Propiedades reológicas para el lodo 8.

Propiedades reológicas									
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft ²)	Punto cedente real τ_y (lb/100 ft ²)	Parámetro de comportamiento reológico R= τ_y /YP	Índice de consistencia K	Índice de ley exponencial n	Gel 10 seg	Gel 10 min
0	0	11	11	9.369	0.852	0.064	0.884	14	22
1	2	10	13	10.605	0.816	0.097	0.823	18	36
2	4	11	17	13.577	0.799	0.138	0.793	20	40
3	6	10	25	16.710	0.668	0.472	0.637	24	47
4	8	9	33	19.600	0.594	1.267	0.514	28	52
5	10	15	35	28.246	0.807	0.412	0.700	35	56
6	12	13	37	30.020	0.811	0.403	0.695	37	60
7	14	23	52	43.148	0.830	0.565	0.712	50	72
8	16	29	52	47.300	0.910	0.240	0.852	52	64
9	18	30	60	48.836	0.814	0.500	0.763	51	62
10	20	27	71	47.959	0.675	1.837	0.585	58	70

En los gráficos 8.82-8.86 se presentan las tendencias de variación de viscosidad plástica, punto cedente real, esfuerzo de gel y de los parámetros de limpieza del pozo (n,K) en función de la concentración de materiales obturantes

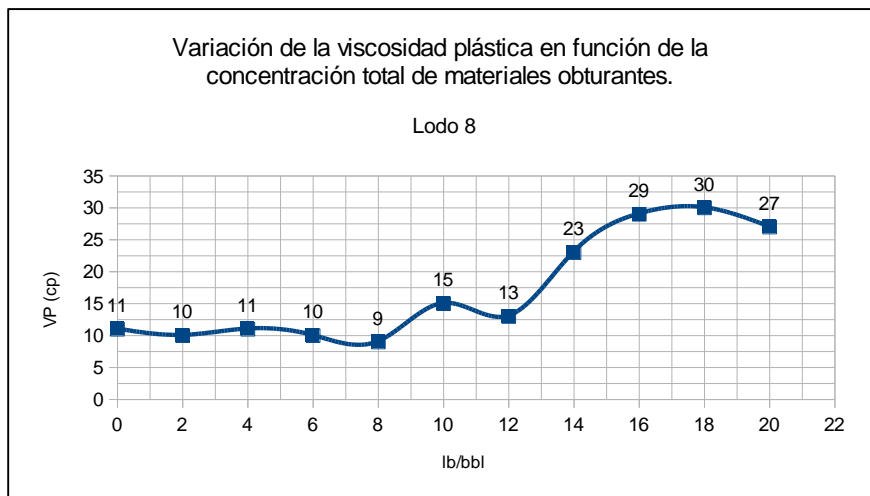


Gráfico 8.82. Variación de la viscosidad plástica en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.

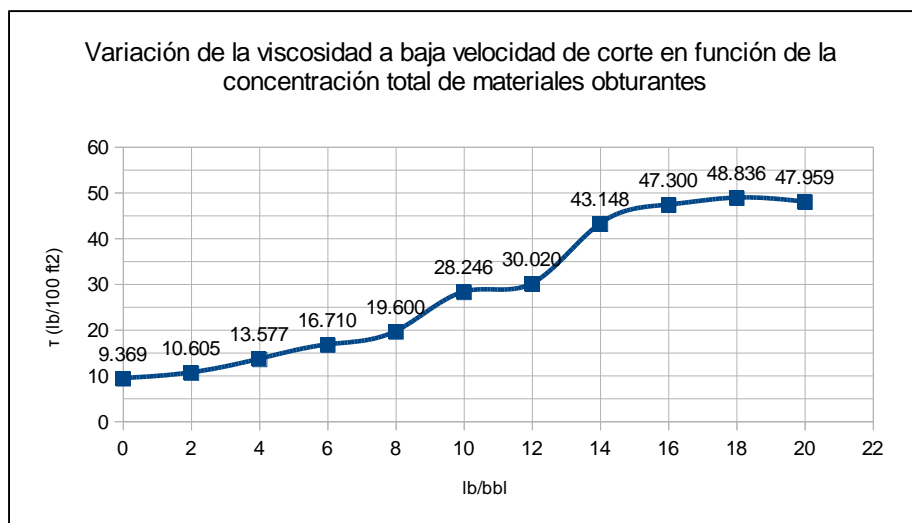


Gráfico 8.83. Variación del punto cedente real en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.

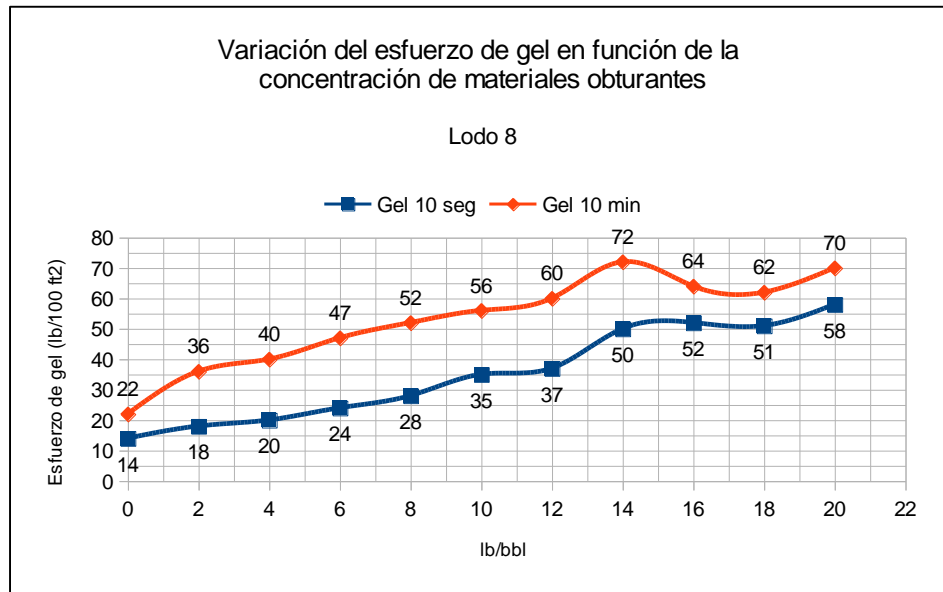


Gráfico 8.84. Variación del esfuerzo de gel en función de la concentración total de materiales obturantes. Lodo 8.

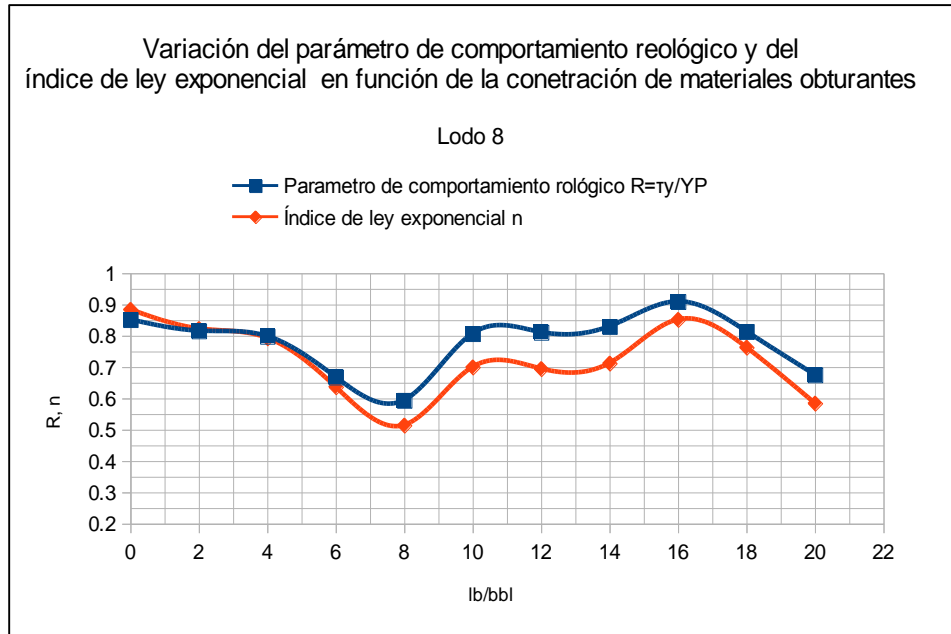


Gráfico 8.85. Variación de R y n en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 8.

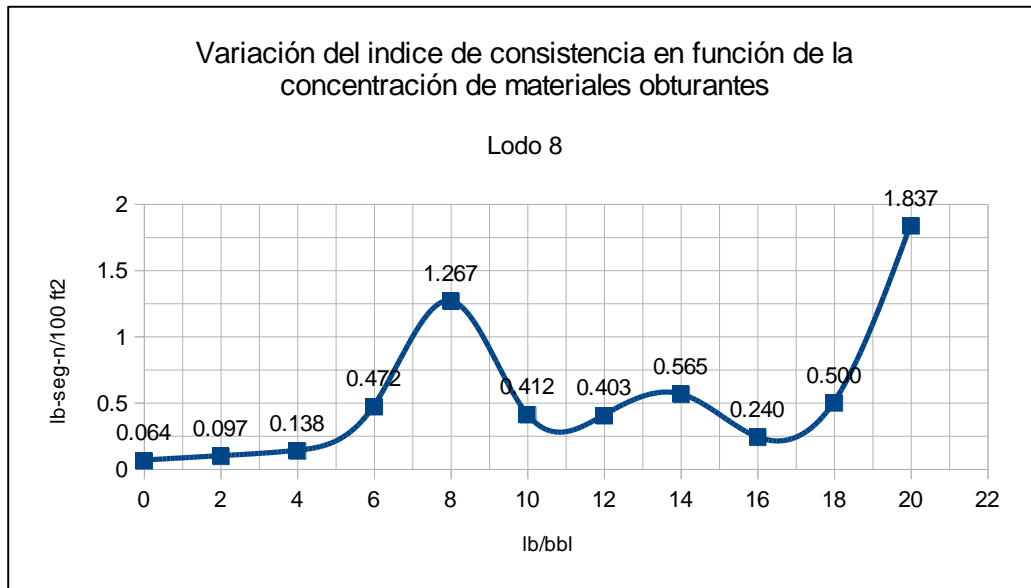


Gráfico 8.86. Variación del índice de consistencia en función de la concentración de materiales obturantes. Lodo 8

Comentarios de los gráficos anteriores.

Comentarios referentes a la viscosidad plástica y punto cedente real (Gráfico 8.82 y Gráfico 8.83):

1. El Gráfico 8.82 demuestra que los materiales obturantes presentes en el lodo 5 ejercen una acción viscosificante progresiva y que a partir de una concentración de 14 lb/bbl los datos difieren de los rangos permitidos presentados en la Figura 7.4.
2. En cuanto al punto cedente real se concluye que los datos generados hasta una concentración de 14 lb/bbl están dentro de los rangos establecidos en la Figura 7.3 quiere decir que a una concentración mayor los materiales y aditivos del Form-A-Squeeze ejercen fuerzas de atracción significativas en la estructura del lodo

Comentarios referentes al esfuerzo de gel (Gráfico 8.84):

1. Los LCM's y agentes químicos presentes en el lodo 8 producen un esfuerzo de gel instantáneo conforme aumenta la concentración, esto se debe a que el material Form-A-Squeeze aumenta las fuerzas de atracción en la estructura del lodo cuando su concentración va en aumento.
2. El esfuerzo de gel es instantáneo y progresivo, la diferencia entre el esfuerzo de gel a 10 min y a 10 seg es significativa, ambas características no son deseables para un fluido de perforación, sin embargo los geles altos suelen ser utilizados cuando ocurren pérdidas de circulación graves.

Comentarios referentes al comportamiento reológico y a capacidad de limpieza de pozo (Gráfico 8.85 y Gráfico 8.86):

1. El Gráfico 8.85 demuestra que el comportamiento reológico general del lodo 8 se asemeja a un fluido pseudoplástico representado por el índice de ley exponencial, el cual es menor a uno en el intervalo de concertación de LCM, lo anterior se refuerza con el parámetro de comportamiento reológico R cuyos valores están por debajo de la unidad indicando que el punto cedente real es menor al punto cedente de Bingham.
2. En general el lodo 8 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.585) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=1.837 lb seg^{0.585}/100 ft²).

8.8.2 FILTRADO LODO 8

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 8 los resultados se presentan en la tabla 8.52:

Tabla 8.52. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 8.

Lodo 8			Prueba de filtrado	
Punto	Concentración DE FORM-A SQUEEZE g/500ml	Concentración total de materiales puentes (lb/bbl)	ml de filtrado	Espesor de revoque
0	0.00	0	17.6	1.0
2	5.71	4	18.0	1.0
4	11.41	8	18.4	2.0
6	17.12	12	19.4	2.3
8	22.82	16	20.6	2.8
10	28.53	20	20.8	3.2

En los gráficos 8.87-8.88 se presenta la variación del filtrado y revoque en función de la concentración de materiales obturantes.

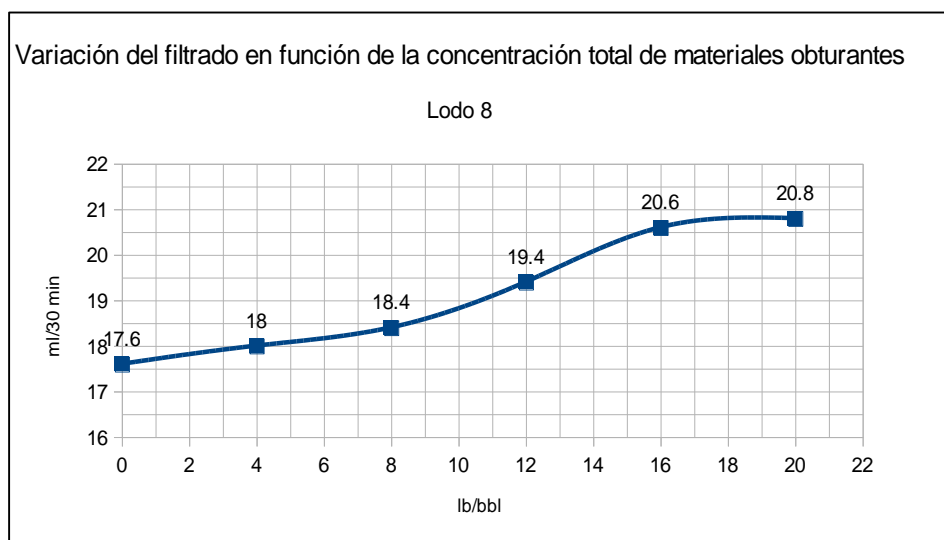


Gráfico 8.87. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 8.

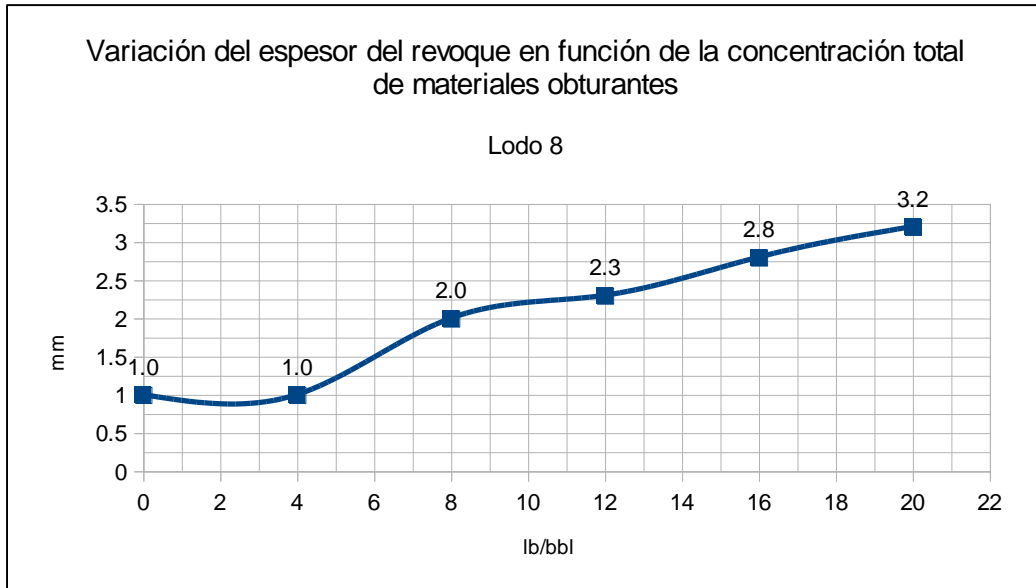


Gráfico 8.88. Variación del espesor del revoque en función de la concentración total de materiales obturantes para el lodo 8.

La metodología para evaluar el lodo de alta tasa de filtrado varía drásticamente con todas las demás y es la siguiente:

- Identificar la concentración a la que la tasa de pérdida de filtrado sea máxima y constante.
- Verificar que el espesor del revoque no sea superior a 3 mm.

De acuerdo a la Tabla 8.50 y al Gráfico 8.87 se observó que la concentración de materiales obturantes a la cual el filtrado se mantuvo constante fue a una concentración de 16 lb/bbl logrando un valor de 20.6 ml. En cuanto al Gráfico 8.88, el cual muestra la variación del espesor del revoque, se puede concluir que todas las concentraciones a excepción de la de 20 lb/bbl cumplen con el límite establecido en el capítulo 7 que es de 3 mm, es importante mencionar que los revoques obtenidos en este lodo resultaron ser en extremo firmes y con un espesor superior al de cualquier otro lodo.

Tabla 8.53. Criterios para la elección de una concentración en específico. Lodo 8.

Criterio	Restricciones u observaciones
Viscosidad plástica	Admisible hasta una concentración de 12 lb/bbl, a concentraciones superiores los datos de viscosidad plástica exceden los rangos establecidos mostrados en la Figura 7.4
Punto cedente y esfuerzo de gel	Se comprobó que a partir de una concentración de 14 lb/bbl el lodo tiende a gelificarse, por lo que sus valores de punto cedente y esfuerzo de gel son altos.
Parámetros de limpieza de pozo (n, K)	En general el lodo 8 tiene capacidades aceptables en términos de limpieza de pozo dado que los índices de la ley exponencial (n) son menores a 1 (entre 0.5 y 0.9) aunque los valores del índice de consistencia (K) sean bajos en todo el rango de concentraciones. Es de resaltar que el punto óptimo de limpieza de lodo ocurre a una concentración de 20 lb/bbl, en donde el exponente es menor (n=0.585) y el valor del índice de consistencia es mayor (K=1.837 lb seg ^{0.585} /100 ft ²).
Prueba de filtrado	El filtrado es constante a partir de una concentración de 16lb/bbl
Espesor de revoque	Revoques muy firmes y gruesos, lo cual combinado a un alto filtrado representa un punto a favor del lodo.
<p><i>Analizando los datos anteriores se puede concluir el material Form A Squeeze presenta buenas características para ser empleado en pérdidas graves, debido a:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Presenta esfuerzos de gel altos y progresivos, alto filtrado y un revoque firme.</i> <p><i>También es de tomar en cuenta que para este lodo las bombas obviamente trabajaran más por la reología desfavorable.</i></p>	
<i>Concentración propuesta</i>	<i>20 lb/bbl</i>

8.8.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 8.

Las pruebas químicas se presentan a la concentración propuesta de 20 lb/bbl y son expuestas en la Tabla 8.54.

Tabla 8.54. Pruebas químicas realizadas al lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.90	1.90	2.00	1.93	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.80	2.75	2.75	2.77	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	3.25	3.40	3.40	3.35	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf (ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	1080.0	1020.0	900.00	1000.00	-
OH ⁻ (ppm)	340.00	357.00	425.00	374.00	-
Contenido de cloruros (mg/l)	500.00	500.00	550.00	516.67	0-5000
pH	11.57	11.60	11.48	11.55	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	17.87	17.64	17.56	17.69	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de yeso o cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (11.55) y de la alcalinidad Pf (1.93) obteniendo un valor de **1.00 lb de yeso/bbl o 0.8 lb de cal/bbl**.

8.8.4 CARACTERIZACION LODO 8

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 8 a la concentración escogida de 20 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.55).
2. Presentar curva reológica logarítmica del lodo 8 a la concentración de 20 lb/bbl. Dicho gráfico compara la curva experimental con la curva ajustada utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, representando de manera visual los datos generados en la tabla 8.44.

Mostrar la composición del lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl (

3. Tabla 8.56).
4. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 8.
5. Sugerir los usos posibles del lodo 8 en plataforma de perforación.

Tabla 8.55. Caracterización del lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Viscosidad plástica	27 cp
Punto cedente	47.959 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 segundos	58 lb/100 ft ²
Esfuerzo de gel a 10 minutos	70 lb/100 ft ²
Filtrado	20.8 ml
Espesor de revoque	3.2 mm
Densidad	8.6 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.93, 2.77 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	3.35 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	11.55
MBT	17.69
Contenido de cloruros	516.67 ppm

Gráfico 8.89. Curva reológica logarítmica para el lodo 8 a una concentración de 20 lb/bbl de LCM's.

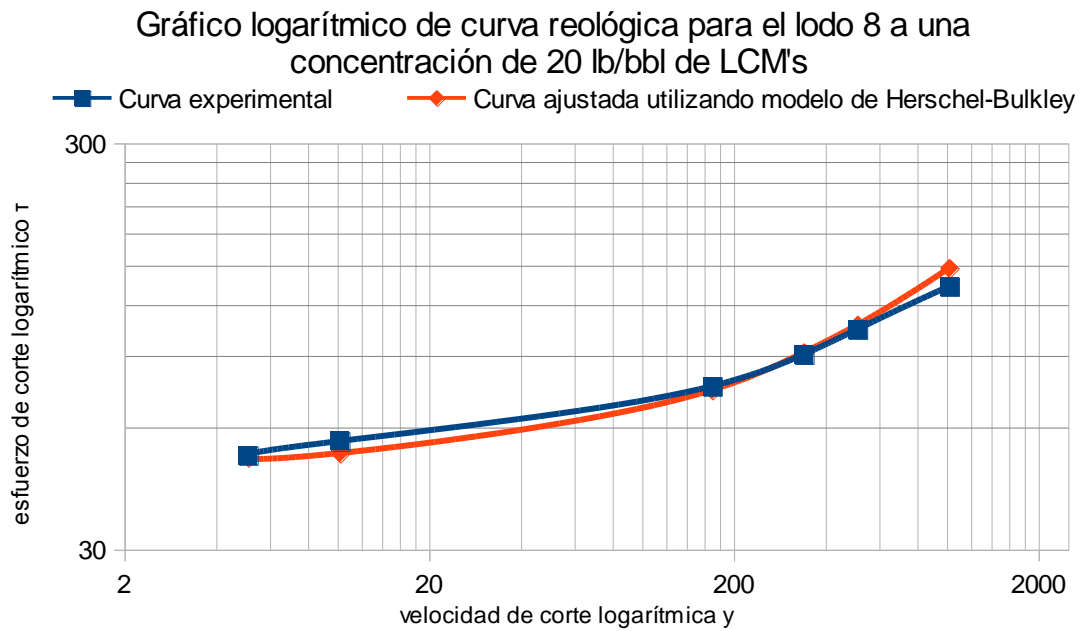


Tabla 8.56. Composición del lodo 8 a una concentración de materiales obturantes de 20 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000	90.00%
Bentonita	50.42	4.54%
NaOH	0.67	0.06%
yeso	2.92	0.26%
Form-A-Squeeze	57.06	5.14%
Total	1111.07	100.00%

Comentarios lodo 8

Se determinó que la combinación de materiales obturantes y agentes químicos presentes en el lodo 8:

1. Modifica en gran medida el punto cedente y el esfuerzo de gel, por lo que para su uso se recomienda mantener la densidad del fluido baja.
2. Posee características de limpieza de pozo aceptables.
3. Presenta un incremento en el filtrado y provoca un revoque más grueso y resistente.
4. No altera las propiedades químicas del lodo.

Recomendaciones.

1. Mantener la densidad del fluido baja.
2. No usar en tratamiento preventivo ni en pérdidas menores puesto que el espesor de revoque es grueso y puede provocar un atascamiento de tubería.
3. Usarlo en formaciones cavernosas o en fracturas inducidas.
4. No usar en zonas sensibles al agua, como las lutitas dado que en presencia de agua se desprenden, desmoronan o se hidratan provocando múltiples problemas

Por lo tanto se recomienda su uso en:

1. *Tratamiento correctivo en pérdidas totales.*

8.9 LODO 9. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: DIAMOND SEAL

8.9.1 REOLOGÍA LODO 9

No se puede realizar un estudio reológico a este lodo, debido a que se utiliza como material de pérdida de circulación un material adsorbente, es decir un material que es capaz de aumentar su tamaño con el tiempo en presencia de un medio líquido, utilizar el reómetro para el desarrollo del análisis reológico implicaría la generación de datos inexactos y un riesgo potencial de daño permanente al equipo.

El único criterio para la toma de decisión será los resultados de la prueba de filtrado.

8.9.2 FILTRADO LODO 9

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 9 los resultados se presentan en la tabla 8.57:

Tabla 8.57. Datos para el análisis de filtrado. Lodo 9

Punto	Concentración DE DIAMOND SEAL g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado	% Reducción del filtrado
0	0.00	0	17.6	0.00%
2	5.71	2	17.6	0.00%
4	11.41	4	16.6	5.68%
6	17.12	6	16.2	7.95%
8	22.82	8	15.8	10.23%
10	28.53	10	15.0	14.77%

En el gráfico 8.90 se presenta la variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes.

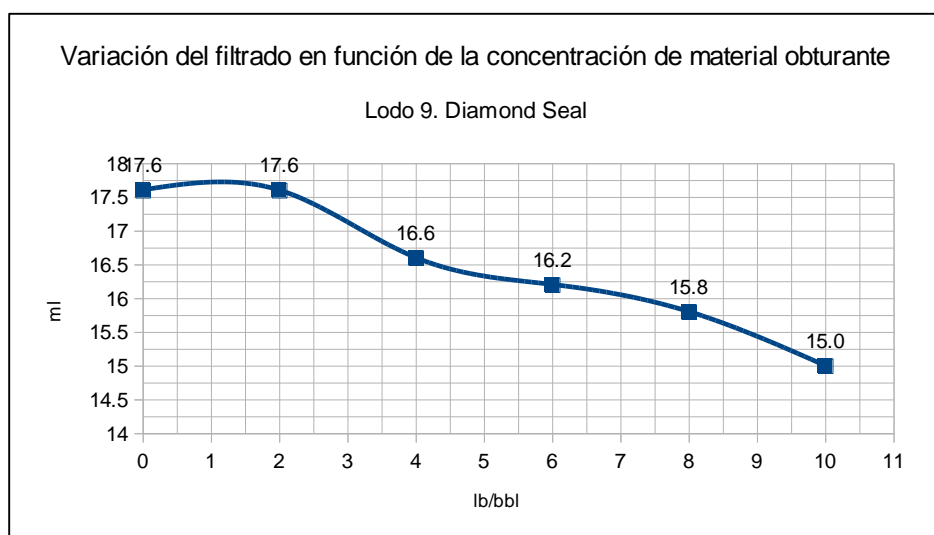


Gráfico 8.90. Variación del filtrado en función de la concentración de materiales obturantes para el lodo 9

De acuerdo a la Tabla 8.57 y al Gráfico 8.90 se observó que la concentración de materiales obturantes que presentó los resultados óptimos de reducción de filtrado fue a la concentración de 10 lb/bbl con una reducción de un 14.77% con respecto al lodo base. Es menester mencionar que en los casos en los que los fluidos de perforación tengan presentes algún material adsorbente no se tomará en cuenta la reología ni el espesor del revoque como criterios de decisión, en estos casos el único criterio a tomar en cuenta es la reducción de filtrado (Mano, 2009), por lo que la concentración de uso de Diamond Seal que se propone es de 10 lb/bbl.

Como información adicional se presenta un gráfico del crecimiento del diámetro de partícula del Diamond Seal (gráfico 8.91), lo anterior es muy útil si se conoce la magnitud de la pérdida y la formación que se perfora puesto que con esos datos se puede ajustar el diámetro de partícula óptimo y de esa forma asegurar retornos.

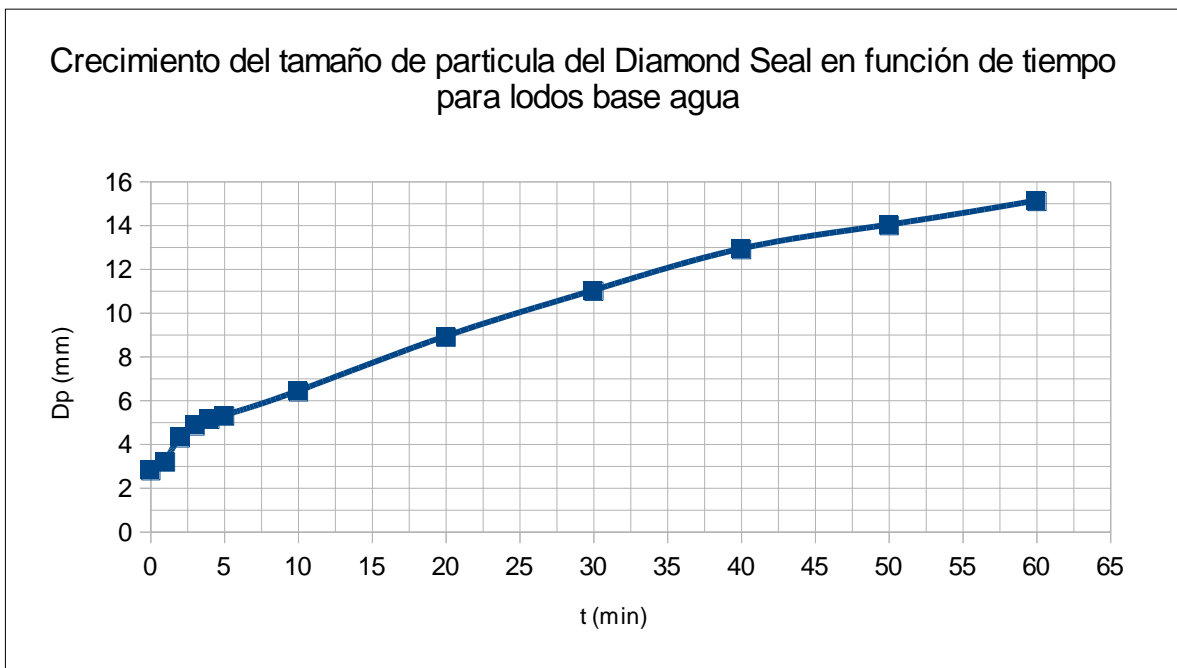


Gráfico 8.91. Crecimiento del diámetro de partícula del Diamond Seal para lodos base agua.

8.9.3 PRUEBAS QUÍMICAS LODO 9.

Las pruebas químicas se presentan a la concentración propuesta de 10 lb/bbl y son expuestas en la Tabla 8.58.

Tabla 8.58. Pruebas químicas realizadas al lodo 9 a una concentración de 10 lb/bbl.

Prueba Química	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Promedio	Rangos Máximos
Alcalinidad de filtrado Pf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	1.90	1.80	1.80	1.83	0.1-1.0
Alcalinidad de filtrado Mf (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	2.50	3.00	2.70	2.73	<5.0
Alcalinidad de lodo (ml de 0.02 N H ₂ SO ₄)	3.00	2.90	2.85	2.92	0.1-1.5
Como 2Pf>Mf(ver Tabla 7.15)					
CO ₃ ²⁻ (ppm)	720.00	1440.0	1080.0	1080.00	-
OH ⁻ (ppm)	442.00	204.00	306.00	317.33	-
Contenido de cloruros (mg/l)	650.00	600.00	650.00	633.33	0-5000
pH	11.50	11.45	11.46	11.47	8.5-10.5
MBT (lb/bbl)	17.58	17.63	17.73	17.65	15-35

Con los resultados de la tabla anterior se determinó que el único problema referente a tratamiento químico es el elevado valor de pH (reflejado también en la alcalinidad del lodo) y la concentración de carbonatos, estos pueden tratarse con yeso o cal (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001). La cantidad de yeso o cal a utilizar se define a partir de la Figura 7.10 de acuerdo a los parámetros de pH (10.47) y de la alcalinidad Pf (1.83) obteniendo un valor de **0.51 lb de yeso/bbl o 0.35 lb de cal/bbl**.

8.9.4 CARACTERIZACION DE LODO 9.

Una vez caracterizado fisicoquímicamente el lodo 9 a la concentración escogida de 10 lb/bbl se procede a:

1. Presentar un compendio de las características fisicoquímicas (Tabla 8.59).
2. Mostrar la composición del lodo 9 a una concentración de 10 lb/bbl (Tabla 8.60).
3. Presentar las conclusiones y observaciones finales acerca del lodo 9.
4. Sugerir los usos posibles del lodo 9 en plataforma de perforación.

Tabla 8.59. Caracterización del lodo 9 a una concentración de 10 lb/bbl.

Propiedad	Valor
Filtrado	15.0 ml
Densidad	8.7 lb/gal
Alcalinidad de filtrado Pf, Mf	1.83, 2.73 ml de 0.02N H ₂ SO ₄ respectivamente.
Alcalinidad de lodo Pm	2.92 ml de 0.02 H ₂ SO ₄
pH	11.47
MBT	17.65
Contenido de cloruros	633.33 ppm

Tabla 8.60. Composición del lodo 9 a una concentración de materiales obturantes de 10 lb/bbl.

Sustancia	Masa (g)	%p/p
Agua	1000.00	92.50%
Bentonita	50.42	4.66%
NaOH	0.67	0.06%
yeso	1.46	0.14%
Diamond Seal	28.53	2.64%
Total	1082.54	100.00%

Se determinó que la combinación de materiales obturantes presente en el lodo 9:

1. Presenta buenos resultados de reducción de filtrado (un máximo de 14.77%).

2. La fase de adsorción del Diamond Seal en el medio líquido es gradual, por lo que el bombeo de lodo no será problema.
3. No altera las propiedades químicas del lodo.

Por lo tanto se recomienda su uso en:

Tratamiento correctivo en pérdidas totales (exclusivamente en perforaciones horizontales o direccionales).

8.10 LODO 10. MATERIALES OBTURANTES INVOLUCRADOS: DIAMOND SEAL, CARBÓN.

8.10.1 INTRODUCCIÓN LODO 10

La siguiente prueba está basada en la patente estadounidense 7,534,744, la cual plantea un notable incremento en el desempeño del material de pérdida de circulación Diamond Seal en presencia de otro material a base de carbón⁶; dicha mejora se refiere a la reducción de filtrado y a l tiempo de sello de fractura.

8.10.2 REOLOGÍA LODO 10

No se puede realizar un estudio reológico a este lodo, debido a que se utiliza como material de pérdida de circulación un material adsorbente, es decir un material que es capaz de aumentar su tamaño con el tiempo en presencia de un medio líquido, utilizar el reómetro para el desarrollo del análisis reológico implicaría la generación de datos inexactos y un riesgo potencial de daño permanente al equipo.

El único criterio para la toma de decisión será los resultados de la prueba de filtrado

⁶ El material a base de carbón planteado en la patente es STEELSEAL (material compuesto por 98% de carbón) sin embargo como se carecía del material se optó por usar carbón como sustituto.

8.10.3 FILTRADO LODO 10

En relación a la prueba de filtrado para el lodo 10 los resultados se presentan en la tabla 8.61:

Tabla 8.61. Pruebas de filtrado. Lodo 10

Lodo 10				Prueba de filtrado
Punto	Concentración de CARBÓN g/L	Concentración de DIAMOND SEAL g/L	Concentración total de materiales puenteantes (lb/bbl)	ml de filtrado
0	0.00	0.00	0	17.6
1	57.06	0.00	20	18.0
2	28.53	28.53	20	19.0
3	14.26	28.53	15	16.2
4	14.26	22.82	13	17.2
5	0.00	28.53	10	15.0

Resultados

Se comprobó que la concentración de materiales obturantes que presentó los mejores resultados de reducción de filtrado fue aquella en la que se utilizó 10 lb/bbl de Diamond Seal sin la presencia de carbón, es decir que el carbón no produjo mejoras.

Lo anterior discrepa con lo presentado en la patente, pero esto se debe a que no se utilizó el material a base de carbón que se sugería en ella, el cual era STEELSEAL

9 ANALISIS DE RESULTADOS.

En esta sección se dispone a analizar el compendio de los lodos desde un punto de vista técnico-operativo, económico y ambiental. Primeramente los lodos con sus aditivos deben ser clasificados en función de su utilidad. De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo 8 se tiene la categorización mostrada en la tabla 9.1:

Tabla 9.1. Clasificación de los lodos planteados en función de su utilidad.

Clasificación	Lodos
Lodos para el tratamiento de pérdidas de hasta 10 bbl/hr.	1,2,4
Lodos para el tratamiento de pérdidas de hasta 250 bbl/hr.	3,5,6
Lodos para el tratamiento de pérdidas totales o severas (>250 bbl/hr)	7,8,9

Con base en lo anterior se procede a escoger un lodo (o varios dependiendo de su aplicación) por cada clasificación de acuerdo a criterios económicos⁷, operativos y ambientales.

9.1 LODOS PARA EL TRATAMIENTO DE PÉRDIDAS DE HASTA 10 BBL/HR.

Los lodos con LCM's para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr son utilizados en:

1. Formaciones poco profundas no consolidadas (pérdidas por infiltración).

Las características de identificación son las siguientes (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001):

- a) Registros de pozos vecinos que identifican las zonas y sus características.
- b) Reducción gradual del nivel del lodo de los tanques.
- c) Pérdida total si se sigue perforando.

⁷ Ver Tabla 7.42

En cuanto a los LCM's inmersos en los lodos se puede mencionar los siguientes rasgos distintivos:

- a) Tamaños de partícula pequeño.
- b) Distribución homogénea de LCM's granulares, laminares y fibrosos.
- c) Porcentajes de reducción de filtrado debido a los bajos tamaños de partículas.
- d) Producen espesor de revoques pequeños.

Con base en lo anterior se determinó que los lodos que cumplen con los requisitos mencionados, y que por lo tanto pueden ser utilizados en la mitigación de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr son los que se mencionan en la Tabla 9.2

Tabla 9.2. Lodos propuestos para la mitigación de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl
1	Magma Fiber fino, celofán y Magma Fiber grueso, proporción 1:1:1.	12
2	Granza de arroz, magma fiber grueso, cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1.	20
4	Mica	18

Una vez definidos los lodos se procede a analizarlos desde un punto de vista económico (Tabla 9.3), técnico-operativo (Tabla 9.5) y ambiental (Tabla 9.6).

Finalmente con los criterios de decisión antes mencionados, se selecciona un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr (Tabla 9.7

Tabla 9.3. Costos totales de lodos para tratamientos de pérdidas de hasta 10 bbl/hr.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componentes	Masa muestra (g)	Costo (\$/g)	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
1	Magma Fiber fino, celofán y Magma Fiber grueso, proporción 1:1:1.	12	Agua	1000	0.0000	0.15	1,535.44	4
			Bentonita	52.63	0.0186			
			NaOH	0.67	0.0005			
			Cal	2.47	0.0010			
			Magma fiber grueso	11.41	0.0238			
			Magma fiber fino	11.41	0.0238			
			Celofán	11.41	0.0857			
2	Granza de arroz, magma fiber grueso, cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1.	20	Agua	1000	0.000	0.08	782.46	8
			Bentonita	52.63	0.0186			
			NaOH	0.67	0.0005			
			Cal	1.71	0.0007			

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componentes	Masa muestra (g)	Costo (\$/g)	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
			Magma fiber grueso	19.02	0.0397			
			Granza de arroz	19.02	0.0013			
			Cáscara de nuez	19.02	0.0175			
4	Mica	18	Agua	1000	0.0000	0.03	305.76	10
			Bentonita	50.42	0.0178			
			NaOH	0.67	0.0005			
			Mica	34.23	0.0113			
			Cal	2.47	0.0010			

Antes de proseguir con el análisis técnico-operativo es necesario realizar un compendio de todos los parámetros necesarios para dicho análisis, es importante mencionar que los datos fueron obtenidos del capítulo 8 y son recapitulados en la Tabla 9.4

Tabla 9.4. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.

Lodo No	Concentración lb/bbl	VP (cp)	τ_y (lb/100 ft ²)	Gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	Gel a 10 min (lb/100 ft ²)	n	k	%Reducción del filtrado	Revoque (mm)
1	12	7	27.26	10	35	0.62	0.46	9.09	1.40
2	20	6	71.16	8	52	0.35	6.01	13.64	2.25
4	18	11	6	9	25	0.836	0.092	8.05	1.7

Tabla 9.5. Análisis técnico-operativo de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.

Criterio de decisión.	Peso relativo %	Alternativas		
		Lodo 1	Lodo 2	Lodo 4
VP (viscosidad plástica, cp)	8%	10	9	8
τ_y (Punto cedente real ,lb/100 ft2)	8%	9	5	7
n (Índice de ley exponencial)	2.50%	6	8	4
k (índice de consistencia)	2.50%	4	8	1
Esfuerzo de gel a 10 seg (lb/100 ft2)	10%	9	9	9
Esfuerzo de gel a 10 min (lb/100 ft2)	20%	6.5	5	8
% de reducción del filtrado	40%	6.5	8.5	6
Espesor de revoque	9%	9	7.5	8
Total	100%	7.38	7.50	6.95

Para llevar a cabo el análisis ambiental se realizó con base en el procedimiento de clasificación presentado en el Anexo 2 de este documento y la ponderación según su clasificación propuesta en la sección 7.4.3. Análisis ambiental.

Tabla 9.6. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.

Análisis ambiental			
Materiales	Alternativas		
	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 4
Bentonita	5	5	5
Soda cáustica	8	8	8
Magma Fiber	8	-	-
Wall-Nut	-	10	-
Mica	-	-	10
Granza de arroz	-	10	-
Celofán	10	10	-
Promedio	7.75	8.60	7.67

Tabla 9.7. Toma de decisión de un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr.

Criterio de decisión.	Ponderación %	Alternativas		
		Lodo 1	Lodo 2	Lodo 4
Técnico-operativo	70%	7.38	7.50	6.95
Económico	20%	4	8	10
Ambiental	10%	7.75	8.60	7.67
Total	100%	6.74	7.71	7.63

Por lo tanto, el lodo que se recomienda usar en pérdidas de circulación de hasta 10 bbl/hr es el lodo 2; la forma en la que debe ser aplicado queda descrita en la Figura 9.2.

9.2 LODOS PARA EL TRATAMIENTO DE PÉRDIDAS DE HASTA 250 BBL/HR.

Los lodos con LCM's para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr son utilizados en:

1. Formaciones que tienen fracturas naturales como la caliza y algunas formaciones de lutita dura.
2. Fracturas inducidas poco profundas ocasionadas por esfuerzos mecánicos o hidráulicos.

Las características de identificación son las siguientes (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001):

1. Registros de pozos vecinos, indicadores geológicos y registros que incluyen hidráulica anular excesiva.
2. Reducción gradual del nivel del lodo de los tanques (la reducción es superior en comparación a las pérdidas por infiltración).
3. La pérdida se vuelve total si se sigue perforando.

En cuanto a los LCM's inmersos en los lodos se puede mencionar los siguientes rasgos distintivos:

1. Diferentes tamaños de partícula.
2. Utilización de mezclas de LCM's.
3. Porcentajes de reducción de filtrado alto.
4. Producen espesor de revoques pequeños.
5. Utilización de aditivos para el control de filtrado (principalmente polímeros).

Con base en lo anterior se determinó que los lodos que cumplen con los requisitos mencionados, y que por lo tanto pueden ser utilizados en la mitigación de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr se mencionan en la Tabla 9.8

Tabla 9.8. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas parciales de hasta 250 bbl/hr.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl
3	Granza de arroz, magma fiber grueso, celofán y cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1:2.	18
5	Cascarilla de café, magma fiber grueso, celofán y mica; proporción 1:1:1:4.	18
6	Granza de arroz, cascara de nuez, carbón fino, carboximetilcelulosa, aceite vegetal.	20

Una vez definidos los lodos se procede a analizarlos desde un punto de vista económico (Tabla 9.9), técnico-operativo (Tabla 9.11) y ambiental (Tabla 9.12).

Finalmente con los criterios de decisión antes mencionados, se selecciona un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr (Tabla 9.13)

Tabla 9.9. Costos totales de lodos para tratamientos de pérdidas de hasta 250 bbl/hr.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componente	Masa muestra (g)	Costo (\$)/g	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
3	Granza de arroz, magma fiber grueso, celofán y cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1:2.	18	Agua	1000	0.0000	0.14	1,370.51	4
			Bentonita	50.42	0.0178			
			NaOH	0.67	0.0005			
			Cal	1.46	0.0006			
			Granza de arroz	10.27	0.0007			
			Magma fiber grueso	10.27	0.0215			
			Celofán	10.27	0.0772			
			Cascara de nuez	20.54	0.0189			
5	Cascarilla de café, magma fiber grueso, celofán y mica;	18	Agua	1000.00	0.0000	0.10	1028.93	6
			Bentonita	58.57	0.0207			

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componente	Masa muestra (g)	Costo (\$/g)	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
	proporción 1:1:1:4.		NaOH	1	0.0007			
			Cal	2.85	0.0011			
			Magma Fiber	7.34	0.0153			
			Cascarilla de café	7.34	0.0002			
			Celofán	7.34	0.0551			
			Mica	29.36	0.0097			
6	Granza de arroz, cascara de nuez, carbón fino, carboximetilcelulosa, aceite vegetal	20	Agua	1000.00	0.0000	0.04	355.35	10
			Bentonita	50.42	0.0178			
			NaOH	0.67	0.0005			
			Cal	1.46	0.0006			
			Granza de arroz	47.24	0.0032			
			Cascara de nuez	6.62	0.0061			

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componente	Masa muestra (g)	Costo (\$/g)	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
			Polypac	0.23	0.0012			
			Aceite vegetal	0.83	0.0008			
			Grafito	2.17	0.0053			

Antes de proseguir con el análisis técnico-operativo es necesario realizar un compendio de todos los parámetros necesarios para dicho análisis, es importante mencionar que los datos fueron obtenidos de la sección 8 y son recopilados en la Tabla 9.10.

Tabla 9.10. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.

Lodo No	Concentración lb/bbl	VP (cp)	τ_y (lb/100 ft ²)	Gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	Gel a 10 min (lb/100 ft ²)	n	k	%Reducción del filtrado	Revoque (mm)
3	18	9	9.82	10	38	0.61	0.54	14.77	1.70
5	18	16	4.05	15	39	0.556	1.245	12.99	2.00
6	20	12	14.102	30	40	0.263	17.21	20.45	1.95

Tabla 9.11. Análisis técnico-operativo de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.

Criterio de decisión.	Peso relativo %	Alternativas		
		Lodo 3	Lodo 5	Lodo 6
VP (viscosidad plástica, cp)	8%	8.5	6	8
τ_y (Punto cedente real ,lb/100 ft ²)	8%	7.5	7	8.5
n (Índice de ley exponencial)	2.50%	8	8	9.5
k (índice de consistencia)	2.50%	3	5	10
Esfuerzo de gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	10%	9	8	5
Esfuerzo de gel a 10 min (lb/100 ft ²)	20%	8	8	8
% de reducción del filtrado	40%	8	7	10
Espesor de revoque	9%	9	8	8
Total	100%	8.07	7.29	8.63

Para llevar a cabo el análisis ambiental se realizó con base en el procedimiento de clasificación presentado en el Anexo 2 de este documento y la ponderación según su clasificación propuesta en la sección 7.4.3. Análisis ambiental.

Tabla 9.12. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.

Materiales	Alternativas		
	Lodo 3	Lodo 5	Lodo 6
Bentonita	5	5	5
Soda cáustica	8	8	8
Polypac	-	-	8
Aceite vegetal	-	-	8
Magma Fiber	8	8	-
Wall-Nut	10	-	10

Materiales	Alternativas		
Mica	-	10	-
Granza de arroz	10	10	10
Cascarilla de café	-	10	-
Celofán	10	-	-
Carbón/grafito	-	-	8
Promedio	8.50	8.50	8.14

Tabla 9.13. Toma de decisión de un lodo en específico para el tratamiento de pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr.

Criterio de decisión.	Peso relativo %	Alternativas		
		Lodo 3	Lodo 5	Lodo 6
Técnico-operativo	70%	8.07	7.29	8.63
Económico	20%	4	6	10
Ambiental	10%	8.50	8.50	8.14
Total	100%	7.30	7.15	8.85

Por lo tanto, el lodo que se recomienda usar en pérdidas de circulación de hasta 250 bbl/hr es el lodo 6; la forma en la que debe ser aplicado queda descrita en la Figura 9.3.

9.3 LODOS PARA EL TRATAMIENTO DE PÉRDIDAS TOTALES.

Los lodos con LCM's para el tratamiento de pérdidas de circulación totales son utilizados en:

1. Fracturas inducidas por esfuerzos mecánicos e hidráulicos.
2. Zonas cavernosas (normalmente limitadas a calizas).
3. Formaciones agotadas.

Es importante mencionar que en la actualidad existen técnicas previas al uso de tapones de cemento (método convencional para reparar pérdidas severas), debido a que estos últimos obstruyen demasiado el avance de la perforación y por lo tanto deben ser el último recurso a utilizar frente a una pérdida total.

Los lodos que se proponen para remediar las pérdidas totales son los presentados en la Tabla 9.14

Tabla 9.14. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas totales.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Restricciones
7	Form-A-Set (Material para inyección de polímero entrecruzado).	16	N/A
8	Form-A-Squeeze (Material para inyección de alta tasa de filtrado).	20	No usar en formaciones sensibles al filtrado
9 ⁸	Diamond-Seal (LCM hinchable/hidratable)	10	Uso exclusivo para pozos direccionales

⁸ Diamond Seal debe ser únicamente utilizado en pozos direccionales.

Nota: Para el lodo 8 es de suma importancia saber en qué tipo de formación ocurrió la pérdida debido a que existen formaciones sensibles al filtrado como las formaciones agotadas o las lutitas sensibles al agua.

Para el caso de los lodos planteados para mitigar pérdidas totales los únicos criterios de decisión a tomar en cuenta serán el económico (Tabla 9.16) y ambiental (Tabla 9.17). No se realizó un análisis técnico-operativo debido a las diferentes aplicaciones que tienen los lodos, esto último se refleja en la variación de las propiedades reológicas y de filtrado (Tabla 9.15)

Tabla 9.15. Resumen de datos de lodos para tratamiento de pérdidas totales de circulación.

Lodo No	Concentración lb/bbl	VP (cp)	τ_y (lb/100 ft ²)	Gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	Gel a 10 min (lb/100 ft ²)	n	k	Filtrado (ml)	Revoque (mm)
7	16	57	1.435	6	15	0.599	1.83	7.2	2.50
8	20	27	47.959	58	70	0.585	1.837	20.8	3.20
9	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	15.0	N/A

Tabla 9.16. Costos de lodos para tratamientos de pérdidas totales.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componente	Masa muestra (g)	Costo (\$)/componente en la muestra	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/m³)
7	Form-A-Set (Material para inyección de polímero entrecruzado).	16	Agua	1000	-	0.66	6,618.01
			Bentonita	50.42	0.0178		
			NaOH	0.67	0.0005		
			Cal	2.92	0.0011		
			Form-A-Set	45.65	0.6424		
8	Form-A-Squeeze (Material para inyección de alta tasa de filtrado).	20	Agua	1000	-	0.54	5,426.96
			Bentonita	50.42	0.0178		
			NaOH	0.67	0.0005		
			Cal	2.92	0.0011		
			Form-A-Squeeze	57.06	0.5233		

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Componente	Masa muestra (g)	Costo (\$)/componente en la muestra	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/m³)
9	Diamond-Seal (LCM hinchable/hidratable)	10	Agua	1000	-	1.09	10,867.30
			Bentonita	50.42	0.0178		
			NaOH	0.67	0.0005		
			Cal	1.46	0.0006		
			Diamond Seal	28.53	1.0679		

Para llevar a cabo el análisis ambiental se realizó con base en el procedimiento de clasificación presentado en el Anexo 2 de este documento y la ponderación según su clasificación propuesta en la sección 7.4.3. Análisis ambiental.

Tabla 9.17. Análisis ambiental de lodos para tratamiento de pérdidas totales de circulación.

Materiales	Alternativas		
	Lodo 7	Lodo 8	Lodo 9
Bentonita	5	5	5
Soda cáustica	8	8	8
Form-A-Set	8	-	-
Form-A-Squeeze	-	8	-
Diamond Seal	-	-	8
Promedio	7.00	7.00	7.00

En conclusión, la utilización de los 3 lodos anteriores está en función del tipo de perforación y del tipo de formación que se está perforando, por lo que una vez identificado los 2 factores precedentes se propone la metodología planteada en la Figura 9.1.

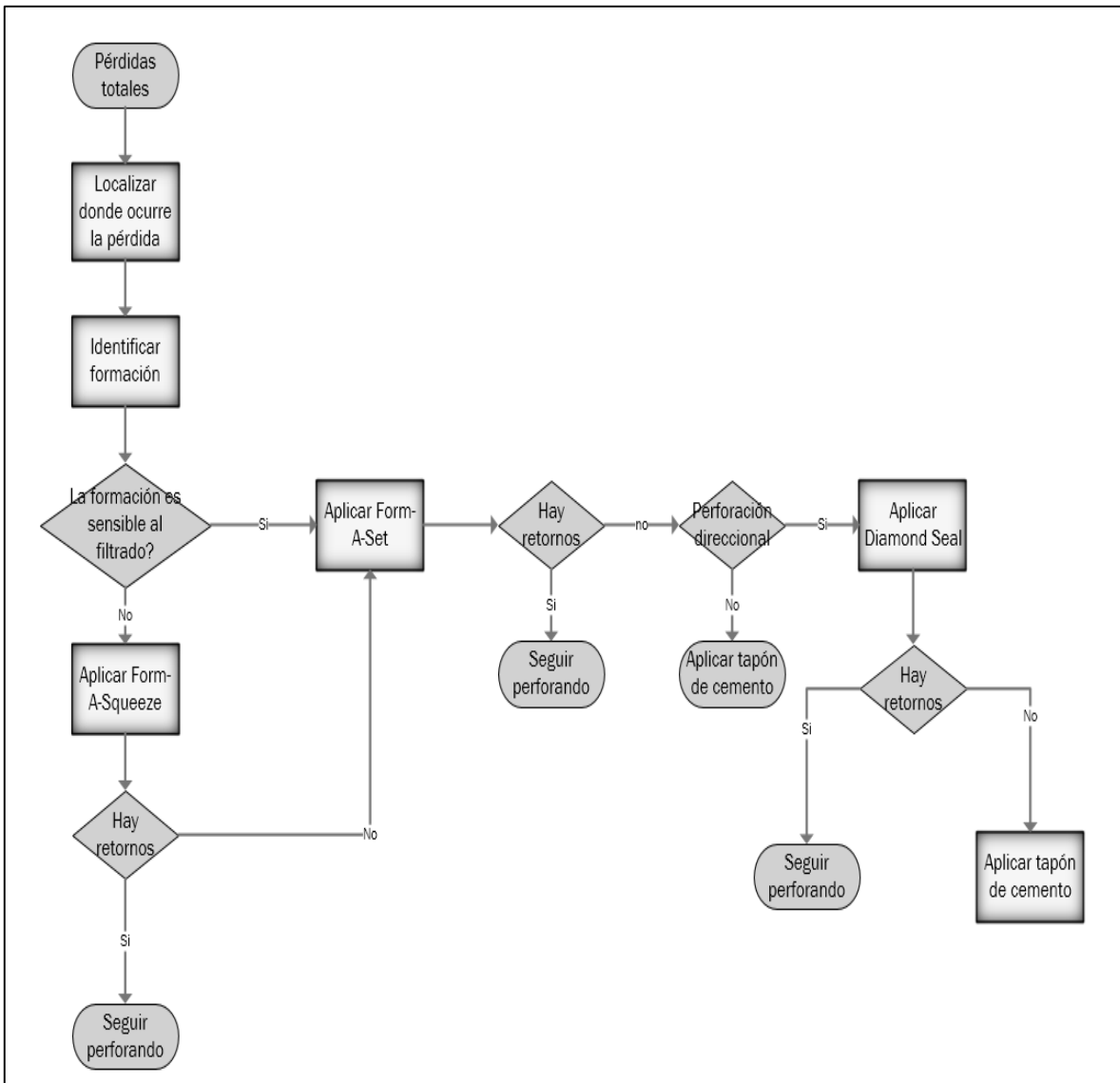


Figura 9.1. Metodología para el control de pérdidas totales.

La manera en la que estos lodos deben ser aplicados queda descrito en las figuras 9.4-9.6

9.4 RESUMEN DE DATOS

Esta sección presenta un resumen de datos a partir de los resultados obtenidos en el análisis económico y técnico-operativo para cada uno de los lodos propuesto según su clasificación.

Tabla 9.18. Resumen de datos del análisis económico realizado a los diferentes lodos propuestos.

Análisis económico						
Tipo de pérdida	Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Costo (\$/muestra)	Costo total (\$/10 m ³)	Calificación
Pérdida Leve	1	Magma Fiber fino, celofán y Magma Fiber grueso, proporción 1:1:1.	12	0.15	1,535.44	4
	2	Granza de arroz, magma fiber grueso, cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1.	20	0.08	782.46	8
	4	Mica	18	0.03	305.76	10
Pérdida Parcial	3	Granza de arroz, magma fiber grueso, celofán y cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1:2.	18	0.14	1,370.51	4
	5	Cascarilla de café, magma fiber grueso, celofán y mica; proporción 1:1:1:4.	18	0.1	1028.93	6
	6	Granza de arroz, cascara de nuez, carbón fino, carboximetilcelulosa, aceite vegetal	20	0.04	355.35	10
Pérdida Total	7	Form-A-Set (Material para inyección de polímero entrecruzado).	16	0.66	6,618.01	-
	8	Form-A-Squeeze (Material para inyección de alta tasa de filtrado).	20	0.54	5,426.96	-
	9	Diamond-Seal (LCM hinchable/hidratable)	10	1.09	10,867.30	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.19. Resumen de datos del análisis Técnico-Operativo realizado a los lodos clasificados para pérdidas leves y pérdidas parciales.

Criterio de decisión.	Peso relativo (%)	Alternativas					
		Pérdidas leves			Pérdidas Parciales		
		Lodo 1	Lodo 2	Lodo 4	Lodo 3	Lodo 5	Lodo 6
VP (viscosidad plástica, cp)	8%	10	9	8	8.5	6	8
τ_y (Punto cedente real, lb/100 ft ²)	8%	9	5	7	7.5	7	8.5
n (Índice de ley exponencial)	2.50%	6	8	4	8	8	9.5
k (índice de consistencia)	2.50%	4	8	1	3	5	10
Esfuerzo de gel a 10 seg (lb/100 ft ²)	10%	9	9	9	9	8	5
Esfuerzo de gel a 10 min (lb/100 ft ²)	20%	6.5	5	8	8	8	8
% de reducción del filtrado	40%	6.5	8.5	6	8	7	10
Espesor de revoque	9%	9	7.5	8	9	8	8
Total	100%	7.38	7.5	6.95	8.07	7.29	8.63

Fuente: Elaboración propia.

Como se menciona anteriormente para el caso de los lodos planteados para mitigar pérdidas totales los únicos criterios de decisión a tomar en cuenta serán el económico (Tabla 9.16) y ambiental (Tabla 9.17). No se realizó un análisis técnico-operativo debido a las diferentes aplicaciones que tienen los lodos.

9.5 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE LOS LODOS PROPUESTOS.

En este apartado se expone la metodología a seguir para la aplicación de los lodos propuestos para remediar pérdidas de circulación tanto parciales como totales

Tabla 9.20. Lodos propuestos para el tratamiento de pérdidas de circulación.

Lodo No.	Materiales obturantes y agentes químicos implicados en lodos	Concentración lb/bbl	Aplicación
2	Granza de arroz, magma fiber grueso, cascara de nuez (Nut Plug™) proporción 1:1:1.	20	Pérdidas leves (hasta 10 bbl/hr)
6	Granza de arroz, cascara de nuez, carbón fino, carboximetilcelulosa, aceite vegetal.	20	Pérdidas parciales (hasta 250 bbl/hr)
7	Form-A-Set (Material para inyección de polímero entrecruzado).	16	Pérdida total
8	Form-A-Squeeze (Material para inyección de alta tasa de filtrado).	20	Pérdida total
9	Diamond-Seal (LCM hinchable/hidratable)	10	Pérdida total en pozos direccionales

Fuente: Elaboración propia.

La descripción de cómo deben ser aplicados los lodos quedan expuestas en las figuras 9.2 a 9.6.

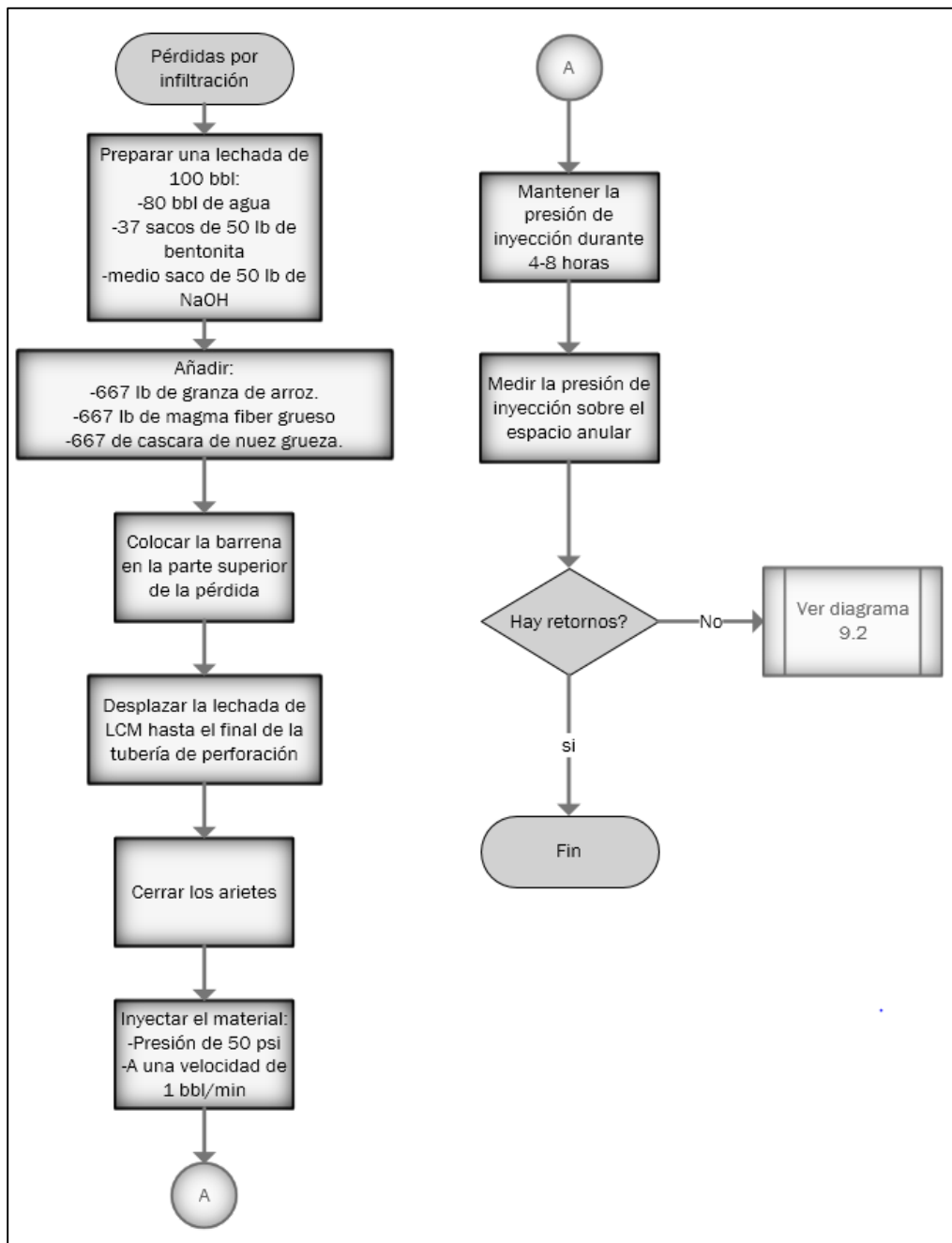


Figura 9.2. Metodología de aplicación del lodo 2 para el tratamiento de pérdidas leves (<10 bbl/hr).

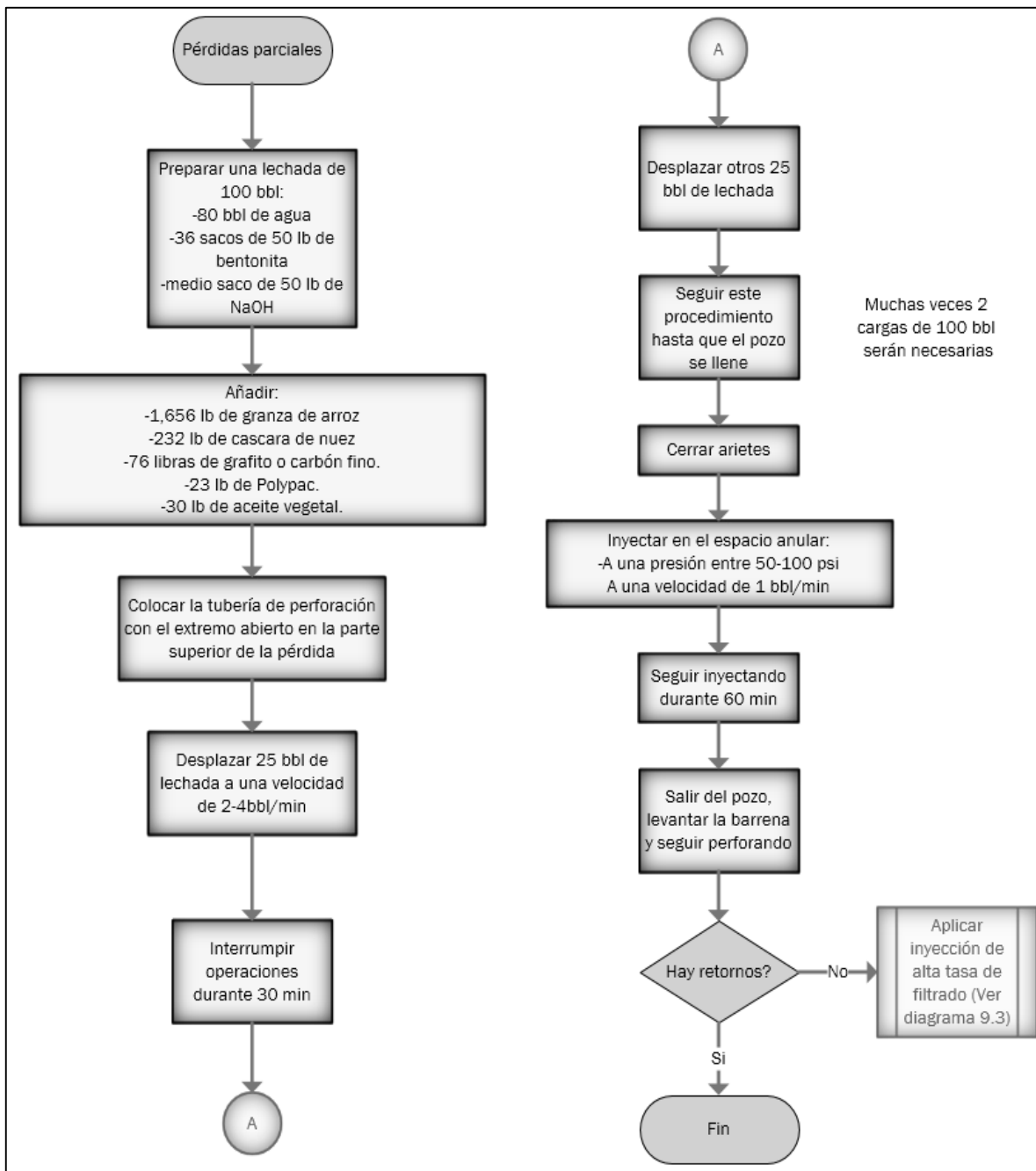


Figura 9.3. Metodología de aplicación del lodo 6 para el tratamiento de pérdidas parciales (<250 bbl/hr)

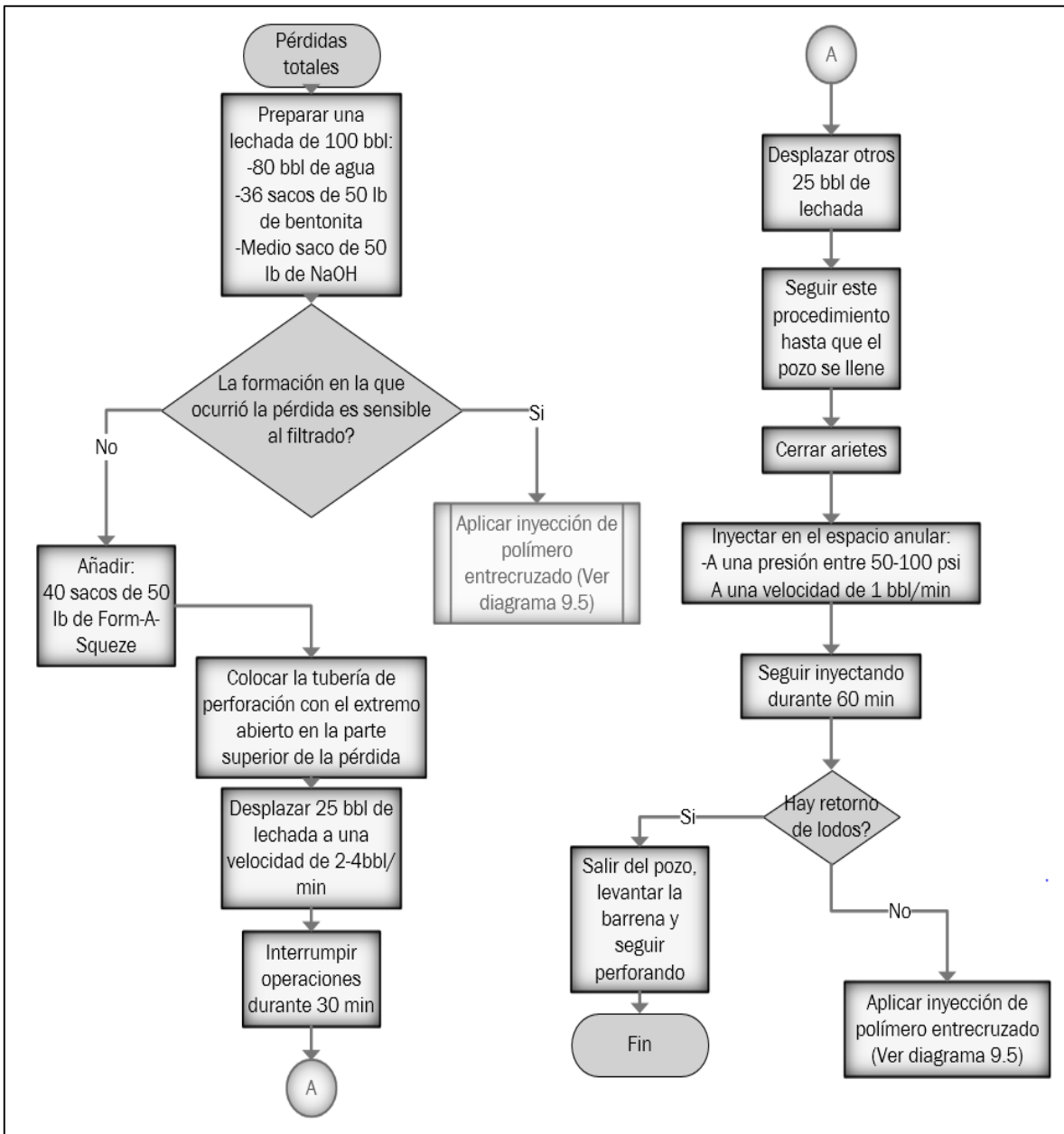


Figura 9.4. Metodología de aplicación de inyección de alta tasa de filtrado con Form-A-Squeeze.

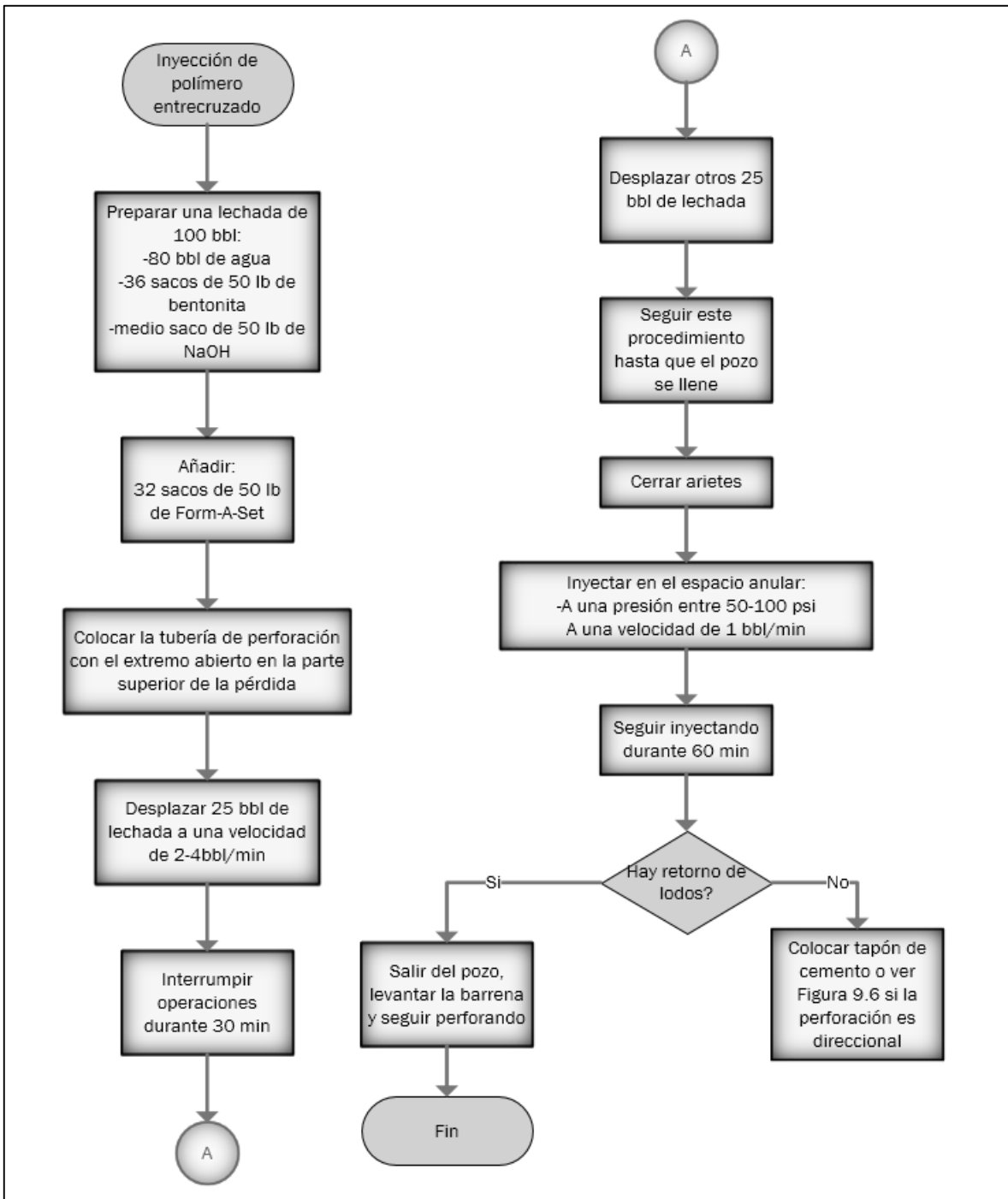


Figura 9.5. Metodología de aplicación de inyección de polímero entrecruzado con Form-A-Set.

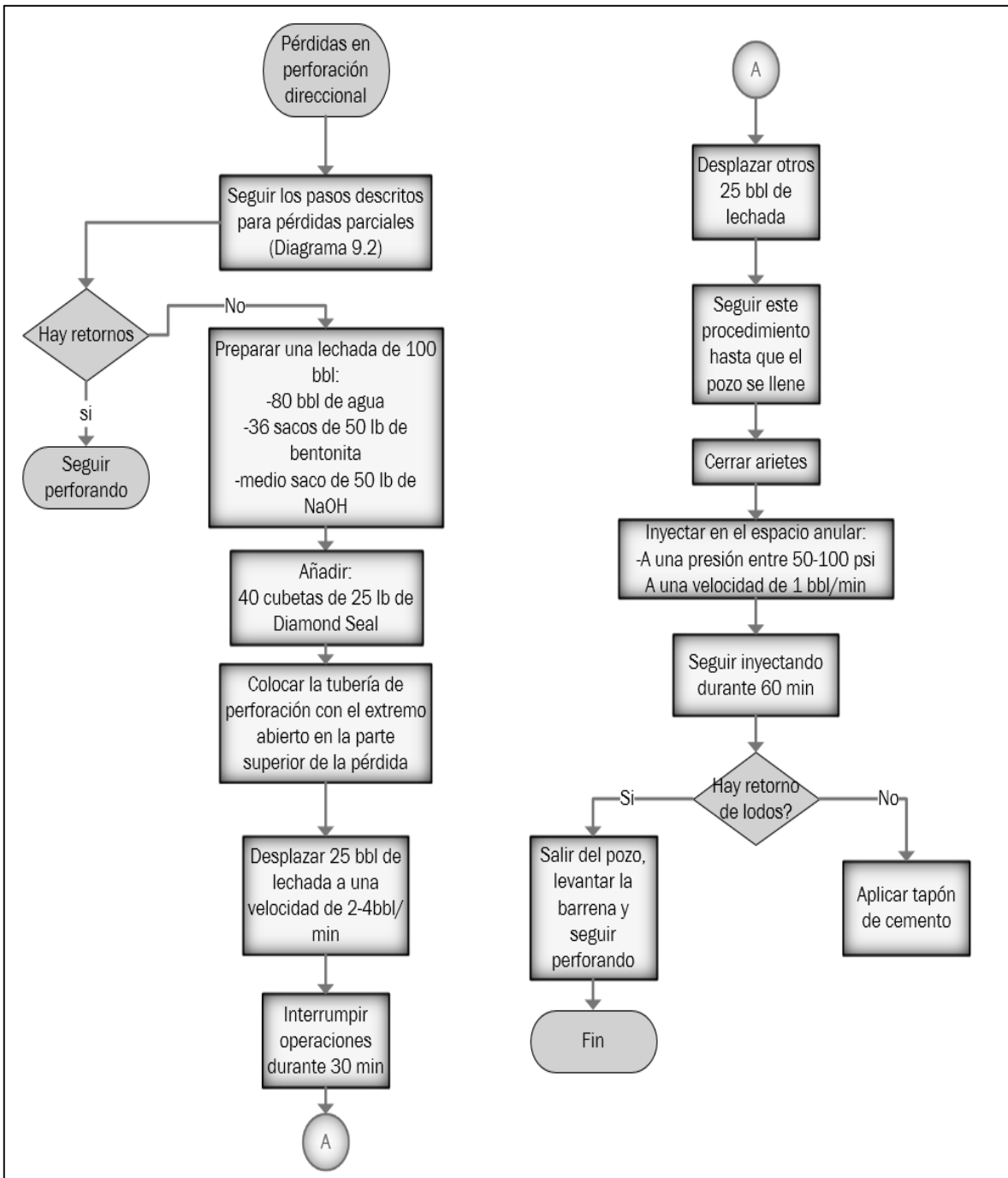


Figura 9.6. Metodología para el control de pérdidas en perforaciones direccionales utilizando Diamond Seal.

10 CONCLUSIONES.

1. Por medio de la evaluación de información de operaciones de perforación de pozos situados los diferentes campos geotérmicos, se logró identificar las diferentes pautas comunes en relación al tratamiento de pérdidas de circulación:
 - En pérdidas parciales se utiliza un único material obturante el cual es cascarilla de café
 - Para pérdidas totales a profundidades no cercanas al reservorio (hasta 1500 metros) la técnica más utilizadas es la aplicación de tapones blandos y duros (combinación cemento, lodo y diésel)
 - Para zonas cercanas al reservorio se utilizan baches de polímero-bentonita o mezclas agua-aire-espuma.
2. Se ha diversificado la categorización de los materiales obturantes, su clasificación ya no solo está en función de sus propiedades físicas (API, Manual de Fluidos de Perforación, 2001) sino también en sus propiedades químicas (Mortadha, Runar, Geir, & Oscar, 2014). Por ejemplo:
 - MAGMA FIBER: material soluble en ácido.
 - FORM A-SQUEEZE: material de alta tasa de filtrado.
 - DIAMOND SEAL: material hinchable/hidratable.
3. Las técnicas alternativas al uso de tapones de cemento evaluadas a nivel de laboratorio para el tratamiento de pérdidas totales son siguientes:
 - Inyección de polímero entrecruzado con Form-A-Set: Utilizarlo en formaciones consolidadas y a grandes profundidades donde exista alta temperatura.
 - Inyección de alta tasa de filtrado con Form-A-Squeeze: No puede ser utilizada en formaciones no consolidadas debido a la enorme cantidad de filtrado que este produce.
 - Utilización de material adsorbente/hidratable con Diamond Seal: Uso exclusivo para pozos direccionales.

4. Los gráficos de tendencia presentados en el capítulo 8 evidencian que la presencia de materiales obturantes y aditivos modifica las propiedades siguientes:
 - a) Viscosidad plástica. Las pruebas realizadas arrojaron que el aumento de la concentración de LCM's no afecta sensiblemente este parámetro, sin embargo se observó que si existe una influencia por parte de la presencia de polímeros, ejemplo: para el lodo 7 (inyección de polímero entrecruzado con Form-A-Set), los valores de la viscosidad plástica incrementaron notablemente a medida que la concentración del LCM aumentaba.
 - b) Punto cedente real y esfuerzo de gel. La introducción de sólidos inertes (LCM's) a la estructura base del fluido de perforación, hace que los sólidos dispersos en el fluido se acerquen más entre sí. Como el espacio entre las partículas disminuye, la atracción entre las mismas aumenta, ocasionando una fuerza de atracción electroquímica más elevada que se traduce en mayores valores de puntos cedentes reales y esfuerzo de gel. Esto se pudo comprobar en los valores obtenidos en las pruebas realizadas a los diferentes lodos.
 - c) Propiedades químicas: La presencia de las combinaciones de materiales obturantes puestas a prueba no influyó en las propiedades químicas del lodo, a excepción del Form-A-Set el cual disminuye el pH del lodo a medida se aumenta la concentración.
5. De acuerdo al nivel de pérdida que se tenga, los lodos con mejor rendimiento a nivel de laboratorio desde un punto de vista económico, técnico-operativo y ambiental son los siguientes:
 - a) Pérdidas por infiltración (<10 bbl/hr): Lodo 2 compuesto por los materiales obturantes: Granza de arroz, cáscara de nuez y Magma Fiber grueso en una proporción 1:1:1.
 - b) Pérdidas de hasta 250 bbl/hr: Lodo 6 compuesto por los materiales obturantes: granza de arroz, cáscara de nuez, carbón fino y aditivos: carboximetilcelulosa (Polypac) y aceite vegetal.

- c) Pérdidas totales en zonas profundas y/o sensibles al filtrado: Lodo 7 (inyección de polímero entrecruzado), agentes obturantes y aditivos: Form-A-Set.
- d) Pérdidas totales en zonas consolidadas no sensibles al filtrado: Lodo 8 (inyección de alta tasa de filtrado), agentes obturantes y aditivos: Form-A-Squeeze.
- e) Pérdidas totales en perforaciones direccionales. Lodo 9, material obturante: Diamond Seal.

11 RECOMENDACIONES.

1. Cuando ocurre una pérdida de circulación, siempre identificar:
 - a) La profundidad a la que ha ocurrido la pérdida.
 - b) El nivel de la pérdida en bbl/hr.
 - c) El tipo de formación e donde ocurrió la pérdida.
2. No utilizar inyección de alta tasa de filtrado (como el Form-A-Squeeze) en:
 - a) Formaciones no consolidadas.
 - b) Formaciones sensibles al filtrado

Al hacerlo puede generar derrumbes ocasionando que la pérdida se agrave.

3. Al usar Diamond Seal u otro material adsorbente en pérdidas direccionales, usar retardante o acelerador del crecimiento de partícula de tal forma que se adapte tanto a la gravedad de la pérdida así como también a la formación en donde ocurrió la pérdida.
4. La obtención de un laboratorio de evaluación de materiales de pérdida de circulación es un paso crucial para poder evaluar el desempeño y durabilidad de los materiales antes de ponerse a prueba en las plataformas de perforación, se recomienda a LaGeo S.A. de C.V. la adquisición de unos equipos de evaluación, principalmente para la realización de pruebas a materiales para el tratamiento correctivo estos equipos son: aparato de taponamiento de permeabilidad (PPA) y el aparato de pérdida de fluido a alta presión y a alta temperatura (HPHT) los cuáles se detallan en el Apéndice 1.
5. Evaluar el rendimiento del lodo 6 con una adición de polímeros (POLYPAC), como sustituto del Forma-A-Set de alto costo económico como opción para tratamientos de pérdidas totales.

12 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarenga, K., Amaya, J., & Sibrian, M. (2004). *Evaluacion y analisis de los beneficios de la ecoeficiencia en el proceso de la perforacion de pozos geotermicos*. San Salvador.
- API. (2001). *Manual de Fluidos de Perforación*. Dallas, Texas, Estados Unidos.
- API. (2001). *Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*. Dallas, Texas: American Petroleum Institute.
- API. (2014). *Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids* (Quinta ed.). American Petroleum Institute.
- (2009). *API Recommended Practice 13D – Rheology and hydraulics of oil-well*. American Petroleum Institute.
- API, E. (2001). *Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*. Dallas, Texas: American Petroleum Institute.
- Arenivar, B., Martinez, G., & Rivera, L. (Noviembre de 2012). Evaluacion fisicoquimica de arcillas naturales existentes en el campo geotermico de Berlin, Usulután y elaboracion del diagnostico de su comportamiento reologico durante la perforacion de pozos geotermicos. *Evaluacion fisicoquimica de arcillas naturales existentes en el campo geotermico de Berlin, Usulután y elaboracion del diagnostico de su comportamiento reologico durante la perforacion de pozos geotermicos*. San Salvador, El Salvador.
- ASME Shale Shaker Committee. (2005). *Drilling fluids processing handbook*. Estados Unidos: Elsevier.
- Barbara, P. S. (6 de Mayo de 2015). *PSB*. Obtenido de PSB :
<http://www.psb.com.sv/?cat=1012&title=Los%20Pozos%20Geot%20E9rmicos&lang=es>
- Baroid. (2000). *Manual de fluidos*. Houston, USA.

- Barrios, L. (13 de Mayo de 2015). Desarrollo de los Recursos Geotermicos en El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & Van Oort, E. (2012). Estabilización del pozo para prevenir pérdidas de circulación. *Oildfield Review*, Schlumberger.
- Cruz, A. (Mayo de 2011). *PerfoBlogger*. Obtenido de <http://achjj.blogspot.com/2012/03/sistemas-del-equipos-de-perforacion.html>
- Culver, G. (1998). Drilling and well construction. En G. Culver, *Drilling and well construction*.
- Chevron Phillips Chemical Company. (2014). Lost Circulation Guide.
- Darley, H., & Gray, G. (1988). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Houston, Texas, USA: Butterworth-Heinemann.
- Datwani, A. (2012). *REVIEW OF LOST CIRCULATION MECHANISMS WITH THE FOCUS ON LOSS TO NATURAL AND DRILLING INDUCED FRACTURES*.
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Elsevier.
- Energetica, U. d. (2003). *Formulacion de un programa basico de normalizacion para aplicaciones de energias alternativas y difusion*. Bogota.
- Esterlin, J., & Gomez, M. (2011). *Metodologia para el calculo de reologia e hidraulica para pozos estratigraficos profundos, usando una herramienta software (Compass y Well Plan)*. Bucaramanga.
- Fernandez, P. (26 de Abril de 2015). *Biblioteca sobre Energia Energetica*. Obtenido de Biblioteca sobre Energia Energetica: <http://es.pfernandezdiez.es/index.php?pageID=13>
- Garcés, I. (2012). *MINERALES INDUSTRIALES, Todo lo que mires está compuesto de ello*. Santiago: Universidad de Antofagata.

- García, M., & Vásquez, D. (2013). *ANALISIS DE TRATAMIENTO DE PERDIDAS DE CIRCULACION DE FLUIDOS DE PERFORACION DURANTE LA PERFORACION DE LOS POZOS TR-18B, TR-4R Y SV-5A*. Informe final Diplomado en especialización en geotermía, Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Postgrados, San Salvador.
- Garvizú, A., & Martínez, D. (22 de mayo de 2015). *Slideshare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/DiegoMartínez/sistemas-basicos-del-equipo-de-perforación>
- Hawker, D., Vogt, K., & Allan, R. (2001). *Procedimientos y Operaciones de Pozo*. Canadá.
- Hawker, D., Vogt, K., & Allison, R. (2002). *Procedimientos y operaciones en el pozo*. Alberta, Calgary, Canadá: Datalog.
- Hofkes, E., & Huisman, L. I. (1983). Small Community Water Supplies. En E. Hofkes, & L. I. Huisman, *Small Community Water Supplies* (págs. 379-382). Wiley Edition.
- Instituto Americano del Petróleo. (2001). *Manual de fluidos de perforación*. Dallas, Texas, Estados Unidos.
- INTEQ, B. H. (1998). *Fluidos Manual de Ingeniería*. Houston, Texas, USA.
- Kenty-Joan, J. (2004). *The Geothermal Energy Industry of El Salvador*. Cambridge.
- LaGeo. (2008). *Informe final pozo AH-35 C*. Ahuachapán.
- LaGeo. (2011). *Informe final de pozo CHI-4A*. San Miguel.
- LaGeo. (2013). *Informe de perforación de pozo TR-4R*. Usulután.
- LaGeo. (2014). *Informe de perforación pozo SV-5B*. San Vicente.
- Llopis, G., & Angulo, R. (2008). El calor de la Tierra. *Guia de la Energia Geotermica*, 14-15.
- Mano, S. (2009). *Patente n° 7,534,744*. Estados Unidos.

- Marzolf, N. (27 de Abril de 2015). *Emprendimiento de la Energia Geotermica en Colombia*. Obtenido de Bitstream:
<http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6558/Energia%20Geotermica%20Colombia%207-1-14finalweb.pdf?sequence=1>
- Mortadha, A., Runar, N., Geir, H., & Oscar, c. (2014). Review of Lost Circulation Materials and Treatment with an Updated Classification. *AADE*.
- PDVSA. (2002). *Fluidos de perforación*. Venezuela: Centro Internacional de Educación y Desarrollo.
- Schlumberger. (2006). *Equipment911.com*. Obtenido de www.equipment911.com/downloads/LosCincoSistemasdelEquipo.pdf
- Schlumberger. (2013). Definición de fluidos de perforación. *Oilfield review*, 25(1), 67-69.
- Schlumberger*. (10 de Julio de 2015). Obtenido de Schlumberger:
http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/m/marsh_funnel.aspx
- Servicio Geologico Mexicano*. (20 de Abril de 2015). Obtenido de Servicio Geologico Mexicano: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/riesgos/tectonica/tectonica-de-placas>
- Sociedad Mexicana de Ingenieria*. (15 de Mayo de 2015). Obtenido de Sociedad Mexicana de Ingenieria: <http://www.smis.org.mx/htm/sm2.htm>
- UNAM. (21 de Abril de 2015). *Energia e Impacto Ambiental*. Obtenido de Energia e Impacto Ambiental: <https://energiaunam.wordpress.com/category/energia-geotermica/>

13 GLOSARIO

A

Acuífero Formación geológica que permite el almacenamiento y el desplazamiento o transmisión del agua por poros o grietas, proporcionando cantidades apreciables de agua para su explotación de una manera relativamente fácil y económica.

Acuoso Se refiere al agua o a las sustancias a base de agua.

Aditivo de Lodo Cualquier material agregado a un fluido de perforación para lograr un propósito en particular.

Aditivos de Pérdida de Circulación Materiales agregados al lodo para controlar o prevenir la pérdida de circulación. Estos materiales son agregados en cantidades variables y se clasifican como fibras, escamas o gránulos.

Agente Espumante Una sustancia que produce burbujas relativamente estables en la superficie de contacto aire-líquido, debido a la agitación, aireación o ebullición. En la perforación con aire o gas, se agregan agentes espumantes para ayudar a eliminar los influjos de agua y prevenir la formación de anillos de lodo.

Agente Floculante Sustancias, como la mayoría de los electrolitos, algunos polisacáridos y ciertos polímeros naturales o sintéticos, que producen el espesamiento de la consistencia de un fluido de perforación. En los fluidos plásticos de Bingham, el punto cedente y el esfuerzo de gel aumentan.

Agentes Obturantes Cualquiera de muchos materiales que son agregados a los fluidos de perforación para restablecer la circulación.

Aireación La técnica de inyectar aire o gas en cantidades variables dentro de un fluido de perforación para reducir el cabezal hidrostático.

API American Petroleum Institute, organismo estadounidense de la industria petrolera, fundada en 1920, la API es la organización de mayor autoridad normativa de los equipos de perforación y producción petrolera.

Aprisionamiento: Es la situación que se presenta cuando la columna de perforación o sarta se atasca en el pozo. Esta situación puede presentarse durante la perforación, en maniobras de cambio de barrena o calibrado o bien durante las entubaciones. Normalmente se generan maniobras de pesca.

Arcilla Una tierra plástica, blanda, de varios colores, comúnmente un silicato hidratado de alúmina, formado por la descomposición de feldespato y otros silicatos de aluminio. Los minerales arcillosos son generalmente insolubles en agua, pero se dispersan bajo hidratación, esfuerzos de corte como la molienda, los efectos de velocidad, etc., formando partículas extremadamente pequeñas con tamaños comprendidos entre tamaños submicrónicos y 100 micrones.

Arcillas Naturales Las arcillas naturales, a diferencia de las arcillas comerciales, son arcillas que son encontradas durante la perforación de varias formaciones. El rendimiento de estas arcillas varía considerablemente, y éstas pueden o no ser incorporadas deliberadamente dentro del sistema de lodo.

B

Balanza para el lodo Es un instrumento que consta de un recipiente un brazo graduado con peso deslizante que reposa sobre un punto de apoyo y se le utiliza para medir la densidad del lodo.

Baritina: Mineral que se utiliza como densificante para los lodos de perforación. Posee un peso específico de 4.2.

Barrena La herramienta utilizada para triturar o cortar la roca. Todo lo que se encuentra en un equipo de perforación asiste directa o indirectamente a la barrena para la trituración o el corte de la roca.

Barril Unidad de medida Americana que equivale a 0.158984 m^3

Bentonita Una arcilla coloidal plástica que se compone principalmente del mineral montmorilonita de sodio, un silicato de aluminio hidratado. Para ser usada en fluidos de perforación, la bentonita tiene un rendimiento mayor que 85 bbl/tonelada. El término genérico “bentonita” no constituye un nombre mineralógico exacto, y la arcilla no tiene una composición mineralógica definida.

Bombas de Lodo Bombas en el equipo de perforación, usadas para hacer circular los fluidos de perforación.

Boquillas Orificios que se colocan a la barrena para el pasaje de fluido y orientar el chorro con mayor eficiencia.

BOP Se refiere al conjunto de válvulas colocadas en la boca del pozo, para prevenir un Blow Out.

Blow-Out Situación de descontrol de pozo

C

Cabezal Hidrostático La presión ejercida por una columna de fluido, generalmente expresada en libras por pulgada cuadrada (lbs/pulg.^2) Para determinar el cabezal hidrostática en psi a una profundidad determinada, multiplicar la profundidad en pies por la densidad en libras por galón por 0,052.

Cabeza de inyección: Es el elemento que conforma una conexión entre las bombas de inyección y el sondeo permitiendo rotar la columna.

Carboximetilcelulosa de Sodio (CMC) Disponible en varios grados de viscosidad y pureza. Un material orgánico usado para controlar la filtración, suspender el material densificante y aumentar la viscosidad en los fluidos de perforación. Usado conjuntamente con bentonita cuando se desea obtener lodos de bajo contenido de sólidos.

Casing Se refiere a las cañerías que se utilizan para la entubación de los pozos.

Cementación Se refiere a la operación de inyectar una lechada de cemento a través de la tubería de perforación, hasta la zapata haciéndola subir por el espacio anular hasta una altura predeterminada o bien hasta la boca de pozo. La finalidad es la de fijar la tubería.

Centrífuga Un aparato para la separación mecánica de los sólidos de alta gravedad específica de un fluido de perforación. Se usa generalmente en lodos densificados para recuperar el material densificante y desechar los sólidos perforados. La centrífuga usa una rotación mecánica a alta velocidad para lograr esta separación, a diferencia del separador del tipo ciclónico donde la energía del fluido sola proporciona la fuerza de separación.

Circulación El movimiento del fluido de perforación desde el tanque de succión, pasando a través de la bomba, la tubería de perforación, la barrena, el espacio anular en el pozo, y luego regresando de nuevo al tanque de succión. El tiempo requerido suele ser llamado tiempo de circulación.

Circulación Inversa El método que consiste en invertir el flujo normal de un fluido de perforación, circulando hacia abajo en el espacio anular y hacia arriba en la columna de perforación.

Circulación, Pérdida de (o Pérdida) El resultado de la fuga de fluido de perforación dentro de la formación a través de fisuras, medios porosos o dentro de fracturas.

Circular pozo Se refiere a la operación de bombear el lodo de perforación por el interior de la columna haciéndolo retornar a la superficie por el espacio anular. Se efectúa esta operación para recuperar muestras de fondo o bien para dejar el pozo limpio antes de una maniobra determinada.

Columna de perforación Conducto tubular de acero provisto de extremos roscados especiales denominados uniones de tubería. La columna de perforación conecta los componentes de superficie del equipo de perforación con el arreglo de fondo de pozo y la barrena, tanto para bombear el fluido de perforación a la barrena como para poder subir, bajar y hacer rotar el arreglo de fondo de pozo y la barrena.

Conjunto de fondo Se refiere a la descripción de los elementos que componen la columna perforadora desde la barrena y hasta cierta longitud.

Consistencia del Revoque De acuerdo con API RP 13B*, las anotaciones “duro”, “blando”, “resistente”, “gomoso”, “firme” etc. pueden usarse para describir de una forma general la consistencia del revoque.

Corte (Esfuerzo de Corte) Una acción, resultante de las fuerzas aplicadas, que causa o tiende a causar el deslizamiento entre dos partes contiguas de un cuerpo, en una dirección paralela a su plano de contacto

D

Daños a la Formación Daños a la productividad de un pozo, causados por la invasión de partículas de lodo o filtrados de lodo dentro de la formación.

Daños Superficiales Daños a la formación, pérdida de permeabilidad y posiblemente porosidad en la cara del pozo, debido a las prácticas o a los fluidos de perforación o completación.

Densidad Materia medida como masa por volumen unitario, expresado en libras por galón (*lb/gal*), kilogramos por litro (*kg/lt*) y libras por pie cúbico *lb/pie*³. Muchas veces se usa “peso” para hacer referencia a la densidad.

Densidad Equivalente de Circulación (ECD) Para un fluido en circulación, la densidad equivalente de circulación en (*lb/gal*), es igual al cabezal hidrostático (psi) más la caída total de presión anular (psi) dividida por la profundidad (pies) y por 0,052.

Derrumbe Una forma grave de desprendimiento. Ver Desprendimiento.

Derrumbe por presión El colapso parcial o completo de las paredes de un pozo como resultado de las presiones internas, debido principalmente al hinchamiento causado por la hidratación o las presiones de gas de la formación.

Desarenador, Deslimador Aparato de remoción de sólidos basado en el hidrociclón, para separar la arena o el limo del lodo.

Desprendimiento El colapso parcial o completo de las paredes de un pozo, como resultado de formaciones incompetentes y no consolidadas; ángulo o pendiente alta; y humectación a lo largo de los planos internos de estratificación.

E

Emulsificante o Agente Emulsificante Una sustancia usada para producir una emulsión de dos líquidos que no son miscibles. Los emulsificantes se pueden dividir, según su comportamiento, en agentes iónicos y no iónicos. Los tipos iónicos también se pueden

dividir en tipos aniónicos, catiónicos y anfóteros, según la naturaleza de los grupos iónicos activos.

Emulsión Una mezcla líquida heterogénea, sustancialmente permanente, de dos o más líquidos que normalmente no se disuelven uno en otro, pero que son mantenidos en suspensión o dispersión, uno en otro, por agitación mecánica, o más frecuentemente, mediante la adición de pequeñas cantidades de sustancias llamadas emulsificantes. Las emulsiones pueden ser mecánicas, químicas o una combinación de ambas. Los tipos de emulsión son aceite en agua o agua en aceite.

Emulsión de Aceite en Agua Un fluido de perforación en el cual el contenido de aceite suele ser mantenido entre 3 y 7%, y raramente a más de 10% (puede ser considerablemente más alto). El aceite es emulsionado en agua dulce o agua salada por un emulsificante químico. A veces se puede añadir CMC, almidón o goma a los sistemas de agua dulce y agua salada.

Esfuerzo de Gel La capacidad o medida de la capacidad de un coloide para formar geles. El esfuerzo de gel es una unidad de presión reportada generalmente en $lb/100\text{ pies}^2$. Constituye una medida de las mismas fuerzas entre partículas de un fluido que las que son determinadas por el punto cedente, excepto que el esfuerzo de gel se mide bajo condiciones estáticas, mientras que el punto cedente se mide en condiciones dinámicas. Las medidas comunes de esfuerzo de gel son los geles iniciales y los geles a 10 minutos.

Esfuerzo de Gel, 10-Min. El esfuerzo de gel medido a 10 minutos de un fluido es la indicación máxima (deflexión) registrada por un viscosímetro de indicación directa, después de que el fluido haya permanecido estático por 10 minutos. Se reporta en $lb/100\text{ pies}^2$

Esfuerzo de Gel, Inicial El esfuerzo de gel inicial medido de un fluido es la indicación máxima (deflexión) registrada por un viscosímetro de indicación directa, después de que el fluido haya permanecido estático por 10 segundos. Se reporta en $lb/100\text{ pies}^2$

Espacio Anular El espacio entre la columna de perforación y la pared del pozo o de la tubería de revestimiento.

Espesor del Revoque La medida del espesor del revoque depositado por un fluido de perforación contra un medio poroso, generalmente de acuerdo con la prueba de filtración API estándar. El espesor del revoque se reporta generalmente en $1/32$ de pulgada.

Espuma Un sistema de dos fases similar a una emulsión, donde la fase dispersa es un gas o el aire.

Estabilizador Se llama así a la herramienta colocada entre los portamechas, la cual posee aletas helicoidales del mismo diámetro que la barrena con la cual se perfora. Depende de su posición la función que cumple, es decir; centrar la barrena, ganar ángulo o bajar el mismo.

F

Falla Estructura geológica que consiste en una fractura de la roca, a lo largo de la cual ha habido un perceptible deslizamiento.

Fase Continua La fase fluida que rodea completamente la fase dispersa que puede constar de coloides, aceite, etc.

Fase Dispersa La fase esparcida (sólido, líquido o gas) de una dispersión. Las partículas están finamente divididas y completamente rodeadas por la fase continua.

Fibras o Materiales Fibrosos Cualquier material filamentosos y duro, usado para prevenir la pérdida de circulación o restablecer la circulación. En el campo, el término “fibras” suele referirse a fibras que provienen de plantas.

Filtración El proceso de separación de sólidos suspendidos de su líquido, forzando el líquido a través de un medio poroso. Dos tipos de filtración de fluido ocurren en un pozo: filtración dinámica durante la circulación y filtración estática cuando el fluido no está circulando.

Filtrado El líquido forzado a través de un medio poroso durante el proceso de filtración.

Filtro Un dispositivo que usa un tipo de revestimiento para separar los sólidos de un líquido. Los sólidos se depositan en la superficie y cerca de la superficie del revestimiento del dispositivo. El revestimiento puede constar de tierra diatomácea, tela, papel u otras sustancias.

Filtro Prensa Un dispositivo para determinar el filtrado de un fluido de perforación cuyas especificaciones cumplen con API RP 13B.

Fluidez Recíproco de la viscosidad. Medida de la velocidad a la cual un fluido es deformado continuamente por un esfuerzo de corte. Facilidad de flujo.

Fluido Una sustancia que adopta fácilmente la forma del recipiente en el que se coloca. El término incluye líquidos y gases. Se trata de una sustancia en la que la aplicación de cada sistema de esfuerzos (excepto la presión hidrostática) producirá una deformación continuamente creciente, sin relación alguna entre el régimen de deformación en cualquier instante y la magnitud de los esfuerzos en ese instante. Los fluidos de perforación son generalmente fluidos newtonianos y plásticos, pocas veces pseudoplásticos y raramente dilatantes.

Fluido Dilatante Un fluido dilatante o plástico inverso se compone generalmente de una alta concentración de sólidos bien dispersos que presentan una curva de consistencia no lineal que pasa por el punto de origen. La viscosidad aparente aumenta instantáneamente cuando la velocidad de corte aumenta. El punto cedente, determinado por cálculos convencionales a partir de las indicaciones del viscosímetro de indicación directa, es negativo; sin embargo, el punto cedente verdadero es nulo.

Fluido Newtoniano Los fluidos básicos y más simples, desde el punto de vista de la viscosidad, en los cuales el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Estos fluidos comenzarán a moverse inmediatamente cuando se aplica una presión o fuerza mayor que cero. Los ejemplos de fluidos newtonianos incluyen el agua, el aceite diésel y la glicerina. El punto cedente determinado por un viscosímetro de indicación directa es cero.

Fluido con Reología Plástica Invertida Un fluido complejo no newtoniano en el cual la fuerza de corte no es proporcional a la velocidad de corte. Se requiere una presión definida para iniciar y mantener el movimiento del fluido. El flujo tapón es el tipo inicial de flujo y sólo ocurre en fluidos plásticos. La mayoría de los fluidos de perforación son fluidos plásticos. El punto cedente determinado por el viscosímetro de indicación directa, es mayor que cero.

Fluido Pseudoplástico Un fluido complejo no newtoniano que no tiene propiedades tixotrópicas. Una presión o fuerza mayor de cero iniciará el flujo del fluido. La viscosidad aparente o consistencia disminuye instantáneamente cuando la velocidad de corte aumenta, hasta llegar a un punto determinado en el que la viscosidad se mantiene constante. El punto cedente determinado por el viscosímetro de indicación directa es positivo, igual que en los fluidos plásticos de Bingham; sin embargo, el punto cedente verdadero es cero. Un ejemplo de fluido pseudoplástico es la goma guar en agua dulce o agua salada.

Flujo del Fluido El estado de la dinámica de los fluidos para un fluido en movimiento es determinado por el tipo de fluido (por ej., newtoniano, plástico, pseudoplástico, dilatante),

las propiedades del fluido tales como la viscosidad y la densidad, la geometría del sistema, y la velocidad. Por lo tanto, bajo determinadas condiciones y propiedades del fluido, el flujo del fluido puede ser descrito como flujo tapón, flujo laminar (también llamado newtoniano, ordenado, paralelo o viscoso) o flujo turbulento. *Ver los términos ya mencionados y el Número de Reynolds.*

Flujo Laminar Elementos de fluido que fluyen a lo largo de líneas de flujo paralelas a las paredes del canal de flujo. En el flujo laminar, el fluido se mueve en láminas o secciones, con una velocidad diferencial a través del frente que varía de cero en la pared, a un valor máximo cerca del centro del flujo. El flujo laminar constituye la primera etapa de flujo en un fluido newtoniano y la segunda etapa en un fluido plástico de Bingham. Este tipo de movimiento también se llama flujo paralelo, ordenado o viscoso.

Flujo Tapón El movimiento de un material como unidad, sin corte dentro de la masa. El flujo tapón es el primer tipo de flujo demostrado por un fluido plástico, una vez que ha superado la fuerza inicial requerida para producir el flujo.

Flujo Turbulento Flujo de fluido en el que la velocidad a un punto determinado cambia constantemente de magnitud, así como la dirección del flujo, siguiendo cursos erráticos y continuamente variables. El flujo turbulento constituye la última etapa del flujo en un fluido.

Formaciones Cavernosas Una formación que tiene cavidades voluminosas, generalmente como resultado de la disolución causada por las aguas de la formación, las cuales pueden o no estar presentes.

Fragüe Tiempo de espera para que el cemento inyectado alrededor de una tubería endurezca.

Fumarola Emanación de gases y vapores a altas temperaturas, que salen por pequeñas grietas en zonas de actividad volcánica.

Funciones de los Fluidos de Perforación La función más importante de los fluidos de perforación en la perforación rotatoria es transportar los recortes desde el fondo del pozo hasta la superficie. Algunas otras funciones importantes incluyen: controlar las presiones subsuperficiales, enfriar y lubricar la barrena y la columna de perforación, depositar un revoque impermeable, etc.

G

Gel Un estado de una suspensión coloidal en el que los esfuerzos de corte inferiores a un valor finito no pueden producir ninguna deformación permanente. El esfuerzo de corte mínimo que producirá una deformación permanente se conoce como resistencia al corte o esfuerzo de gel del gel considerado. Los geles suelen ocurrir cuando las partículas coloidales dispersas tienen una gran afinidad con el medio dispersante, i.e., son liofílicos. Por lo tanto, los geles ocurren generalmente con bentonita en agua.

Gel Plano Una condición en la que el esfuerzo de gel a 10 minutos es básicamente igual al esfuerzo de gel inicial.

Gelificación Asociación de partículas para formar una estructura continúa.

Gelificado Jerga del campo petrolífero que se refiere generalmente a cualquier fluido con un esfuerzo de gel alto y/o propiedades muy viscosas. Frecuentemente, un estado de floculación grave.

Geotermia Conjunto de técnicas utilizadas para la exploración, evaluación y explotación de la energía geotérmica.

Gravedad API La gravedad (peso por volumen unitario) del crudo u otros fluidos relacionados, medida con un sistema recomendado por el Instituto Americano del Petróleo (API). Se puede relacionar con la

Gravedad Específica (SG) con la siguiente fórmula:

$$\text{Grados API} = 141,5 \text{ SG } 60^{\circ}\text{F} - 131,5$$

Gravedad, Específica El peso de un volumen determinado de cualquier sustancia comparado con el peso de un volumen igual de agua a la temperatura de referencia. Para los gases, se suele usar el aire como sustancia de referencia.

Gradiente geotérmico es el incremento de temperatura desde la superficie hacia el interior de la Tierra, que origina un continuo flujo de calor desde el interior a la superficie.

H

Hidratación El acto por el cual una sustancia adquiere agua por absorción y/o adsorción.

Hidráulica Término que trata sobre los líquidos en movimiento y su accionar, analiza la velocidad de los fluidos, presiones y potencias que intervienen

I

Indicador Sustancias en valoraciones ácido base que, en solución, cambian de color o se vuelven incoloras, cuando la concentración de iones hidrógeno alcanza un valor definido; estos valores varían con el indicador. En otras valoraciones, como las determinaciones de cloruro, dureza y otras, estas sustancias cambian de color al final de la reacción. Los indicadores comunes son la fenolftaleína, el cromato de potasio, etc.

Ingeniero, de Lodos o Fluidos de Perforación Persona versada en fluidos de perforación, cuyas responsabilidades son gerenciar, poner en aplicación y mantenerlos diferentes tipos de programas de lodo del pozo de petróleo.

Iniciar la Perforación El comienzo de las operaciones de perforación en un pozo nuevo.

Invasión Movimiento de un líquido fuera de su área asignada, dentro de otra área, posiblemente resultando en un cambio físico o químico del área invadida. Se refiere generalmente al movimiento de salmuera, lodo o filtrado de lodo dentro de una formación geológica.

J

Junta de Tubería de Perforación Una unión de tubería de perforación que consta de conexiones macho y hembra de varios diseños y tamaños. El diseño interno de las juntas de tubería de perforación tiene un efecto importante sobre la hidrología del lodo.

K

Kelly o Junta Kelly Una tubería pesada cuadrada o de otra configuración que se introduce en un agujero similar en la mesa rotatoria para hacer girar la tubería de perforación.

L

Lechada Mezcla de agua y cemento que se bombea al pozo durante la operación de cementación.

Libra Equivalente Una unidad de laboratorio usada en pruebas piloto. Un gramo o libra equivalente, al ser añadido a 350 ml de fluido, es equivalente a 1 *lb/bbl*,

Limpieza con Chorro El proceso que consiste en eliminar periódicamente una porción o la totalidad del agua, lodo y/o sólidos de los tanques, generalmente mediante el bombeo a través de un conjunto de tobera de chorro.

Línea de Desalojo Línea de flujo para la perforación con aire o gas.

Línea de Matar Una línea conectada al espacio anular, por debajo de los preventores de reventones, para bombear dentro del espacio anular mientras los preventores están cerrados.

Línea de Relleno La línea a través de la cual se introduce el fluido dentro del pozo.

Lodo Un fluido de perforación base agua o aceite cuyas propiedades han sido modificadas por sólidos – comerciales y/o nativos, disueltos y/o suspendidos. Se usa para hacer circular los recortes fuera del pozo y cumplir otras funciones durante la perforación de un pozo. Lodo es el término que se suele atribuir con mayor frecuencia a los fluidos de perforación.

Lodo Base Agua Fluidos de perforación convencionales comunes. El agua es el medio de suspensión para los sólidos y constituye la fase continua, independientemente de que el fluido contenga o no aceite.

Lodo de Emulsión de Aceite en Agua Comúnmente llamado “lodo de emulsión”.Cualquier lodo base agua convencional o especial al cual se ha agregado aceite. El aceite constituye la fase dispersa y puede ser emulsionado en el lodo mecánica o químicamente.

Lodo de Emulsión Inversa de Aceite Una emulsión inversa es una emulsión de agua en aceite en la que el agua dulce o agua salada constituye la fase dispersa y el aceite diésel, crudo u otro aceite constituye la fase continua. El agua aumenta la viscosidad y el aceite reduce la viscosidad.

Lodo de pH Alto Un fluido de perforación con un pH superior a 10,5. Un lodo de alta alcalinidad.

Lodo o Fluido de Perforación Un fluido en circulación que se usa en la perforación rotatoria para cumplir cualquiera o todas las funciones requeridas en la operación de perforación.

Lodos Tratados con Cal Comúnmente llamados lodos “base cal”. Estos sistemas de pH alto contienen la mayoría de los aditivos convencionales de agua dulce, a los cuales se agrega cal apagada para conferir propiedades especiales. Las alcalinidades y los contenidos de cal varían de bajos a altos.

Lutita Roca arcillosa de grano fino con un clivaje de tipo pizarra, a veces conteniendo una sustancia orgánica petrolífera.

Llenar el Pozo Bombeo continuo o intermitente de fluido de perforación dentro del pozo, para mantener el nivel de fluido en el pozo cerca de la superficie. Esto tiene por objeto evitar el riesgo de reventón, intrusión de agua y/o derrumbe del pozo, por ej., cuando se saca la tubería.

M

Material Densificante Cualquiera de los materiales de alta gravedad específica usados para aumentar la densidad de los fluidos de perforación. Este material es generalmente barita, pero puede ser hematita, etc. En aplicaciones especiales, la caliza también puede ser considerada como un material densificante.

Mf La alcalinidad al anaranjado de metilo (Mf) del filtrado, reportada como número de milímetros de ácido 0,02 Normal (N/50) requerido por milímetro de filtrado para lograr el punto final de anaranjado de metilo (pH 4,3).

Mica Un material en escamas de origen natural, de tamaños variables, usado para combatir la pérdida de circulación. Químicamente, un silicato de aluminio alcalino.

Montaje Alineación y armado de los componentes del equipo de perforación.

N

Número de Reynolds Un número adimensional, Re , que aparece en la teoría de dinámica de fluidos.

El número es importante en los cálculos de hidráulica de fluidos para determinar el tipo de flujo de fluido, i.e., laminar o turbulento. El intervalo transicional está comprendido entre 2.000 y 4.000; por debajo de 2.000, el flujo es laminar, y por encima de 4.000, el flujo es turbulento.

P

Pega Una condición según la cual la tubería de perforación, la tubería de revestimiento u otros dispositivos pueden quedar bloqueados en el pozo. Puede ocurrir durante la perforación, mientras que se mete la tubería de revestimiento en el pozo o cuando se levanta la tubería de perforación. En general, esto resulta en una operación de pesca.

Pegadura (en la Pared) por Presión Diferencial Pegadura que ocurre porque una parte de la columna de perforación (generalmente los portamechas) está embutida en el revoque, resultando en una distribución no uniforme de la presión alrededor de la circunferencia de la tubería. Las condiciones esenciales para la pegadura requieren una formación permeable y una presión diferencial.

Penetración, Velocidad de (ROP) La velocidad en pies por hora, a la cual la barrena avanza para profundizar el pozo.

Pérdida de Fluido (Filtrado) Medida de la cantidad relativa de pérdida de fluido (filtrado) a través de formaciones o membranas permeables, cuando el fluido de perforación está sometido a una presión diferencial.

Pérdida de Presión La pérdida de presión en un conducto o espacio anular, debido a la velocidad del líquido en el conducto, las propiedades del fluido, la condición de la pared de

la tubería y la alineación de la tubería. En ciertos sistemas de mezcla de lodo, la pérdida de cabezal hidrostático puede ser considerable.

Pérdida de Retornos *Ver Circulación, Pérdida de (o Pérdida).*

Perforación direccional Operación en la cual el pozo es desviado intencionalmente de la vertical con un ángulo y trayectoria controlada,

Perforación Rotatoria El método de perforar pozos que depende de la rotación de una columna de tubería de perforación hasta el fondo donde está conectada una barrena. Se hace circular un fluido para eliminar los recortes.

Pesca Operaciones realizadas en el equipo de perforación para recuperar del pozo las secciones de tuberías, portamechas, basuras u otros objetos obstruyentes que están pegados o que han caído en el pozo.

Peso En la terminología de los lodos, esto se refiere a la densidad de un fluido de perforación. Se expresa normalmente en lb/gal, lb/pies³ o kg/l.

Pf La alcalinidad de fenolftaleína del filtrado, reportada como número de mililitros de ácido sulfúrico 0,02 Normal (N/50) requeridos por mililitro de filtrado, para lograr el punto final de fenolftaleína.

Plasticidad La propiedad que poseen algunos sólidos, especialmente arcillas y lechadas de arcillas, para cambiar de forma o fluir bajo un esfuerzo aplicado, sin desarrollar planos de corte o fracturas. Estos cuerpos tienen puntos cedentes, y se debe aplicar un esfuerzo antes de que el movimiento pueda comenzar. A partir del punto cedente, la cantidad de movimiento comienza. A partir del punto cedente, la cantidad de movimiento es proporcional al esfuerzo aplicado, pero cesa cuando se elimina el esfuerzo.

Pm La alcalinidad de fenolftaleína del lodo, reportada como número de mililitros de ácido sulfúrico 0,02 Normal (N/50) requeridos por mililitro de lodo.

Poros Un volumen de espacio en una sustancia sólida. En nuestra industria, esto se refiere al espacio vacío dentro de una roca o matriz (véase).

Porosidad La cantidad de espacio vacío en una roca de formación, generalmente expresada como porcentaje de vacío por volumen total. La porosidad absoluta se refiere a la cantidad total de espacio poral en una roca, independientemente de que este espacio pueda o no ser sujeto a la penetración del fluido. La porosidad efectiva se refiere a la cantidad de espacios porales conectados, i.e. el espacio disponible para la penetración de fluido.

Presión Diferencial La diferencia de presión entre la presión hidrostática de la columna de fluido de perforación y la presión de la formación a cualquier profundidad determinada del pozo. Puede ser positiva, nula o negativa.

Puente Una obstrucción en un pozo formada por la intrusión de las formaciones subsuperficiales.

Punto Cedente En la terminología de los fluidos de perforación, el punto cedente significa el valor de cedencia. De los dos términos, punto cedente es la expresión más usada.

R

Recortes Pequeños fragmentos de formación que resultan de la acción desbastadora, raspante y/o triturante de la barrena.

Reología La ciencia que trata de la deformación y del flujo del agua.

Resistencia al Corte Una medida del valor de corte del fluido. El esfuerzo de corte mínimo que producirá una deformación permanente.

Reventón La fuga incontrolada de fluido de perforación, gas, aceite o agua del pozo, causada cuando la presión de la formación es más alta que el cabezal hidrostático del fluido en el pozo.

Revoque Los sólidos suspendidos que se depositan sobre un medio poroso durante el proceso de filtración.

Revoque de Pared El material sólido depositado a lo largo de la pared del pozo, resultando de la filtración de la porción fluida del lodo dentro de la formación.

Romper la Circulación Iniciar el movimiento del fluido de perforación después de que ha permanecido estático en el pozo.

S

Sellado con Lodo Comúnmente considerado como el efecto sellante u obturante de un fluido de perforación.

Sólidos, Suspendidos Sólidos que no están disueltos y que pueden permanecer en suspensión en un fluido de perforación, rehabilitación o completación.

Sólidos, Suspendidos Sólidos que no están disueltos y que pueden permanecer en suspensión en un fluido de perforación, rehabilitación o completación.

Sub estructura Fundación de acero sobre la cual se monta el mástil, cuadro y motores.

T

Tanque de Lodo Instalaciones de tierra o metálicas de almacenamiento para el sistema de lodo de superficie. Los tanques de lodo que varían de volumen y número son de dos tipos: circulación y reserva. Las pruebas y el acondicionamiento del lodo son generalmente realizados en el sistema de tanque de circulación.

Textura del Revoque Las propiedades físicas de un revoque, medidas por la dureza, lubricidad y fragilidad.

Tixotropía La capacidad del fluido para desarrollar un esfuerzo de gel con el tiempo. La propiedad de un fluido que hace que éste desarrolle una estructura rígida o semirígida de gel cuando está en reposo, pero que puede volver a un estado fluido bajo agitación mecánica. Este cambio es reversible.

Torque Una medida de la fuerza o esfuerzo aplicado a un eje, causando su rotación. En un equipo de perforación rotatorio, esto se aplica especialmente a la rotación de la tubería de perforación, en lo que se refiere a su acción contra el calibre del pozo. El torque puede generalmente ser reducido mediante la adición de varios aditivos del fluido de perforación.

V

Valor de Cedencia El valor de cedencia (comúnmente llamado “punto cedente”) es la resistencia al flujo inicial o representa el esfuerzo requerido para iniciar el movimiento del fluido. Esta resistencia se debe a las cargas eléctricas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas. Los valores del punto cedente y de la tixotropía, respectivamente, son medidas de las mismas propiedades del fluido bajo condiciones dinámicas y estáticas. El valor de cedencia de Bingham, reportado en lb/100 pies², es determinado por el viscosímetro de indicación directa, restando la viscosidad plástica de la indicación tomada a 300 RPM.

Velocidad de Circulación El caudal del fluido de perforación en circulación, generalmente expresado en galones o barriles por minuto.

Velocidad de Corte La velocidad a la cual una acción resultante de las fuerzas aplicadas, causa o tiende a causar el deslizamiento entre dos partes adyacentes de un cuerpo, en una dirección paralela a su plano de contacto. Generalmente expresada en RPM.

Viscosímetro (Viscosímetro) Un aparato para determinar la viscosidad de un fluido o una suspensión. Los viscosímetros tienen diseños y métodos de prueba muy variables.

Viscosidad La resistencia interna de un fluido al flujo. Este fenómeno puede atribuirse a las atracciones entre las moléculas de un líquido, constituyendo una medida de los efectos combinados de adhesión y cohesión, a los efectos de las partículas suspendidas y al ambiente líquido. Cuanto mayor sea esta resistencia, mayor será la viscosidad.

Viscosidad Aparente La viscosidad que un fluido parece tener en un instrumento determinado, a la velocidad de corte especificada. Está en función de la viscosidad plástica y del punto cedente. La viscosidad aparente en centipoises, tal de indicación directa, es igual a 1/2 de la indicación a 600 RPM. En un fluido newtoniano, la viscosidad aparente es numéricamente igual a la viscosidad plástica.

Viscosidad Cinemática La viscosidad cinemática de un fluido es la relación de viscosidad (por ej., cP en g/cm-seg) a densidad (por ej., g/cm³), usando unidades coherentes. Se usa frecuentemente para evaluar la viscosidad de los aceites.

Viscosidad Marsh Comúnmente llamada viscosidad embudo. La viscosidad Marsh se reporta como número de segundos requeridos para que 1 qt de fluido determinado fluya a través del viscosímetro de Marsh. En algunas áreas, la cantidad de descarga es 1.000 cm³.

Viscosidad Plástica La viscosidad plástica es una medida de la resistencia interna al flujo de fluido, atribuible a la cantidad, tipo y tamaño de los sólidos presentes en un fluido determinado. Se expresa como número de dinas por cm^2 de esfuerzo de corte tangencial en exceso del valor de cedencia de Bingham que provocará una cantidad unitaria de corte. Este valor, expresado en centipoises, es proporcional a la pendiente de la curva de consistencia determinada en la región de flujo laminar para materiales que obedecen a la Ley de Flujo Plástico de Bingham. Cuando se usa el viscosímetro de indicación directa, la viscosidad plástica puede ser determinada restando la indicación a 300 RPM de la indicación a 600 RPM.

Viscosímetro de Marsh Un instrumento usado para determinar la viscosidad Marsh. El viscosímetro de Marsh es un recipiente con un orificio fijo en la parte inferior, de manera que cuando se llena con 1.500 cm^3 de agua dulce, un volumen de 1 qt (946 ml) sale en $26 \pm 0,5$ seg. Para una descarga de 1.000 cm^3 , el tiempo de descarga para el agua es $27,5 \pm 0,5$ seg.

Viscosímetro VG o Viscosímetro de Viscosidad-Gravedad El nombre comúnmente usado para el viscosímetro de lodo de indicación directa.

Viscosímetro, Indicación Directa El instrumento es un dispositivo de tipo rotacional accionado por un motor eléctrico o una manivela, y se usa para determinar la viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto cedente y esfuerzos de gel de los fluidos de perforación.

Z

Zapata Un arreglo corto, fabricado generalmente a partir de un collar de acero pesado y un interior de cemento perfilado, que se enrosca en el extremo inferior de una sarta de revestimiento.

14 APENDICES.

14.1 APÉNDICE 1. LABORATORIO DE EVALUACIÓN DE MATERIALES DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN.

La obtención de un laboratorio de evaluación de materiales de pérdida de circulación es un paso crucial para poder evaluar el desempeño y durabilidad de los materiales antes de ponerse a prueba en las plataformas de perforación. Tal como se ha mencionado en la investigación los materiales de pérdida de circulación pueden ser empleados tanto para tratamientos correctivos como preventivos, por lo que simular y determinar la eficacia de los materiales en cada uno de estos tratamientos es el principal objetivo.

Pruebas para tratamiento correctivo.

El aparato de taponamiento de permeabilidad (PPA) y el aparato de pérdida de fluido a alta presión y a alta temperatura (HPHT) son los equipos para la realización de las pruebas correctivas, dichos aparatos evalúan la capacidad de los materiales obturantes para sellar discos ranurados/discos afilados, los cuales simulan fracturas naturales/inducidas, también se utilizan discos de cerámica para simular pérdidas en formaciones porosas.

El fluido de perforación que contiene los materiales obturantes es forzado a pasar a través de estos discos bajo una alta presión y una alta temperatura. El desempeño de los materiales empleados es analizado tomando en cuenta los ml de filtrado transcurridos en media hora y por supuesto, el tiempo en el que se sella la ranura/poro. Además de lo anterior, también es sugerente realizar un análisis de tamaño de partícula.

Equipos involucrados en las pruebas de tratamiento correctivo

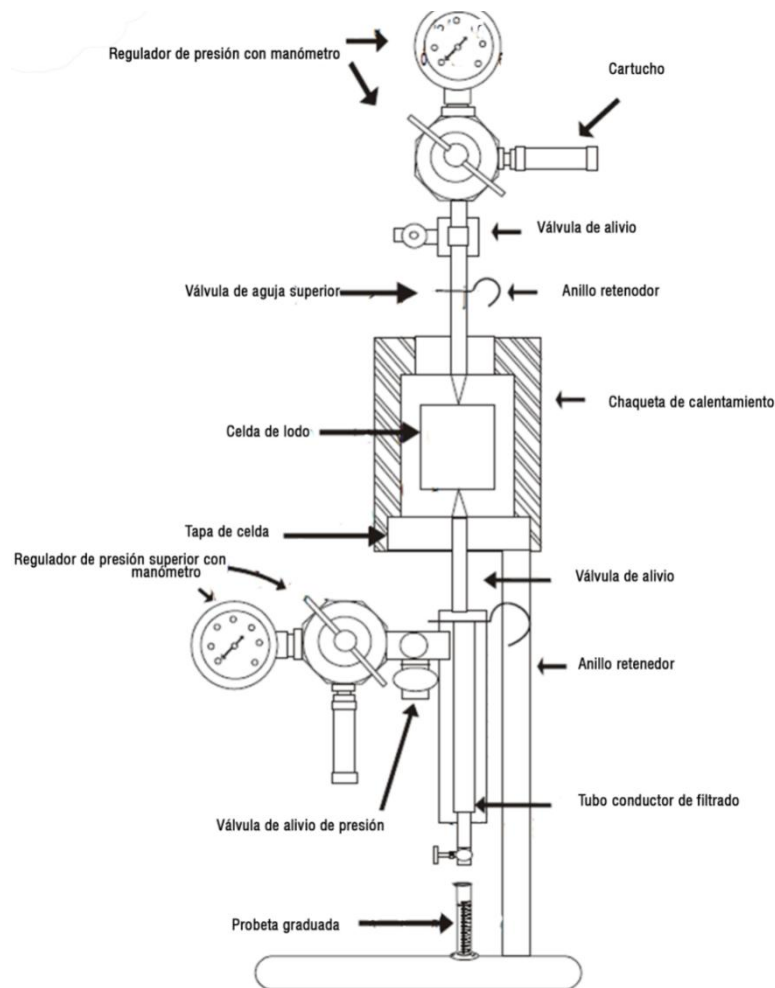


Figura 14.1. Aparato de filtrado a alta temperatura y presión.

Fuente. API, API Recommended Practice 13B-1, 2014

Mecanismo.

El fluido de perforación que contiene los materiales obturantes es forzado a pasar a través de estos discos bajo una alta presión y una alta temperatura. El desempeño de los materiales empleados es analizado tomando en cuenta los ml de filtrado transcurridos en media hora y

por supuesto, el tiempo en el que se sella la ranura/poro. Además de lo anterior, también es sugerente realizar un análisis de tamaño de partícula

Tratamiento preventivo.

La evaluación de los materiales obturantes para su desempeño en las aplicaciones de fortalecimiento de las paredes del agujero aún no está del todo establecida. En la mayoría de los casos el aparato de taponamiento de permeabilidad es utilizado para analizar el comportamiento de materiales obturantes selectos donde la carencia de filtrado es un factor deseable, sin embargo no es una buena medida debido a que la presión es constante durante toda la prueba, en ese sentido conviene dividir el análisis en 3 rubros.

1. Análisis enfocado a la medición del incremento de fractura y presión de re apertura.
2. Estudio de los materiales obturantes en su capacidad de sellado y la integridad del revoque formado.
3. Análisis de tamaños de partícula.

Equipo involucrado: Aparato de taponamiento de permeabilidad.



Figura 14.2. Aparato de taponamiento de permeabilidad.

Fuente. (API, API Recommended Practice 13B-1, 2014)

14.2 APÉNDICE 2. TEMA PROPUESTO.

Tema: *“Evaluación a nivel de laboratorio del desempeño de los materiales obturantes utilizados en pérdidas de circulación durante la perforación de pozos geotérmicos.”*

Descripción.

El tema pertenece a una línea de investigación orientada a la mitigación de las pérdidas de circulación⁹ a través de la utilización de materiales obturantes. Este aporte en particular tiene por objeto la evaluación directa de los materiales obturantes para los siguientes tratamientos:

1. Tratamiento preventivo: tiene por objeto simular el desempeño de los materiales de pérdida de circulación en las actividades de fortalecimiento de las paredes del pozo y evitar de esa forma futuras pérdidas y derrumbes durante la perforación, la prueba se realiza mediante el uso de un aparato de taponamiento de permeabilidad.
2. Tratamiento correctivo: tiene por objeto simular el desempeño de los materiales de pérdidas de circulación en las actividades de retorno de lodos mediante la capacidad de sello de fracturas inducidas, naturales y pérdidas en zonas porosas, las pruebas se realizan mediante el uso de un aparato de taponamiento de permeabilidad y un aparato de filtrado a alta presión y alta temperatura.

En concreto con la realización de las pruebas anteriores puede determinarse lo siguiente:

1. Máximo diámetro de abertura que el material puesto a prueba es capaz de sellar
2. El tiempo que se toma el material en sellar una determinada abertura.
3. Los ml de filtrado que deja pasar antes de sellar la fractura.
4. Calidad del revoque.

Distribución óptima de tamaños de partícula.

⁹ Situación en la cual el fluido de perforación no retorna al circuito de lodo debido a la presencia de zonas permeables o fracturadas.

Objetivo general.

Determinar a nivel de laboratorio el desempeño de los materiales obturantes tanto en tratamientos preventivos de fortalecimiento de las paredes del pozo, así como también en tratamientos correctivos en la mitigación de pérdidas de circulación.

Objetivos específicos.

- Simular pérdidas por fracturas inducidas/naturales y pérdidas en formaciones porosas.
- Proponer los mejores materiales obturantes en función de:
 1. La clasificación actualizada de materiales obturantes (materiales fibrosos, granulares, laminares, mezclas, solubles en ácido, de alta tasa de filtrado, etc.)
 2. La distribución del tamaño de partícula de los materiales.
 3. El tiempo de sellado.
 4. Prueba de filtrado.
 5. Costo total de lodo+materiales.
- Sentar las bases para los procedimientos a seguir en un laboratorio de evaluación de materiales de pérdida de circulación.

Equipos necesarios.

- Aparato de Taponamiento de Permeabilidad PPA (Figura 14.2).
- Aparato de Filtrado a Alta Presión y Alta Temperatura HPHT (Figura 14.1).

No de estudiantes.

2 egresados de Ing. Química.

15 ANEXOS

15.1 ANEXO 1. MÉTODO DE LOS FACTORES PONDERADOS

El método que aquí se presenta realiza un análisis cuantitativo en el que se compararán entre sí las diferentes alternativas para conseguir determinar una o varias alternativas válidas. El objetivo del estudio no es buscar una alternativa óptima sino una o varias que sean aceptables.

A continuación se presentan los pasos a seguir:

1. Determinar una relación de los factores relevantes.
2. Asignar un peso a cada factor que refleje su importancia relativa.
3. Fijar una escala a cada factor. Ej: 1-10 o 1-100 puntos.
4. Multiplicar la puntuación por los pesos para cada factor y obtener el total para cada alternativa.
5. Hacer una recomendación basada en la alternativa que haya obtenido la mayor puntuación, sin dejar de tener en cuenta los resultados obtenidos a través de métodos cuantitativos.

Para entender adecuadamente los conceptos planteados se realiza un ejemplo de aplicación que consiste en la elección de un lodo específico para el tratamiento de pérdida de circulación parciales (<250 bbl/hr); se han identificado un conjunto de criterios y se ha distinguido el grado de importancia de cada una de las alternativas en una escala de 0 a 10. Todo lo anterior se retoma de la Tabla 9.13.

Criterio de decisión.	Peso relativo %	Alternativas		
		Lodo 3	Lodo 5	Lodo 6
Técnico-operativo	70%	8.07	7.29	8.63
Económico	20%	4	6	10
Ambiental	10%	8.50	8.50	8.14
Total	100%	7.30	7.15	8.85

La puntuación total para cada alternativa se calcula como la suma de las puntuaciones para cada factor ponderadas según su importancia relativa. A modo de ejemplo, se presenta el cálculo para la alternativa “Lodo 3”:

$$P_{\text{lodo 3}} = 8.07 * 0.7 + 4 * 0.2 + 8.5 * 0.1 = 7.30.$$

Las alternativas “lodo 3” y “lodo 6” son mejores que la del “lodo 5”, por lo que esta última se rechaza. Entre las dos restantes, hay una diferencia considerable a favor del lodo 6. Vemos que el lodo 6 tiene la ventaja principal de ser más económica y con un mejor rendimiento técnico, lo cual es un factor importante, mientras que su punto débil es el mayor uso de aditivos lo cual se ve reflejado en el factor ambiental.

15.2 ANEXO 2. EVALUACIÓN AMBIENTAL.

Durante las operaciones de control de pérdidas de circulación los materiales que son utilizados como obturantes, entran en contacto con personas y con las formaciones, por lo que éstas no pueden ser altamente dañinas para la salud ni para el medio ambiente.

La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas ECHA, por el acrónimo de European Chemicals Agency en inglés, es la entidad reguladora líder a nivel mundial sobre el uso seguro de productos químicos. La ECHA maneja dos clasificaciones de sustancias químicas; Sustancias químicas preocupantes CoC, por el acrónimo de Chemicals of Concern en Inglés y sustancias químicas altamente preocupantes CoHC, del acrónimo de Chemicals of High Concern en Inglés.

Sustancias químicas preocupantes (CoC)

Las sustancias químicas preocupantes se definen como cualquier sustancia química que tiene el potencial de afectar negativamente a los receptores ecológicos o humanos debido a su concentración, la distribución, y el modo de toxicidad, pero que no son clasificados como químicos altamente preocupantes. La ECHA recomienda clasificar una sustancia química preocupante por la palabra GHS¹⁰ de “Peligro”.

Sustancias químicas altamente preocupantes (CoHC)

Una sustancia química altamente preocupante es una sustancia química que cumple cualquiera de los siguientes criterios: i) carcinógenas, mutágenas o tóxicas para la reproducción (CMR); ii) una sustancia persistente, bioacumulable y tóxica (PBT); iii) Los disruptores endocrinos o neurotoxinas; iv) Un producto químico cuya degradación de como resultado una COHC que cumple cualquiera de los criterios anteriores. (UNIDO, 2015).

En su página web oficial, el departamento de Protección al Medio Ambiente del Estado de Main de Estados Unidos comparte un listado de sustancias químicas de alta preocupación, extraído de la actualización trienal de la clasificación de los mismos realizado en Junio de

¹⁰Sistema Globalmente Armonizado de *Clasificación* y Etiquetado de Productos Químicos *GHS*, por el acrónimo de Global Harmonized System en inglés

2015 por el ECHA. Sí una sustancia química se encuentra en esta lista es clasificada como sustancia química de alta importancia.

Para llevar a cabo la evaluación ambiental de los lodos propuestos se siguió la metodología que a continuación se describe:

1. Clasificación de preocupación de los materiales involucrados en cada lodo

Se procedió a clasificar a cada uno de los materiales que deberán utilizarse para la formulación de los lodos propuestos por su importancia de preocupación.

Para realizar dicha clasificación se tomaron los siguientes criterios:

Clasificación en una sustancia química de alta importancia: Se utilizó la información recabada en algunas hojas de seguridad de los materiales propuestos y de sus fichas técnicas. Si el material presentaba alguna sustancia química clasificada como de alta preocupación según el listado contenido en el anexo 4, era clasificado como químico de alta importancia. Por ejemplo en la hoja de seguridad de la bentonita, se encontró que la bentonita contiene sílice cristalina en forma de cuarzo la cual es clasificada como CoHC.

CLASIFICACIÓN: MATERIAL O SUSTANCIA QUÍMICA DE ALTA IMPORTANCIA

Cuando el material o sustancia química no era clasificada como químico de alta importancia se procedía a aplicar el nivel de clasificación siguiente.

Clasificación en sustancia química de importancia: Se utilizó la información recabada en algunas hojas de seguridad de los materiales propuestos y de sus fichas técnicas. Sí el material presentaba alguna advertencia de peligro por posibles daños a la salud o al medio ambiente era clasificado como químico de importancia. Para tomar un ejemplo presentamos la hoja de seguridad en el anexo 4 del Hidróxido de Sodio, en la sección 3 de dicha hoja, se mencionan los siguientes efectos adversos para la salud:

Inhalación:

Irritante severo. La inhalación de polvo fino causa irritación y quemadura de nariz, garganta y tracto respiratorio superior. Una severa exposición puede producir neumonía química.

Ingestión: Ocasiona quemaduras a la boca, garganta y estómago. Disminuye la presión sanguínea. Los efectos pueden aparecer luego de algunas horas de la exposición.

Contacto con los ojos: Causa irritación y severas quemaduras. El daño puede ser permanente.

Contacto con la piel: Causa irritación a la piel, manchas rojas y puede llegar a severas quemaduras dependiendo de la exposición.

Efectos Agudos: Fuertemente corrosivo a todos los tejidos del cuerpo con el que entre en contacto. El efecto local en la piel puede consistir en áreas múltiples de destrucción superficial hasta profundas ulceraciones de la piel, tejidos del sistema respiratorio y/o digestivo.

Efectos Crónicos: Los efectos crónicos en una exposición local pueden consistir en múltiples áreas de destrucción superficial de la piel o de algunas dermatitis primarias irritantes. Así mismo la exposición a polvo o niebla puede resultar en varios grados de irritación o daño al tracto respiratorio y un aumento en la susceptibilidad a enfermedades respiratorias. Estos efectos crónicos ocurren solo cuando se exceden los límites máximos permisibles.

Nota Adicional:

Repetida exposición puede causar dermatitis.

CLASIFICACIÓN: MATERIAL O SUSTANCIA QUÍMICA DE IMPORTANCIA

Clasificación en sustancia química de no importancia: Si las hojas de seguridad o las fichas técnicas no proporcionaban ninguna advertencia de peligro a la salud o al medio ambiente, o lo anterior era claramente observable por el origen del material, eran clasificados como materiales o sustancias químicas de no importancia. Como ejemplo se

tiene el Wall Nut (cáscara de nuez), que por su origen (orgánico) es clasificado como material o sustancia química de no importancia.

CLASIFICACIÓN: MATERIAL O SUSTANCIA QUÍMICA DE NO IMPORTANCIA

2. Ponderación según su clasificación.

Posteriormente a la clasificación de los materiales que componían cada uno de los lodos propuestos se procedió a ponderar dicha clasificación. Esta ponderación se realizó de manera subjetiva según el nivel de importancia de la clasificación. La ponderación de los niveles de clasificación se presenta en la Tabla 15.1.

Tabla 15.1 Ponderación por nivel de clasificación de sustancias químicas

Nivel de clasificación	Ponderación
Material o sustancia química de no importancia	10
Material o sustancia química de importancia	8
Material o sustancia química de alta importancia	5

Fuente: Elaboración propia

3. Calificación

Después de haber clasificado y posteriormente ponderado cada material que compone un lodo propuesto, se calculó el promedio de todos los componentes y obteniendo así una calificación ambiental del lodo, la cual es tomada como criterio de evaluación en un diez por ciento del porcentaje total de cada lodo.

15.3 ANEXO 3: ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS PARA EL MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY (LEY EXPONENCIAL MODIFICADA).

Paso 1: Reescribir los datos del viscosímetro de Fann a esfuerzo de corte y velocidad de corte utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\tau \left(\frac{lb}{100 ft^2} \right) = 1.0678 \theta \text{ Ec. A1}$$

$$\gamma (\text{seg}^{-1}) = 1.703 \omega \text{ Ec. A2}$$

En donde θ es la lectura del dial del viscosímetro y ω son los RPM.

Una vez transformados los datos se procede a realizar un análisis estadístico para la estimación de propiedades reológicas:

Teniendo en cuenta que la ecuación del modelo de ley exponencial modificada:

$$\tau = \tau_y + K(\gamma^n) \text{ Ec. A3}$$

El objetivo es encontrar los parámetros:

1. τ_y = Viscosidad a baja velocidad de corte.
2. K = índice de consistencia.
3. n = exponente

Paso 2: Primera prueba estimando un valor de n ; una buena aproximación del exponente sería:

$$n = 3.32 \log_{10} \left(\frac{\tau_{600} - \tau_y}{\tau_{300} - \tau_y} \right) \text{ Ec. A4}$$

Donde:

$$\tau_y = 2\tau_3 - \tau_6$$

Paso 3: Obtener los siguientes datos: $\sum \tau_i, \sum \gamma_i^n, \sum \gamma_i^{2n}, \sum \tau_i \gamma_i^n$ Ec. A5.

Paso 4: Estimar el valor de τ_y y K :

$$\tau y = \frac{\sum \tau_i \sum \gamma_i^{2n} - \sum \gamma_i^n \sum \tau_i \gamma_i^n}{N \sum \gamma_i^{2n} - (\sum \gamma_i^n)^2} \text{ Ec. A6}$$

$$K = \frac{N \sum \tau_i \gamma_i^n - \sum \gamma_i^n \sum \tau_i}{N \sum \gamma_i^{2n} - (\sum \gamma_i^n)^2} \text{ Ec. A7}$$

Paso 5: Obtener R^2 , si el $R^2 < 0.90$, repetir los pasos 4-5 con un nuevo n.

15.3.1 MEMORIA DE CALCULO DEESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS PARA EL LODO 8.

Paso 1: Transformar datos a esfuerzo de corte (utilizando ec.A1):

Tabla 15.2. Datos de esfuerzo de corte a diferentes velocidades de corte para el lodo 8.

Lodo 8		Datos para generación de gráficos					
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	τ_{600}	τ_{300}	τ_{200}	τ_{100}	τ_6	τ_3
0	0	35.178	23.452	19.188	14.924	9.594	9.594
1	2	35.178	24.518	21.320	17.056	10.660	10.660
2	4	41.574	29.848	25.584	21.320	13.858	13.858
3	6	47.970	37.310	33.046	26.650	18.122	18.122
4	8	54.366	47.970	41.574	31.980	22.386	22.386
5	10	69.290	53.300	47.970	39.442	29.848	28.782
6	12	67.158	53.300	47.970	40.508	30.914	30.914
7	14	104.468	79.950	71.422	59.696	45.838	43.706
8	16	117.260	86.346	74.620	62.894	47.970	47.970
9	18	127.920	95.940	84.214	69.290	50.102	50.102
10	20	154.570	127.920	106.600	79.950	55.432	51.168

Fuente. Elaboración propia.

Paso 2: Estimar valores iniciales de n (utilizando ec.A4 y ec.A5):

Tabla 15.3. Asunciones iniciales de n y k para el cálculo de las propiedades reológicas.

Lodo 8

Asunciones iniciales		
τ_y	n	k
9	0.88400939	0.05244135
10	0.82264449	0.07689106
13	0.79308854	0.10667771
17	0.63705995	0.33872405
21	0.32174124	3.22701166
26	0.70003317	0.30494869
29	0.69474195	0.27578185
39	0.71230438	0.42372339
45	0.85194804	0.17736528
47	0.76311662	0.36866121
44	0.41004583	5.89164925

Fuente. Elaboración propia.

Paso 3: Cálculo de sumatorias:

Tabla 15.4. Cálculo de sumatorias intermediarias para la estimación de los parámetros reológicos del lodo 8

Lodo 8		Sumatorias			
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	$\Sigma\tau$	ΣYn	ΣY^2n	$\Sigma\tau Yn$
0	0	111.93	984.335034	309538.366	26742.6947
1	2	119.392	669.812907	137401.009	18541.9671

Lodo 8		Sumatorias			
Punto	Concentración total de materiales (lb/bbl)	$\Sigma\tau$	ΣY_n	ΣY_{2n}	$\Sigma\tau Y_n$
2	4	146.042	556.84366	93041.4587	18350.773
3	6	181.22	211.403124	12068.7068	8154.47334
4	8	220.662	32.2111143	218.593362	1383.93382
5	10	268.632	307.765683	27390.0697	17493.9825
6	12	270.764	298.065882	25559.8667	16705.6148
7	14	405.08	332.736647	32165.6554	28469.662
8	16	437.06	800.424055	202356.181	76580.8325
9	18	477.568	458.295745	62672.1918	47596.3042
10	20	575.64	53.3875728	655.88952	6345.59814

Paso 4: Estimar propiedades y R^2 :

Tabla 15.5. Propiedades reológicas estimadas. Lodo 8.

Punto	Concentración de obturantes (lb/bbl)	Viscosidad plástica VP (cp)	Punto cedente de Bingham YP (lb/100 ft ²)	Viscosidad a baja velocidad de corte τ_y (lb/100 ft ²)	Parámetro de comportamiento reológico $R=\tau_y/YP$	Índice de consistencia K	Exponente n	Esfuerzo de gel a 10 seg	Esfuerzo de gel a 10 min	R2
0	0	11	11	9.3693	0.8518	0.0643	0.8840	14	22	0.9968752
1	2	10	13	10.6051	0.8158	0.0971	0.8226	18	36	0.99232541
2	4	11	17	13.5770	0.7986	0.1381	0.7931	20	40	0.98931326
3	6	10	25	16.7097	0.6684	0.4718	0.6371	24	47	0.96337361
4	8	6	39	13.3472	0.3422	5.2371	0.3217	28	52	0.85527315
5	10	15	35	28.3508	0.8100	0.4101	0.7000	35	56	0.97597858
6	12	13	37	30.0905	0.8133	0.4023	0.6947	37	60	0.97503445
7	14	23	52	43.2274	0.8313	0.5636	0.7123	50	72	0.97808877
8	16	29	52	47.3350	0.9103	0.2400	0.8519	52	64	0.99477474
9	18	30	60	48.8984	0.8150	0.4999	0.7631	51	62	0.98567489
10	20	25	95	35.7387	0.3762	7.8617	0.4100	58	70	0.90257611

Fuente. Elaboración propia.