

30
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TECNICAS PARA EL MANEJO, CONTROL Y
SOLUCION DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION
DURANTE LA PERFORACION DE POZOS
GEOTERMICOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A ;
CUAUHTEMOC SOTO SANCHEZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1992



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TECNICAS PARA EL MANEJO, CONTROL Y SOLUCION DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION DURANTE LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

- I GENERALIDADES SOBRE PERFORACION GEOTERMICA**
- II FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERDIDA DE CIRCULACION**
- III MECANISMOS DE OBTURACION**
- IV TECNICAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS PARA SU CONTROL**
- V MATERIALES EMPLEADOS PARA EL CONTROL DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION**
- VI DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTO EN BASIC PARA EL CALCULO DE LAS PRESIONES DE BROTE**
- VII VALIDACION DEL PROGRAMA**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

TECNICAS PARA EL MANEJO, CONTROL Y SOLUCION DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION DURANTE LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

INDICE

pag.

INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
GENERALIDADES SOBRE PERFORACION GEOTERMICA	3
1.1 Energia Geotermica	3
1.2 Estado de la Energia Geotermica a Nivel Mundial	7
1.3 Sistemas de Perforación	7
1.4 Fluidos de Perforación	11
1.4.1 Importancia	11
1.4.2 Funciones	12
1.4.2.1 Acarreo de cortes	13
1.4.2.2 Enfriamiento y lubricación	14
1.4.2.3 Formación de enjarre impermeable	15
1.4.2.4 Control de presiones en el pozo	15
1.4.2.5 Suspensión de cortes y arena	16
1.4.2.6 Soporte del peso de la sarta de perforación y del ademe	16
1.4.2.7 Protección del agujero	17
1.4.3 Clasificación	17
1.4.3.1 Lodos base-agua	18
1.4.3.2 Lodos base-aceite	19
1.4.3.3 Fluidos aireados	19
1.4.4 Propiedades	20
1.5 Sistemas Cementantes	22
1.5.1 Importancia y funciones	22
1.5.1.1 Soportar la T.R.	23
1.5.1.2 Aumentar la resistencia de la T.R.	23
1.5.1.3 Evitar contaminación de acuíferos con fluido geotérmico	23
1.5.1.4 Minimizar la corrosión de la T.R.	24
1.5.2 Clasificación	24
1.5.2.1 Cementaciones primarias	24
1.5.2.2 Cementaciones secundarias o correctivas	27
1.5.3 Problemas relacionados con la cementación de pozos geotérmicos	31
1.5.4 Cementos especiales para pozos	33

1.6	Perforación de un Pozo Geotérmico	35
1.6.1	Localización de pozos	36
1.6.2	Perforación rotatoria moderna	37
1.6.2.1	Sistema de soporte o levante	38
1.6.2.2	Sistema rotatorio	38
1.6.2.3	Sistema de circulación	40
1.6.2.4	Sistema de potencia	42
1.6.2.5	Sistema de prevención	42
1.6.3	Programa de perforación	43
1.6.3.1	Tubería conductora	43
1.6.3.2	Tubería superficial	43
1.6.3.3	Tubería intermedia	44
1.6.3.4	Tubería productora	44
1.6.4	Costos en la perforación de pozos	45
1.6.5	Velocidad de perforación	45
1.6.6	Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos	46
1.6.7	Cementación de pozos geotérmicos	46
1.7	Problemática de la Perforación Geotérmica	48
1.7.1	Pérdida de circulación	49
1.7.2	Inestabilidad (gelación) de los lodos por las altas temperaturas	49
1.7.3	Derrumbes de las paredes del pozo	51
1.7.4	Pegadura de tuberías	52
1.7.5	Atrapamiento de tuberías	52
1.7.6	Pesca	52
1.7.7	Fallas de equipo	53

CAPITULO II

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERDIDA DE CIRCULACION	54
2.1 Tipos de Zonas de Pérdida de Circulación	54
2.1.1 Formaciones altamente permeables	55
2.1.2 Formaciones cavernosas	55
2.1.3 Formaciones fracturadas	56
2.1.3.1 Formaciones con fracturas naturales	56
2.1.3.2 Formaciones fracturadas hidráulicamente	56
2.2 Presiones de Bombeo	59
2.3 Densidad del Lodo	59
2.4 Manejo de la Sarta en el Agujero	61
2.4.1 Factores que generan sobrepresiones en el fondo del pozo	64

CAPITULO III

MECANISMOS DE OBTURACION	66
3.1 Planos de Fractura Horizontal (Fracturas Naturales)	67
3.1.1 Arenas porosas y gravas	67
3.2 Planos de Fractura Vertical (Fracturas Inducidas)	70
3.2.1 Obturación de fracturas verticales inducidas usando agentes puenteantes	73
3.2.2 Obturación de fracturas verticales inducidas usando cemento Portland	74
3.2.3 Obturación de fracturas verticales inducidas usando lapones suaves	75

CAPITULO IV

TECNICAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS PARA SU CONTROL	77
4.1 Técnicas de Control Preventivo	77
4.1.1 Controlando presiones de fondo	78
4.1.2 Pretratamiento del lodo	83
4.1.3 Sumario de prevenciones	84
4.2 Técnicas de Control Correctivo	86
4.2.1 Causas de la pérdida de circulación	86
4.2.2 Análisis del problema	87
4.2.3 Ajustando la solución en función de la severidad de la zona	91
4.2.4 Técnicas para restablecer la circulación	96
4.2.4.1 Levantar y esperar	96
4.2.4.2 Técnicas de inyección forzada	98
4.2.4.3 Técnicas de cementación	100
4.2.5 Control de las pérdidas parciales de circulación en zonas permeables	101
4.2.6 Control de las pérdidas totales de circulación en formaciones naturalmente fracturadas o cavernosas	102
4.2.6.1 Cementación forzada	103
4.2.6.2 Perforación ciega	103
4.2.7 Selección de materiales para pérdida de circulación	104
4.2.8 Experiencia en el manejo de la pérdida de circulación en pozos geotérmicos	105
4.2.9 Diseño de cementación y tubería de revestimiento	107
4.2.10 Consideraciones en la cementación	108
4.2.11 Nuevos conceptos y alternativas para cementaciones	109
4.2.12 Causas frecuentes de fallas en la solución	110

CAPITULO V

MATERIALES EMPLEADOS EN EL CONTROL DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION . 113

5.1	Materiales Obturantes Temporales	113
5.1.1	Obturantes granulares	113
5.1.2	Obturantes fibrosos	121
5.1.3	Obturantes laminares	122
5.2	Materiales Obturantes Permanentes	124
5.2.1	Tapones duros	124
5.2.2	Tapones plásticos o suaves	125
5.2.3	Tapones de polimeros	126
5.2.4	Tapones de barita	126

CAPITULO VI

PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CALCULO DE LAS PRESIONES DE BROTE Y DE FRACTURA EN UN POZO GEOTERMICO 128

6.1	Presiones de Brote	128
6.2	Presiones de Fractura	131
6.3	Programa de Cómputo	133

CAPITULO VII

VALIDACION DEL PROGRAMA 135

CONCLUSIONES 138

BIBLIOGRAFIA 142

INTRODUCCION

Actualmente, la energía geotérmica ha venido rápidamente a tomar importancia a nivel nacional como complemento de los combustibles fósiles y de la energía nuclear para propósitos de generación eléctrica.

Es importante mencionar que en el campo de la perforación geotérmica existen grandes riesgos y problemas técnicos altamente complejos a los que se enfrenta el ingeniero de perforación. La pérdida de circulación es uno de los problemas que por su magnitud ha llegado a constituir toda una especialidad dentro de la tecnología de la ingeniería en fluidos de perforación.

Se entiende por pérdida de circulación a la falta de retorno del fluido de perforación sea lodo o agua, el cual no regresa al sistema o regresa parcialmente perdiéndose en el pozo. Se sabe que gran parte de estas pérdidas son motivadas por el peso de la columna del fluido durante la perforación y por las condiciones litológicas en algunos puntos del agujero, donde se provocan fracturas o se inducen las existentes.

La pérdida de circulación durante la perforación es uno de los problemas más complejos para controlarse y también de los más costosos, debido a los tiempos de espera empleados en intervenirlas, así como de los grandes volúmenes de materiales empleados para combatirla.

Es por ello, que el presente trabajo tiene como objetivo primordial el realizar una investigación sobre el fenómeno de la pérdida de circulación, intentando establecer los fundamentos teóricos, complementados con las técnicas preventivas y correctivas usadas para

su solución. Adicionalmente, se presenta una investigación de los materiales tradicionalmente utilizados y de invenciones recientes para solucionar la pérdida de circulación.

CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE PERFORACION GEOTERMICA

1.1 Energía Geotérmica

La energía geotérmica está asociada a los procesos volcánicos y tectónicos terrestres. La teoría más aceptada sobre su origen establece que masas magmáticas que no afloran a la superficie quedan atrapadas a pocos kilómetros de la misma, liberando su energía al medio circundante (interacción roca-agua), en donde a través de miles de años y mediante procesos convectivos se forman grandes yacimientos de agua y vapor.

Para que el yacimiento geotérmico sea económicamente explotable se requieren cuatro características principales: 1) Una fuente de calor, 2) Un acuífero, 3) Una capa sello, 4) Deberá estar situado a una profundidad adecuada, considerándose actualmente como máxima profundidad económica los 3000 m.

Clasificación de yacimientos geotérmicos

A continuación se exponen algunas características de los diversos sistemas geotérmicos clasificados a la fecha y su estado actual de desarrollo tecnológico a nivel mundial.

a) Vapor Dominante.- Sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco, su desarrollo es tal que permite generar electricidad a gran escala comercial.

b) Líquido Dominante (alta entalpía).- Sistemas de salmuera super caliente, con temperaturas entre 200 y 300°C; estos sistemas son más abundantes que los anteriores y han mostrado un gran desarrollo en el campo de la generación de electricidad.

c) Líquido Dominante (baja entalpía). - Sistemas con temperaturas de 100 a 200°C. Estos son más abundantes que los dos anteriores en una proporción de 10 a 1.

d) Roca Seca Caliente. - Sistemas rocosos de baja permeabilidad con alto contenido energético pero con poca o nada de agua. Actualmente, es una tecnología costosa por tanto su explotación económica no será antes del año 2010.

e) Geopresurizados. - Sistemas que contienen agua y metano disueltos a alta presión y mediana temperatura (150°C). Su desarrollo comercial en la generación de electricidad se espera en la década de los 90's.

f) Marinos. - Sistemas de alta entalpía existentes en el fondo marino. Este tipo de sistemas ha sido poco estudiado y se espera su explotación comercial, después del año 2020.

g) Magmáticos. - Sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas debilitadas. La factibilidad comercial de estos sistemas se está llevando a cabo por el DOE (Department of Energy) de los EUA en las islas de Hawaii.

En México se cuenta con sistemas del tipo líquido dominante como son los campos geotérmicos de Cerro Prieto, en Mexicali; Los Azufres, en Michoacán; Los Hornos, en Puebla; y La Primavera, en Jalisco. La explotación comercial de estos campos sólo se está realizando en Cerro Prieto (620 MW_e) y Los Azufres (75 MW_e).

Se requiere de casi nueve toneladas de vapor específico para generar 1 (MWh) de electricidad; ésta tiene un costo de 25 a 30% más bajo que la obtenida a partir del carbón, combustóleo o nuclear. La exploración geotérmica requiere de perforaciones profundas, dado que la profundidad de los intervalos productores, en la mayoría de los pozos de Cerro

Prieto fluctúa entre los 2500 y 3000 m. Los equipos empleados para la perforación de los pozos geotérmicos son los mismos que se emplean para los pozos petroleros o de gas, aunque con una ligera variante que es la torre de enfriamiento de los fluidos de perforación.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha establecido como metas de energía geotérmica en línea 2000 MW para el año 2000, de acuerdo con el Plan Global de Desarrollo de México. Indudablemente, que el alcance de estas metas será posible sólo si la energía geotérmica compite económicamente con la energía obtenida a partir de las fuentes convencionales (fósiles y nucleares). El costo de la perforación y la terminación de pozos geotérmicos representa una porción significativa del costo de la energía producida geotérmicamente. A la fecha, el costo promedio de un pozo geotérmico es de casi dos millones de dólares, aproximadamente cuatro veces más que un pozo petrolero de aceite o de gas (en tierra). Estos costos deben ser reducidos para que las metas de energía en línea de la CFE se cumplan; por ello, la reducción del costo-pozo repercutirá directamente en un costo reducido de la energía eléctrica producida geotérmicamente. Esto mejorará la posición económicamente relativa de la energía geotérmica en el mercado, guiando a una sustitución progresiva de la energía geotérmica por la energía convencional.

En la actualidad la energía geotérmica se utiliza principalmente para generación de electricidad, aunque tiene muchas otras aplicaciones conforme lo mostrado en la Tabla 1.1.

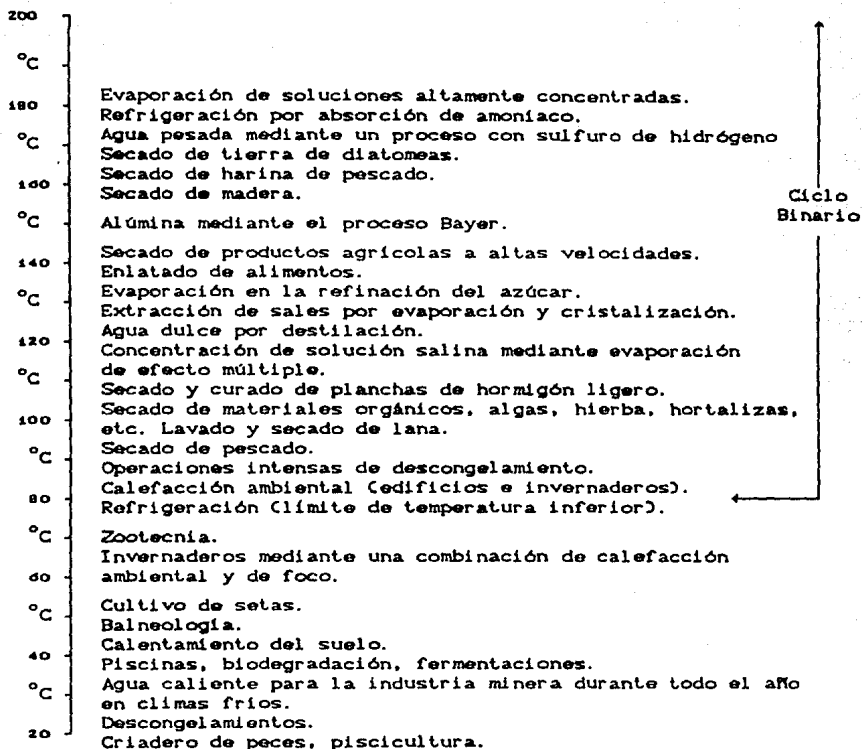


Tabla 1.1 Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos necesaria para distintas aplicaciones.

1.2 Estado de la Energía Geotérmica a Nivel Mundial

El alto costo de la perforación y terminación de pozos geotérmicos es un impedimento importante para el desarrollo comercial generalizado de los recursos geotérmicos en el mundo. Esto es debido a que existen deficiencias en las técnicas de perforación empleadas, para superar los problemas especiales vinculados con el medio ambiente geotérmico, que típicamente incluye formaciones de roca volcánica, altas temperaturas y movimiento rápido de fluidos corrosivos e incrustantes. De aquí que se considere importante, el emprender programas de investigación relacionados con la tecnología de construcción de pozos geotérmicos, que contribuyan sensiblemente a una reducción de sus costos, repercutiendo así en los costos de la energía eléctrica en línea. Y de este modo, se lleve a cabo el aprovechamiento de la gran cantidad de energía geotérmica disponible en la mayor parte del mundo.

1.3 Sistemas de Perforación

Existen dos técnicas de perforación rotatoria: la tradicional que emplea fluido de perforación como sistema de circulación en el pozo y la otra que utiliza aire, siendo esta última la menos empleada. Cabe mencionar que existen tres clases generales de fluidos de perforación: base agua, aire y aceite.

Los fluidos base aceite no son adecuados por el peligro de contaminación a los acuíferos profundos, por su costo elevado y probablemente, porque éste se pierda al no regresar a la superficie cuando se atraviesen las zonas de pérdidas de circulación.

En la actualidad, el empleo exitoso del aire en los pozos geotérmicos

de Nueva Zelanda, Japón y Estados Unidos ha comenzado a llamar la atención por las siguientes razones:

- Velocidades de penetración muy altas.
- Reduce notablemente el posible daño a la formación.
- Control efectivo de presión en zonas con pérdida de circulación.
- Se detectan con mayor facilidad las zonas de baja presión.
- Mejora el rendimiento de la barrena.
- Rápido regreso de recortes libres de contaminación.

La perforación con aire seco es la técnica más simple de perforación con aire; sin embargo, cuando se entra en contacto con acuíferos, el aire es lo bastante seco y debe convertirse a niebla o espuma. En general, la capacidad de levantamiento de recortes por el sistema aereado es proporcional a la densidad de éste y al cuadrado de su velocidad en el espacio anular (espacio vacío entre la pared externa de la tubería y la del pozo). Las velocidades anulares típicas fluctúan entre 900 y 1500 m/min. Los requerimientos de volumen de aire para un agujero y un tamaño de tubería dado están directamente relacionados con la profundidad; esto es, a medida que se penetra en el pozo, la expansión en la barrena es menor y por tanto, la velocidad es menor debido al aumento del peso de los recortes y a la presión generada por fricción. Una velocidad excesiva de aire provocará la erosión de las zonas más suaves del pozo, haciendo que se requiera más aire para mantener la velocidad apropiada en esa zona agrandada del agujero. También una presión excesiva del aire provocará que este se pierda hacia la formación, haciendo deficiente el levantamiento de recortes y guiando a una situación de alto riesgo pues éstos tenderán a acumularse en el pozo, empacando la tubería de perforación.

Es indudable, que un sistema de fluido de perforación aireado combina las ventajas asociadas con el fluido de perforación convencional y con las técnicas de perforación con aire. Esta combinación es efectiva cuando se atraviesan zonas de pérdida de circulación, típicas de los yacimientos geotérmicos de agua dominante, en donde se logra obtener un retorno completo del fluido a la superficie. Una vez que se logra esto, se realizan los ajustes apropiados del aire inyectado y del volumen para regular la presión en el fondo. Cada sección del pozo necesariamente requiere de una relación aire-lodo, además de la influencia de parámetros como la geometría del agujero, propiedades del lodo, eficiencia de la bomba, problemas del agujero, temperatura, pérdidas en la velocidad de circulación, el nivel del espejo de agua, etc.

El sistema aireado es sumamente ventajoso al atravesar las zonas productoras, comparado con el lodo convencional que requiere presiones de circulación más altas que fuerzan a los recortes a penetrar y, que en ciertos casos, sella las fracturas debido al proceso de gelación del lodo al quedar atrapado en éstas fracturas. Esto provocará que parte o el total del flujo de producción tienda a disminuir debido al daño de la formación. Los efectos de éste sobre el costo total del pozo son observados en la Fig. 1.1. A diferencia de ello, el aire permite un control de la presión diferencial entre la circulación del fluido en el fondo y el de la formación. No obstante, es importante mencionar que cada pozo presenta sus propias variables, mismas que influyen en el comportamiento del sistema del fluido de perforación aireado.

Los fluidos de perforación base-agua son los más empleados en la perforación de pozos, estos consisten básicamente de agua como fase

continua y arcilla; el control de sus propiedades fisicoquímicas se lleva a cabo mediante la adición de aditivos químicos, permitiendo con ello ajustarse a los cambios de las condiciones del pozo y/o a las impuestas por el perforador. Estos aditivos pueden ser polímeros orgánicos, dispersantes, agentes densificantes, adelgazadores y lubricantes.

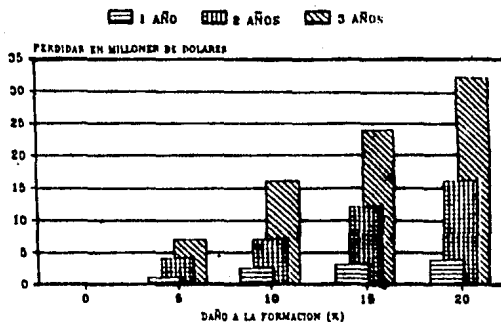


Fig. 1.1 Efectos del daño en la formación sobre el costo total del pozo.

Tal como se mencionó, la bentonita es el aditivo básico en los fluidos de perforación debido a que una vez incorporada produce una serie de cambios físicos como lo son el aumento de su viscosidad, gelación, densidad, filtración y lubricidad. Al entrar el fluido en el pozo los sólidos suspendidos y ciertos cambios químicos afectan las propiedades anteriormente mencionadas.

La perforación de los pozos geotérmicos involucra el contacto con

formaciones fracturadas, rocas metamórficas e ígneas, lo cual hace que se requiera de una selección y mantenimiento cuidadoso de los sistemas de fluidos de perforación. Las principales funciones básicas del fluido de perforación son las siguientes:

- (1) Enfriamiento de la barrena.
- (2) Eliminación de los recortes cuando éstos son producidos.
- (3) Transporte y desalojo de los recortes en la superficie.

Idealmente, los fluidos empleados también deben permitir de modo inmediato y preciso la detección de los fluidos geotérmicos, cambios de temperatura y la litología de la zona de producción.

1.4 Fluidos de Perforación

1.4.1 Importancia

Los fluidos de perforación son una de las herramientas principales para la perforación de pozos profundos y podemos decir con absoluta seguridad, que sin el auxilio de la técnica moderna en el control de los lodos de perforación no sería posible alcanzar las profundidades de los pozos geotérmicos actuales de acuerdo con las condiciones de alta temperatura que prevalecen en éstos. El término fluido de perforación comprende todas las composiciones usadas para ayudar a la producción y remoción de los recortes producidos mientras se está perforando un pozo y al control de las presiones en el mismo.

Es conveniente mencionar que el costo del sistema de lodos representa aproximadamente el 5 u 8% del costo total del pozo, mientras que los problemas vinculados con este tales como la estabilidad del pozo, pegaduras de tubería, pesca y pérdidas de circulación afectan drásticamente sobre el tiempo total e intrínsecamente sobre el costo

mismo del pozo. De aquí la importancia que tiene el diseñar adecuadamente el sistema de lodos y el programa que debe seguirse para el control de sus propiedades, así como también de los problemas ocasionados por una deficiencia de éste.

1.4.2 Funciones

En los inicios de la perforación rotatoria, la función básica de los lodos de perforación fue el extraer los recortes del fondo del agujero y depositarlos en la superficie. En la actualidad, se requiere que el fluido de perforación proporcione el flujo y la potencia hidráulica necesaria para limpiar el agujero y la barrena, bajo ciertas condiciones dadas de aplicación de peso y velocidad de rotación. De aquí que un fluido de perforación deba reunir las funciones siguientes:

(1) Transporte y eliminación de sólidos desde el fondo hasta la superficie, lo cual repercute directamente sobre la velocidad de penetración y la vida útil de la barrena (Fig. 1.2).

(2) Mantener el control de las presiones en el pozo mediante el peso de la columna hidrostática del lodo, evitando la entrada de los fluidos que existen en la formación.

(3) Enfriar, lubricar y proporcionar potencia hidráulica a la sarta de perforación y barrena, respectivamente. Esta función es auxiliada incorporando al sistema de circulación una torre de enfriamiento para eliminar el calor sustraído por el lodo al salir del pozo.

(4) Estabilizar las paredes del pozo por medio de un enjarre apropiado, evitando la pérdida de fluido a la formación.

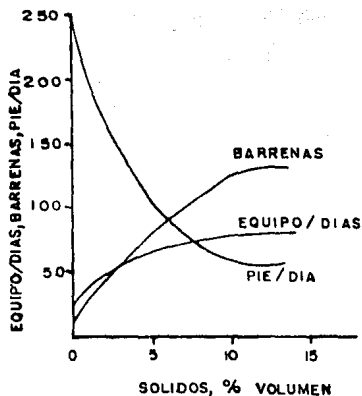


Fig. 1.2 Control de los sólidos afecta los costos de la perforación.

(5) Facilitar la introducción y transporte de los registros para obtener información más precisa de las formaciones penetradas.

(6) Brindar protección contra la erosión y corrosión de la sarta, provocada por la presencia de gases como H_2S , O_2 y CO_2 .

(7) Proporcionar información química a partir del mismo, obteniéndose perfiles químicos de la formación.

1.4.2.1 Acarreo de cortes

El acarreo de cortes del fondo del agujero aún es considerada como una de las funciones más importantes de los lodos. El fluido que sale

por las toberas de la barrena, ejerce una acción de limpieza sobre los roles de la barrena y la cara del fondo del agujero. En esta forma se logra mayor vida de la barrena y más eficiencia en la perforación.

El fluido circulante se levanta del fondo acarreado los cortes hacia la superficie. Por influencia de la gravedad los cortes tienden a asentarse a través del fluido ascendente pero al circular una cantidad suficiente de éste, a una velocidad apropiada, es posible nulificar este efecto acarreado los cortes a la superficie. La efectividad del lodo para sacar los cortes a la superficie depende de los siguientes factores:

(a) Velocidad.- La velocidad en el espacio anular fluctúa frecuentemente entre 100 y 200 pies/min, ésta depende de la capacidad de la bomba, tamaño del agujero y de la tubería de perforación.

(b) Densidad.- La densidad es el peso por unidad de volumen y tiene un efecto de flotación sobre las partículas, aumentando la densidad del lodo se aumenta la capacidad de acarreo.

(c) Viscosidad.- La viscosidad es función de la concentración, calidad y dispersión de los sólidos suspendidos en el fluido de perforación.

1.4.2.2 Enfriamiento y lubricación

Dado que se genera una gran cantidad de calor por fricción con la formación tanto en la barrena como en la tubería de perforación hay poca oportunidad para que este calor sea disipado por la formación y por tanto, el lodo debe servir como líquido de enfriamiento. De este modo, al salir el lodo a la superficie éste disipe el calor que se produce en los puntos de fricción mencionados con anterioridad.

Aunque en bajo grado el lodo posee propiedades lubricantes, la aplicación de aceite combinado con agentes emulsificantes aumenta su lubricidad. Esto se manifiesta en una disminución de la fuerza de torsión, aumento de la vida de las barrenas, reducción de la presión de bombeo, etc.

1.4.2.3 Formación de enjarre impermeable

Un buen lodo de perforación debe depositar un buen enjarre en la pared del agujero para consolidar la formación y reducir el paso del fluido a la formación. Esta propiedad del lodo se mejora aumentando la fracción coloidal en él, mediante la adición de bentonita y tratándolo químicamente para mejorar la dispersión y distribución de sólidos. En muchos casos, es necesario añadir almidón o algunos otros aditivos de control para disminuir la pérdida de agua.

1.4.2.4 Control de presiones en el pozo

El manejo apropiado de las presiones de la formación depende de la densidad o peso del lodo. La presión normal ejercida por una columna de agua de la formación es igual a 0.465 lb/pie de profundidad, normalmente el peso del agua y los sólidos recogidos de la perforación son suficientes para balancear las presiones de la formación. Sin embargo, algunas veces se presentan presiones anormales que requieren de la adición de un material pesado, finamente dividido como lo es la barita, para aumentar la presión hidrostática de la columna de lodo.

1.4.2.5 Suspensión de cortes y arena

Un lodo de perforación bien diseñado debe poseer excelentes cualidades de gelatinosidad y tixotropía para mantener en suspensión a los sólidos, cuando se detiene súbitamente la circulación del mismo, por un tiempo determinado durante un viaje de tubería o por cualquier otra causa.

Los recortes en el trayecto a la superficie deberán de permanecer suspendidos, pues de lo contrario, éstos caerán al fondo causando problemas de atascamiento en la barrena con los recortes asentados, lo que se refleja en una reducción de la velocidad de perforación del pozo. Así pues, una gelatinosidad apropiada previene el asentamiento de las partículas al reducir su grado de caída, aunque por otro lado, valores muy altos de gelatinosidad requieren mayores presiones de bombeo para iniciar la circulación.

1.4.2.6 Soporte del peso de la sarta de perforación y del ademe

El fluido de perforación también debe sustentar a la sarta de perforación y al ademe, lo cual se realiza mediante un empuje ascendente que obra en la tubería, al estar sumergida en el fluido de perforación. Este empuje depende de la profundidad a la que se encuentra la tubería y de la densidad del fluido sustentante, obviamente al aumentar las profundidades, el peso soportado por el equipo de superficie va aumentando considerablemente.

Cuando se emplea aire, el empuje es casi nulo, debido a la baja densidad del aire; pero en el caso del lodo, dicho empuje puede ser considerable, debiéndose tomar en cuenta éste para obtener un análisis real de todas las variables involucradas en el pozo.

1.4.2.7 Protección del agujero

Se necesita de las propiedades óptimas del fluido de perforación para ofrecer la máxima protección a la formación; sin embargo, algunas veces éstas deben sacrificarse para obtener un conocimiento máximo de las formaciones penetradas. Por ejemplo, la sal puede contaminar el lodo y aumentar la pérdida del agua, aunque su presencia mejora la resistividad y con ello la interpretación de los registros eléctricos. Para tomar los registros eléctricos se requiere, que el fluido de perforación sea un medio conductor eléctrico, que permita obtener las propiedades eléctricas de los diferentes fluidos de la formación.

El aceite puede mejorar el comportamiento de un lodo y aún la producción del pozo pero si interfiere en el trabajo de los geólogos debe ser evitado. La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida del fluido de perforación se ha desplazado al interior de ésta o bien si el fluido altera las propiedades físicas o químicas del agujero.

1.4.3 Clasificación

Los fluidos de perforación pueden ser clasificados en base a sus principales componentes que pueden ser:

Agua

Aceite

Aire

En realidad están presentes casi siempre dos y hasta tres componentes, al mismo tiempo, contribuyendo cada uno con ciertas características a las propiedades del fluido de perforación que forman. Cuando el constituyente principal es un líquido (agua o aceite), el

término lodo se aplica a la suspensión de los sólidos en el líquido. De acuerdo con esto se puede decir que existen lodos base-aceite y base-agua. La presencia de ambos mediante una buena agitación y la adición de un agente emulsificante apropiado origina una emulsión. La naturaleza química del agente emulsificante, determina que el aceite sea emulsificado en agua llamándose lodo de emulsión aceite, o bien que el agua sea emulsificada en el aceite, denominándose lodo de emulsión inversa.

1.4.3.1 Lodos base-agua

El agua fue el primer fluido de perforación que se utilizó al hidratar la formación arcillosa y convertirla en un lodo nativo, además se considera como el principal componente de éste. El agua es la fase de disolución para la mayoría de los agentes químicos adicionados al fluido base, tales como polímeros, materiales de alta gravedad específica y aditivos para control de propiedades diversas. La mayoría de los fluidos de perforación que usan agua como la fase fluida y arcillas como la fase dispersa se les designa como lodos base agua.

El lodo base-agua es fisicoquímicamente un fluido con alta concentración de sólidos en suspensión, que se encuentran en estado coloidal, algunos de estos sólidos tienen propiedades hidrofílicas provocando que los fluidos sean viscosos y generen estructuras gelatinosas, de modo que bajo ciertas condiciones formen una masa plástica. Los componentes principales de estos lodos son los siguientes:

Sólidos activos como ciertas arcillas que son fácilmente hidratables en agua, proporcionan viscosidad al fluido, éstas son designadas

como arcillas hidrofílicas tales como la bentonita y la atapulgita.

Sólidos inertes tales como el sulfato de bario, arena y otros materiales se les designan como hidrofóbicos.

Fase química que comprende las sales solubles que toma el lodo de la formación, los productos químicos solubles para el tratamiento del lodo y los que se adicionan al agua de repuesto.

1.4.3.2 Lodos base-aceite

Existen los lodos base-aceite que no son de uso tan común como los lodos base-agua, su principal uso es durante la perforación de zonas con lutitas deleznablees que se hinchan con el agua. Las desventajas que presentan es que son más costosos, además de que pueden ocasionar la contaminación con aceite de los acuíferos atravesados durante la perforación.

Su uso poco común en geotermia se debe principalmente a que casi siempre se perforan zonas con pérdidas de circulación y siendo este lodo muy costoso (por los materiales y tratamiento químico) al perderse en dichas formaciones ocasionaría una pérdida considerable de dinero.

1.4.3.3 Fluidos aireados

Los fluidos aireados también son usados en operaciones de perforación e incluyen aire, gas natural, niebla, vapor o lodos aireados. Estos fluidos permiten altas velocidades de penetración debido a que reducen la presión hidrostática, además de minimizar los problemas de pérdida de circulación.

El equipo de perforación para lodos aireados es básicamente el mismo que se utiliza con lodos convencionales, con la excepción del sistema

de compresores, los cuales operan de forma análoga al bombeo del lodo. Como ya fue mencionado su ventaja es la alta tasa de penetración aún cuando presenta serias desventajas como:

(a) Fuerte incidencia de erosión en la sarta de perforación debido a las velocidades elevadas de las partículas fragmentadas por la perforación.

(b) No existe una seguridad completa en la consolidación de la pared del agujero debido a la falta de una película impermeable sobre esta; lo cual trae como consecuencia que se provoquen derrumbes en el pozo, atrapando consigo la sarta de perforación y probablemente, forzando a un problema de pesca.

(c) Mayor agresividad de los gases corrosivos, presentes a fondo de pozo, sobre la sarta de perforación.

(d) Acumulación de los cortes de roca en el espacio anular debido a la humectación de éstos por los fluidos de acuíferos atravesados, generando en consecuencia problemas de atascamiento de sartas.

1.4.4 Propiedades

La mayoría de los fluidos empleados en la perforación de pozos geotérmicos son base-agua, es decir, emplean agua como fase continua para que ciertos materiales se mantengan en suspensión y otros en disolución. Estos materiales comprenden a los sólidos reactivos como las arcillas comerciales, lutitas, arcillas hidratables de la formación, aditivos químicos y a los sólidos inertes químicamente como la arena, dolomita y barita. Los efectos que éstos producen en el lodo son determinados cuantitativamente sobre sus propiedades reológicas, de filtración y químicas. Los parámetros reológicos del lodo son:

(a) La viscosidad plástica, la cual indica el grado de actividad mecánica entre sólidos-liquidos y proporcionan, cualitativamente, la concentración de éstos y su estado de asociación.

(b) El punto de cedencia que es la fuerza que contribuye a sostener el flujo una vez que el fluido está en movimiento, se debe a las fuerzas de atracción entre las partículas de arcillas reactivas.

(c) La resistencia del gel que es la fuerza necesaria para iniciar el flujo a partir de una condición estacionaria, se debe a las fuerzas de repulsión-atracción entre las partículas arcillosas.

Cualitativamente, es proporcional con el punto de cedencia, ya que si éste es alto, probablemente aquella sea alta.

Estas propiedades son medidas empleando viscosímetros rotacionales recomendados por las normas API. Los datos así obtenidos son lo suficientemente prácticos y precisos para predecir el comportamiento de flujo del lodo empleando el modelo plástico de Bingham que es el más popular entre los ingenieros de campo.

Programa del lodo

El programa debe ser lo suficientemente flexible para que el perforador lo implemente según lo requieran las condiciones del pozo. Así, el éxito del programa radica en la capacidad que tenga el perforador sobre la hidráulica del pozo y del conocimiento básico de las funciones, composición y tratamiento de los lodos que utilizará. Las características del lodo que influyen en el desempeño del programa son el contenido y tipo de sólidos, la pérdida de filtración y el tipo de enjarre, la capacidad de acarreo, densidad y estabilidad termica.

Otros factores que deben contemplarse en el diseño del programa

debido a su importancia son:

- (a) Composición y estabilidad de las rocas a perforar.
- (b) Temperaturas y presiones máximas esperadas.
- (c) Composición del agua disponible.
- (d) Contaminaciones posibles.

El programa debe ser específico para cada etapa del proceso de perforación del pozo, debido básicamente a las dimensiones del agujero y formaciones a perforar. Tal como se mencionó anteriormente, es importante implementar el programa mediante una supervisión adecuada, la cual es esencial para asegurarse que se entendió y comprendió éste; con objeto de aprovechar al máximo las características de los materiales para aplicarlos inmediatamente en el campo, es conveniente realizar mediciones de rutina a las propiedades del lodo y establecer pruebas piloto con materiales disponibles en campo. Ello permitirá optimizar día a día la perforación del pozo, reduciendo así el número de problemas y los costos generados por estos.

1.5 Sistemas Cementantes

1.5.1 Importancia y funciones

Entre las operaciones que se realizan para llevar a cabo una terminación eficiente, la cementación ocupa un lugar sumamente importante. Una buena cementación de la T.R. de explotación es necesaria para todos los trabajos subsecuentes u operaciones que se efectúen en el pozo. Cuando dicha cementación es deficiente todas las operaciones realizadas son seriamente afectadas, por tal motivo deberá corregirse antes de programar cualquier trabajo relacionado con la terminación del pozo.

Las principales funciones de una cementación son:

- Soportar la T.R.
- Aumentar la resistencia de la T.R.
- Evitar la contaminación de acuíferos con fluido geotérmico y viceversa.
- Minimizar la corrosión de la T.R., reduciendo el contacto con los fluidos de las formaciones.

1.5.1.1 Soportar la T.R.

El cemento utilizado para llenar el espacio anular, debe tener buena adherencia a la tubería que es completamente lisa, de lo contrario, éste no fijará adecuadamente la tubería dando lugar a posibles problemas como dilataciones excesivas, colapsos y corrosión acelerada de la T.R.

1.5.1.2 Aumentar la resistencia de la T.R.

Las presiones que se maneja en un pozo geotérmico son muy altas, superando en ocasiones las 7000 lb, por lo que si no se contara con la columna de cemento que se introdujo en el espacio anular, la tubería de revestimiento se rompería escapando el vapor por el espacio anular hacia la superficie.

1.5.1.3 Evitar contaminación de acuíferos con fluido geotérmico

A diferentes profundidades de un pozo se encuentran acuíferos de distintas clases, es indispensable que éstos se mantengan aislados del fluido geotérmico, para no restarle calidad y por otro lado, no alterar las propiedades de los acuíferos pues los fluidos de perforación y los

fluidos geotérmicos los contaminarian.

1.5.1.4 Minimizar la corrosión de la T.R.

La pared de cemento que cubre la tubería de revestimiento reduce el contacto entre los fluidos de los acuíferos y la tubería, evitando de esa manera corrosión electroquímica. Los cementos utilizados deben mantener valores de permeabilidad bajos durante su vida productiva por este problema.

1.5.2 Clasificación

Existen dos tipos de cementaciones, la cementación primaria y la secundaria.

1.5.2.1 Cementaciones primarias

Una vez perforando hasta la profundidad deseada se extrae la tubería de perforación, se corren una serie de registros, (temperatura, presión, calibración, etc.) y posteriormente, se introduce la tubería de revestimiento haciendo escalas cada 50m para circular lodo.

(a) Cementación en una etapa

Las tuberías generalmente se cementan en una etapa (operación continua) por el método de los dos tapones, en el cual la lechada se bombea por el interior de la T.R. hasta el fondo del pozo; de ahí empieza a subir por el espacio anular desplazando al fluido de perforación y eliminando el enjarre de las paredes del pozo.

(b) Cementación en etapas

Es aquella que se realiza en dos o tres etapas, se utiliza en pozos que requieren columnas de cemento muy largas, donde se tiene formaciones débiles o zonas de pérdida de circulación durante la perforación y donde se determina que no se soportará la carga hidrostática durante la operación de cementación. Una desventaja de este método es que no se puede mover la tubería después de la primera etapa; esto incrementa la posibilidad de canalización y disminuye la remoción del enjarre del lodo en las paredes del pozo.

(c) Cementación con tubería interna

Cuando se cementa una tubería de diámetro grande se puede utilizar la tubería de perforación como medio de colocación de la lechada de cemento para reducir el tiempo de la operación y con ello el tiempo de espera del cemento, (tiempo en que se deje fraguar "WOC"); también reduce el intervalo de cemento por atravesar al continuar la perforación. Este método permite utilizar equipos de flotación y accesorios de cementación con pequeño diámetro.

(d) Cementación inversa

Esta técnica se utiliza cuando no es posible bombear la lechada sin romper las formaciones débiles, ocasionando pérdidas de circulación durante la cementación. En este método se bombea la lechada por el espacio anular y se desplaza el lodo hacia el interior de la tubería, esto permite utilizar lechadas con alta densidad en el fondo del pozo y lechadas ligeras en la superficie.

Ce) Cementación de fraguado retardado

En teoría éste método permite obtener una mejor distribución de cemento en el espacio anular, ya que se coloca una lechada con mayor tiempo de espesamiento y aditivos para controlar el filtrado en el pozo. La desventaja de este método radica en los largos periodos de espesamiento (18 a 36 horas), y en consecuencia tiempos de espera muy grandes.

Proceso de las cementaciones primarias

El primer tramo de tubería que se introduce al pozo lleva una zapata guía (tapa de protección) para evitar dañar la T.R. al introducirla en el pozo.

Para que los tubos queden lo mejor centrado posible en el agujero, se les colocan centradores en modo alternado, esto es en un tubo si y otro no. Al alcanzar el fondo con la tubería de revestimiento, se levanta la T.R. 4 ó 5 m y se le coloca en la superficie, el cabezal de cementación. Posteriormente, se hacen las conexiones en la línea de cementación que comunica el cabezal con el equipo que bombea la lechada, el cual consiste de un vehículo equipado con bombas y un tablero de control (consola), donde se registran los datos de presión de bombeo, gasto y la densidad de la lechada.

Además de este equipo se utilizan silos o carros tanque conteniendo cemento ya dosificado a granel. El número de estos varía con la cantidad de cemento que se utiliza en la operación.

De los silos el cemento se envía al equipo de mezcla (de tipo embudo), en cuya parte inferior se suministra agua a presión; en dicho punto se forma la lechada, la cual se envía a un tanque homogeneizador

con agitación constante y de ahí, por medio de una bomba se succiona y se bombea al pozo.

Antes de iniciar el bombeo de lechada, se introduce en la tubería un tapón limpiador entre el cemento y el fluido de perforación para evitar que se contamine la lechada de cemento. El cemento se bombea con alta presión, para que sea capaz de desplazar al lodo por el espacio anular, de tal modo que aflore en la superficie.

Cuando se termina de bombear el cemento, se mete otro tapón que es empujado por el fluido de desplazamiento hasta un cople que se coloca aproximadamente a 25 m sobre la zapata.

Si en la operación no se presentan pérdidas por fracturas o fallas de calibración, la lechada cementante debe aflorar a la superficie en una cantidad igual al exceso que se metió, en las Figura 1.3 se muestra el procedimiento de cementación primaria.

1.5.2.2 Cementaciones secundarias o correctivas

Las cementaciones secundarias, son cementaciones correctivas, en la Figura 1.4 se presentan los siguientes ejemplos:

- Recementaciones por el espacio anular.
- Cementaciones forzadas.
- Tapones para sellar zonas con pérdida de circulación.
- Tapones para abandonar pozos.
- Tapones para iniciar perforación direccional.

(a) Recementación por el espacio anular

En la cementación de la tubería de revestimiento, el volumen utilizado para llenar el espacio anular, en algunos casos, no es

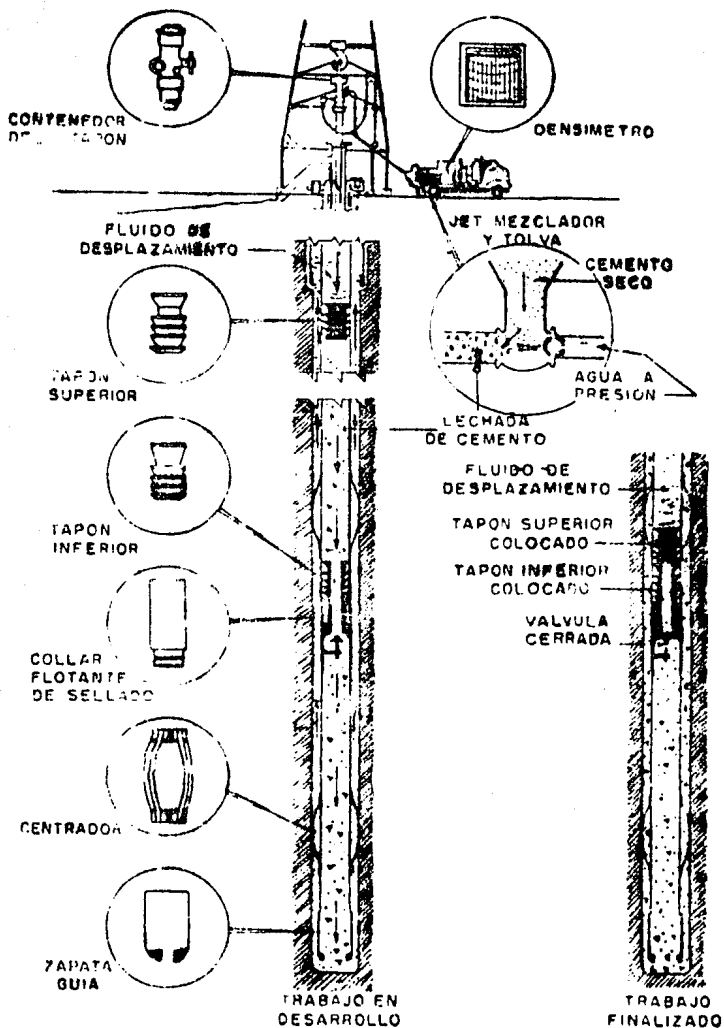


Fig. 1.3 Diagrama de cementación primaria por el método de dos tapones.

suficiente debido principalmente a la existencia de pérdidas de circulación que absorbieron una cantidad apreciable de la lechada, impidiendo que ésta aflore a la superficie. Otro caso, por el cual no se llena el espacio anular se debe a una sedimentación exagerada de la lechada, provocado por un diseño deficiente de la composición cementante. Las técnicas para resolver estos problemas son:

(1) Meter un tubing pequeño por el espacio anular e inyectar la lechada a presión, esta recementación es muy difícil debido al reducido espacio anular, ver Fig. 1.4-a.

(2) Cementar por gravedad empleando alta presión para reducir las bolsas de aire y/o fluido de perforación, ver Fig. 1.4-b.

(3) Aplicar por gravedad arena de sílice, en forma intermitente para llenar el espacio anular carente de cemento, para que con la vibración de la T.R. al continuar la perforación y por gravedad se vaya acomodando en forma adecuada. Esta ha sido una solución aplicada en algunos pozos del campo de Cerro Prieto, B.C.N. (Mexicali), con excelentes resultados.

(4) Otra técnica es el método de los disparos, que consiste en introducir un equipo especial hasta la profundidad indicada y realizar algunos disparos para producir agujeros en la tubería. Por medio de estos agujeros se puede reestablecer la circulación para cementar normalmente; no obstante esta técnica es muy poco efectiva ya que se dañan las tuberías y hay mayor posibilidad de colapsos.

(b) Cementaciones forzadas

La cementación forzada consiste en aplicar la lechada de cemento con alta presión para forzar el cemento hacia una caverna o contra una

formación porosa a través de la tubería de revestimiento, dando como resultado un sello entre la formación y la tubería, ver Fig. 1.4-c.

Se utiliza para separar zonas productoras de aquellas que producen fluidos indeseables y/o para reparar problemas de fugas de fluidos por la tubería de revestimiento.

La tecnología de la cementación forzada incluye el conocimiento del gradiente de fractura de las formaciones y de las propiedades de filtración de las lechadas que son inyectadas contra un medio permeable.

(c) Tapones para sellar zonas con pérdida de circulación

Durante la perforación es común encontrar intervalos con "pérdida de circulación", para combatirlos lo primero que se hace es localizar la profundidad de la fractura o zona de pérdida. Una vez determinada ésta se coloca la tubería de perforación hasta dicha profundidad y se bombea la lechada por el interior de la tubería de perforación, ver Fig. 1.4-d. Posteriormente, se levanta la T.P. unos 10 m del tapón y se circula fluido de perforación durante un cierto tiempo para eliminar los residuos de lechada en la T.P. en el espacio anular.

La composición de la lechada es especial, debido a que en su diseño se debe tener en cuenta la temperatura, volumen de la pérdida y su tiempo de fraguado. El volumen de la lechada que se requiere, está en función de las pérdidas de lodo que se presentaron durante la perforación.

Una vez colocado el tapón se espera su tiempo de fraguado, el cual fluctúa entre 6 y 12 horas, posterior a éste, se presiona al pozo por unos 30 min para detectar alguna posible fuga de la cementación y de

este modo, confirmar el éxito de la colocación del tapón. Si no se mantiene constante la presión, se procede a colocar otro tapón repitiéndose el proceso anterior.

(d) Tapones para abandonar pozos

Quando un pozo no tiene una producción adecuada es decir, se tienen gases y salmueras altamente corrosivos que representan un alto riesgo de descontrol y pérdida del pozo, se toma la decisión de abandonarlo. Para esto se cementa un tramo de unos 30 a 50 m con cemento de fraguado rápido y alta resistencia, de tal forma que el pozo no fluya, ver Fig. 1.4-e.

(e) Tapones para iniciar perforación direccional

En algunos pozos se puede presentar el problema de "pesca", esto es la rotura de algún tramo de tubería que no se puede recuperar ni barrenar; adoptándose la solución más adecuada que es desviar el pozo, para lo cual es necesario cementar un tramo del pozo para apoyar el cambio de la dirección de éste, ver Fig. 1.4-f.

1.5.3 Problemas relacionados con la cementación de pozos geotérmicos

De las observaciones efectuadas durante la perforación, terminación, mantenimiento y reparación de los pozos en los principales campos geotérmicos de México (Cerro Prieto B.C.N.; Los Azufres Mich.; La Primavera Jal. y Los Humeros Pue.) se detectaron los siguientes problemas relacionados con el cemento y su colocación:

- Adherencia deficiente entre el cemento a la T.R. o a las paredes del pozo.

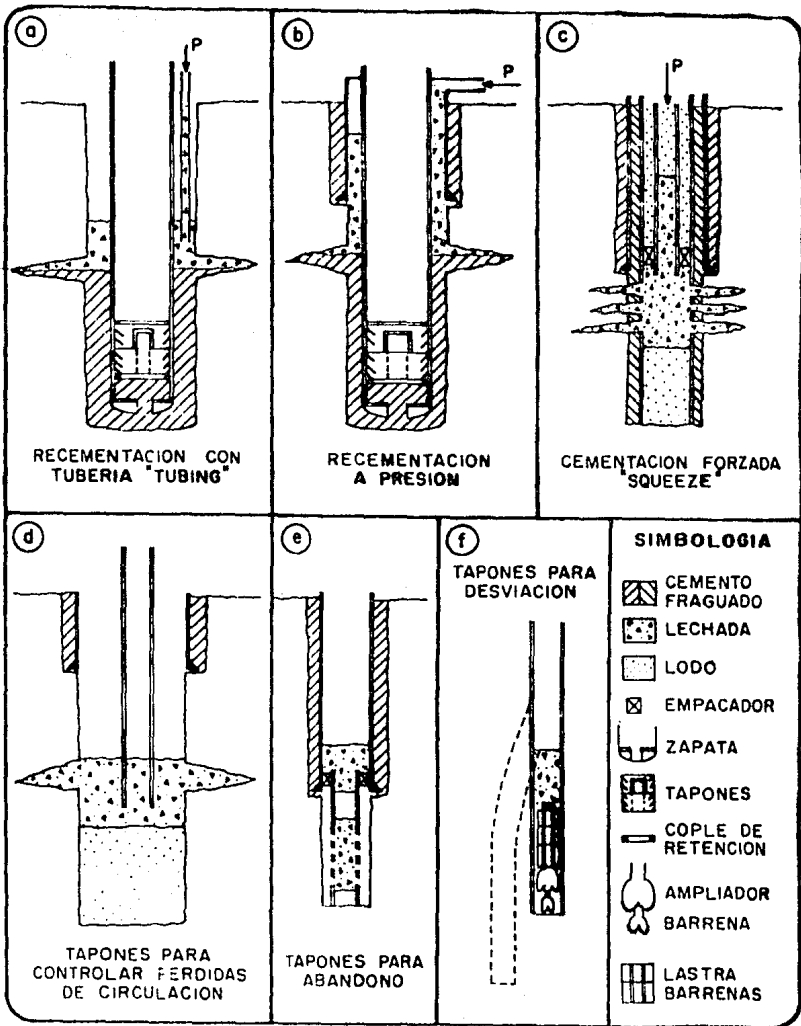


Fig. 1.4 Tipos de cementaciones secundarias.

- Pérdida de circulación durante la cementación.
- Determinación incorrecta de la cima del cemento.
- Tiempo de fraguado excesivo en los cementos utilizados.
- Retrogresión de resistencia del cemento.
- Empleo de cemento de construcción (tipo I) sin aditivos.
- Empleo de salmuera en la preparación de la lechada.

1.5.4 Cementos especiales para pozos

A través de los años, se han modificado y producido muchos tipos de cemento especiales, en donde las condiciones de los pozos han exigido mejores propiedades de los cementos convencionales.

Materiales

El cemento Portland es el principal constituyente de la mayoría de los materiales de cementación y el que ha sido utilizado en la industria de la construcción; sin embargo, los requerimientos adicionales de bombeabilidad a más altas presiones y temperaturas en los pozos profundos hicieron necesario un cambio en sus especificaciones.

Los requisitos necesarios para que un cemento desempeñe satisfactoriamente las funciones para la cementación de una tubería de revestimiento son las siguientes:

- 1.- La lechada de cemento debe ser capaz de colocarse en la posición deseada por medio de equipo de bombeo desde la superficie.
- 2.- Después de colocado, debe adquirir suficiente fuerza o resistencia mecánica en un tiempo razonablemente corto, para que el tiempo de espera de su fraguado (WOC) pueda reducirse al mínimo

- Pérdida de circulación durante la cementación.
- Determinación incorrecta de la cima del cemento.
- Tiempo de fraguado excesivo en los cementos utilizados.
- Retrogresión de resistencia del cemento.
- Empleo de cemento de construcción (tipo I) sin aditivos.
- Empleo de salmuera en la preparación de la lechada.

1.5.4 Cementos especiales para pozos

A través de los años, se han modificado y producido muchos tipos de cemento especiales, en donde las condiciones de los pozos han exigido mejores propiedades de los cementos convencionales.

Materiales

El cemento Portland es el principal constituyente de la mayoría de los materiales de cementación y el que ha sido utilizado en la industria de la construcción; sin embargo, los requerimientos adicionales de bombeabilidad a más altas presiones y temperaturas en los pozos profundos hicieron necesario un cambio en sus especificaciones.

Los requisitos necesarios para que un cemento desempeñe satisfactoriamente las funciones para la cementación de una tubería de revestimiento son las siguientes:

- 1.- La lechada de cemento debe ser capaz de colocarse en la posición deseada por medio de equipo de bombeo desde la superficie.
- 2.- Después de colocado, debe adquirir suficiente fuerza o resistencia mecánica en un tiempo razonablemente corto, para que el tiempo de espera de su fraguado (WOC) pueda reducirse al mínimo

indispensable.

3.- El cemento debe hacer un sello positivo entre la tubería de revestimiento y la formación.

4.- El cemento debe tener suficiente fuerza para evitar fallas mecánicas.

5.- El cemento debe ser químicamente inerte a cualquier formación o fluido con el que se pueda poner en contacto.

6.- El cemento debe ser suficientemente estable para no deteriorarse, descomponerse o de alguna otra forma perder sus cualidades de fuerza para el lapso en que esté en uso, que puede ser como mínimo de 15 años.

7.- El cemento debe ser lo suficientemente impermeable para que los fluidos no fluyan a través de él.

Los principales materiales usados en pozos geotérmicos y sus funciones son listadas a continuación:

Cemento: El tipo G con resistencia a los sulfatos.

Bentonita: Permite grandes cantidades de agua para reducir la densidad de la lechada, aunque disminuye la resistencia a la compresión del cemento, si se emplea arriba del 2%.

Harina Sílica: Se usa para impedir la disminución de la resistencia mecánica del cemento, se agrega al 40%.

Reductor de fricción o dispersante: Se usa para separar las partículas de cemento y agua, proporcionando lubricación, baja la viscosidad de la lechada e induce el flujo turbulento.

Control de pérdida de fluido: Reduce la velocidad de la pérdida de agua de una lechada, mejora la bombeabilidad.

Retardadores de temperatura: Retrasa el espesamiento del cemento, proporcionando mayores tiempos de bombeabilidad.

Aceleradores: Cloruro de calcio, acelera el fraguado del cemento en condiciones frías.

Dosificación.- En función de las propiedades físicas de los materiales cementadores y aditivos, se determina la densidad y rendimiento de la lechada.

$$\text{Densidad de la lechada} = \frac{\text{peso de materiales}}{\text{Volumen}}$$

Rendimiento de la lechada = Volumen del material + Volumen de agua

1.6 Perforación de un Pozo Geotérmico

La tecnología empleada en la perforación de pozos geotérmicos se basa en la desarrollada por la industria petrolera. Sin embargo, el enfrentar condiciones críticas como son los elevados gradientes de temperatura y el intenso fracturamiento de las formaciones, en los diferentes campos geotérmicos del mundo, han inducido a una tecnología especial, que está en constante desarrollo e innovación y que presenta variantes especiales como:

a) Torre de enfriamiento para el lodo debido a las altas temperaturas del medio ambiente geotérmico.

b) Fluidos de perforación y cementos especiales para soportar las altas temperaturas y solucionar más apropiadamente problemas surgidos durante la perforación del pozo.

c) Tuberías de ademe de composiciones metalúrgicas especiales para las condiciones particulares de cada campo geotérmico.

d) Registros de temperaturas para auxiliar en la elección correcta de la zona de producción del pozo.

Estas diferencias aunadas a las técnicas a seguir, de acuerdo con la gravedad e incidencia de los problemas presentados, implican un mayor costo de la perforación geotérmica. Por esto se requiere que en la construcción de los pozos geotérmicos se tenga una planeación especial en los programas de perforación y terminación, tratando de obtener con ésto una vida útil del pozo de por lo menos 10 años. En la Figura 1.5, se muestran los porcentajes del costo total que representan los diferentes aspectos involucrados en la construcción de un pozo, así como también, los porcentajes del tiempo total que representan estas operaciones relacionadas con la construcción del mismo. Existen varios tipos de pozos dependiendo del objetivo que se persiga, por ejemplo:

Exploratorios cuya principal función es la de verificar, con la menor inversión posible, la existencia de un intervalo productor de fluidos geotérmicos para apoyar y establecer un programa que permita evaluar el potencial de la zona de interés.

Productores cuya finalidad es proporcionar un conducto adecuado para la explotación de la energía geotérmica garantizando una vida útil y segura, tanto en las instalaciones como en la del yacimiento.

1.6.1 Localización de pozos

Es evidente que la estimación preliminar de la energía potencial de un sistema hidrotermal basado en datos de superficie esté sujeto a diversas incertidumbres. De aquí que uno de los primeros objetivos de un programa de perforación debe ser reducir estas dudas, verificando las suposiciones iniciales de acuerdo con la forma y volumen de la región caliente así como de su distribución de temperaturas. Esta información se obtiene por medio de la realización de estudios de

factibilidad, los cuales consisten de tres fases:

Fase I. Geología, Vulcanología, Hidrogeología e Hidrogeoquímica.

Fase II. Geoelectrónicos, Magnetométricos, Gravimétricos y Sismológicos.

Fase III. Perforación de pozos someros de gradiente térmico.

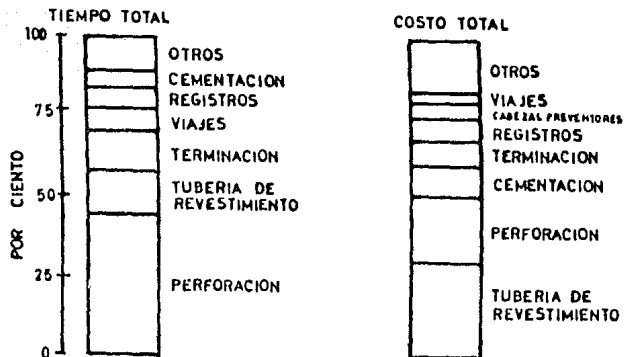


Fig. 1.5 Tiempo de perforación y costo de operación pozo modelo East Mesa.

1.6.2 Perforación rotatoria moderna

El método empleado en la actualidad para perforar pozos profundos es el de la perforación rotatoria hidráulica, que consiste en producir un agujero en la corteza terrestre mediante una barrena colocada al

final de la tubería de perforación; a través de ésta, se bombea un fluido a presión (lodo, agua, aire, espuma o neblina), el cual sale por las toberas de la barrena fluyendo hacia la superficie por el anulo (espacio formado entre la pared externa de la tubería y el pozo) llevando en suspensión los recortes de la formación atravesada. En la superficie, este fluido se canaliza a un sistema de presas con el fin de eliminar los recortes y tratarlo químicamente.

El equipo empleado para estas operaciones es el llamado aparejo o equipo de perforación rotatorio moderno, ver Figura 1.6. Este equipo consiste de cinco sistemas principales, en donde cada uno de los cuales cumple con trabajos específicos, pero que en conjunto trabajan coordinadamente como un sólo sistema.

1.6.2.1 Sistema de soporte o levante

Soporta todo el sistema rotatorio, circulatorio y de prevención durante la perforación de los pozos, también cuenta con el equipo necesario para subir y bajar todas las herramientas de la sarta de perforación, proporcionando además las áreas de trabajo para las diversas operaciones que se realizan en la perforación.

Este sistema se forma de dos componentes que pueden subagruparse en:

- (a) Base estructural y mástil o torre de altura.
- (b) Dispositivos mecánicos de levante.

1.6.2.2 Sistema rotatorio

Este sistema hace girar a toda la sarta de perforación para que la barrena, efectúe el corte de las rocas, para penetrar en la formación. Los equipos rotatorios son los dispositivos que desarrollan la mayor

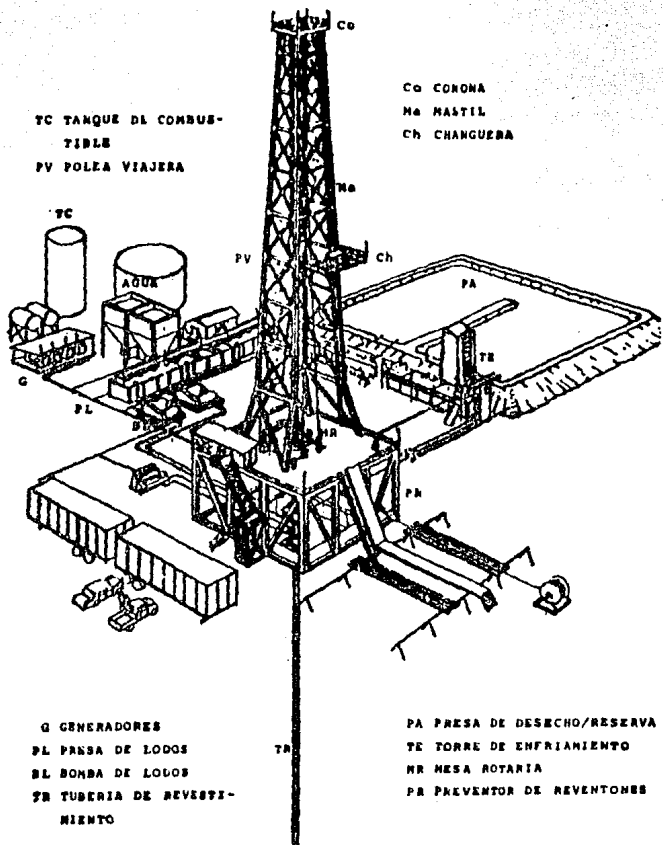


Fig. 1.6 Equipo de perforación rotatoria.

actividad mecánica y consisten esencialmente de tres subcomponentes:

(a) La Mesa Rotatoria proporciona la potencia giratoria a la sarta de perforación, además de sostenerla cuando se afiaden o remueven secciones de tubería de perforación.

(b) La sarta de perforación que asciende y desciende al pozo, suministra peso a la barrena, transmite el torque mediante movimiento rotatorio y conduce el fluido a presión hacia la barrena.

(c) La barrena es el instrumento de corte de las rocas.

1.6.2.3 Sistema de circulación

Su función primaria es apoyar al sistema rotatorio proporcionando el equipo necesario, materiales y áreas de trabajo para revisar, preparar y acondicionar el fluido de perforación (Figura 1.7). Mantiene a los fluidos de perforación en circuitos completos proporcionando un equilibrio hidrostático entre las formaciones y la superficie. Con las propiedades fisicoquímicas de dichos fluidos se limpia el sistema "pozo-equipos" para permitir que las herramientas de ataque avancen dentro de las rocas de la formación, además de enfriar las herramientas que se calientan con el trabajo mecánico. Este sistema consiste de cuatro componentes básicos:

(a) El fluido de perforación.

(b) El área de preparación del fluido.

(c) El equipo de circulación comprende líneas, tanques de flujo y bombas de lodos.

(d) El área de acondicionamiento consiste de cribas vibradoras, desarenadores, desgasificadores y separadores de sólidos.

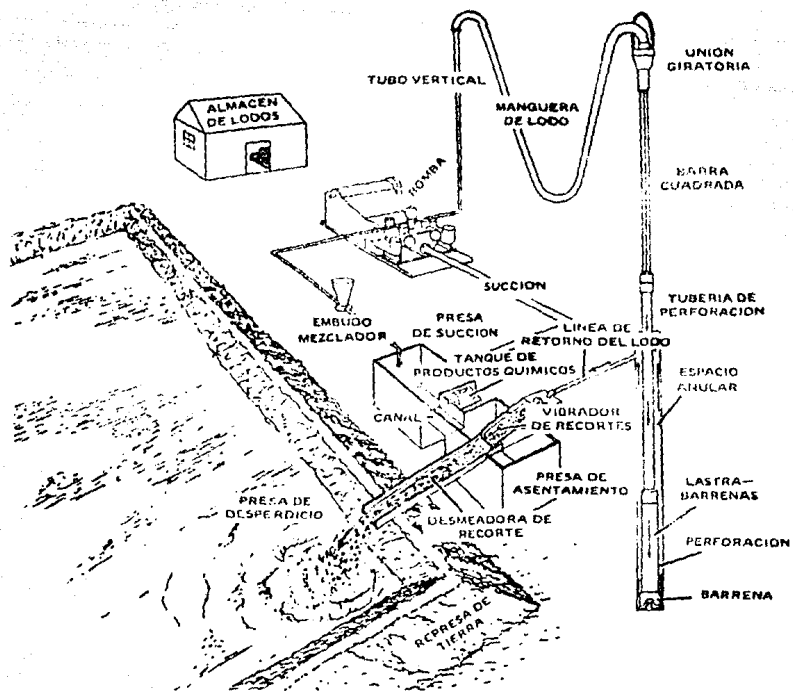


Fig. 1.7 Sistema de circulación del lodo.

1.6.2.4 Sistema de potencia

Genera y distribuye toda la energía necesaria para accionar los componentes del sistema de perforación. Los equipos de perforación, por su situación estratégica en la búsqueda de recursos naturales son de necesidad autosuficientes, en cuanto a la demanda de energía, por diseño todos los equipos cuentan con motores de combustión interna, que proveen de potencia a todo el sistema para utilizarla mecánica y electromecánicamente, dicho sistema se subdivide en dos componentes principales :

- (a) Grandes máquinas de combustión interna.
- (b) Generadores de corriente eléctrica.
- (c) Sistemas de transmisión de energía mecánica y eléctrica.

1.6.2.5 Sistema de prevención

Es el equipo con todos los dispositivos necesarios para controlar flujos súbitos que puedan aparecer durante la perforación. Los recursos naturales que yacen en las rocas de la corteza terrestre, están asociados con fuerzas expulsivas de gran magnitud que muchas veces, pueden provocar brotes de fluidos en forma espontánea, presentándose reventones que pueden ser catastróficos; por lo cual el equipo de prevención cuenta con dispositivos que puedan prevenir los reventones, así como también para controlar estos brotes cuando estos ya se manifestaron físicamente. Los principales componentes del sistema son:

- (a) Los preventores con dispositivos de cierre.
- (b) Las bombas con acumuladores para operación automática.
- (c) Las líneas de control.
- (d) Las líneas de inyección.

1.6.3 Programa de perforación

La tubería de ademe representa una tercera parte o más del costo del pozo y la selección adecuada de la misma permite obtener importantes economías. Las funciones del ademe consisten básicamente en:

(a) Soportar las paredes del pozo y evitar el derrumbe de formaciones no consolidadas.

(b) Proporcionar un agujero de diámetro conocido a través del cual puedan efectuarse las operaciones subsecuentes de perforación, terminación y producción.

(c) Proporcionar un medio para controlar la presión interna, externa e intermedia del pozo.

(d) Proporcionar un soporte adecuado para las válvulas y conexiones en la superficie, necesarias para el control y manejo de los fluidos producidos.

(e) Evitar fluidos de una formación a otra y permitir la producción de una zona específica.

De acuerdo a las funciones que desempeña cada columna de tubería, es posible clasificarlas de la manera siguiente:

1.6.3.1 Tubería conductora: Su objetivo primordial es evitar la erosión o inundación del pozo en la base del equipo, además de proporcionar un conducto tubular para elevar el fluido de perforación a la superficie. También se usa para evitar la erosión en las sartas siguientes.

1.6.3.2 Tubería superficial: Esta sección se introduce para proteger al pozo de cavidades internas o fallas que se presentan generalmente cerca de la superficie. También protege al pozo de las filtraciones de

agua de los mantos acuíferos y para soportar las formaciones flojas no consolidadas.

1.6.3.3 Tubería intermedia: Su objetivo es aislar las zonas arenosas o de arcilla hidratable y proporciona el anclaje del árbol de válvulas.

1.6.3.4 Tubería productora: Con esta tubería se sitúa la zona productora y se solucionan problemas, tales como zonas con tendencia a la fractura, aísla la zona de producción evitando flujos de otras formaciones y es el conducto, por el cual se tendrá el flujo de fluidos del intervalo productor.

La tubería de producción, excepto en la zona del yacimiento, obviamente, va también cementada al terreno o a la tubería de ademe, según sea el caso. El diámetro de la tubería de producción hay que seleccionarlo cuidadosamente para el flujo que se espera. Si se elige muy pequeño, se restringirá indebidamente la producción del pozo. Por el contrario, si el diámetro es demasiado grande, además de que se incrementará el costo, puede ocurrir que, con permeabilidad baja en el yacimiento, el pozo sea incapaz de fluir por sí mismo.

También hay que considerar la posibilidad de que por corrosión, esfuerzos excesivos u otras causas, la tubería se dañe; y para repararla, haya que introducir otro tubo de menor diámetro, dentro del que se instaló originalmente.

El tamaño de este tubo nuevo debe ser tal que permita un flujo razonable, para que el pozo se pueda seguir utilizando. Entonces, se fija primero el diámetro de la tubería de producción y en base a él, se determinarán los diámetros que tendrán los distintos tramos de la tubería de ademe.

El programa de perforación puede ser dividido en cuatro fases

básicas: conductora, superficial, intermedia y de producción.

1.6.4 Costos en la perforación de pozos

Los costos en los pozos geotérmicos se mantienen aproximadamente tres veces más caros que los pozos petroleros, aunque individualmente varían entre 1 y 6 veces el costo de un pozo petrolero. El factor de escalación en costo es de 17% anual.

Los costos de construcción de un pozo es de aproximadamente 2.500 millones de pesos para la perforación y un 30% más para mantenimiento y reparación.

El tiempo de perforación en los pozos depende principalmente de tres tipos de eventos:

(a) La velocidad de penetración durante las operaciones de perforación.

(b) El tiempo necesario para resolver los problemas presentados durante las operaciones de perforación.

(c) El tiempo utilizado durante la introducción y cementación de tuberías de revestimiento.

1.6.5 Velocidad de perforación

La velocidad de penetración durante la perforación depende del tipo de formaciones atravesadas, el tipo de fluido de perforación, de los parámetros hidráulicos y mecánicos utilizados durante dicha operación.

Existen formaciones de origen volcánico impermeables y duras, que exigen propiedades lubricantes en los fluidos de perforación para disminuir la abrasión e incrementar la vida útil de la tubería de perforación y las barrenas.

En el caso de formaciones de tipo sedimentario que son permeables y suaves, los fluidos utilizados deberán presentar características específicas para reducir la probabilidad de inducir pérdidas de circulación.

Así, existen combinaciones de estructuras geológicas que van variando con la profundidad y exigen un fluido apropiado para cada una de ellas en cada pozo.

Generalmente, durante la perforación se emplean diferentes tipos de fluidos para hacerla más eficiente. En lo que respecta a los lodos y espuma de perforación, es necesario que tengan estabilidad térmica para las zonas geotérmicas de mayor temperatura.

En la Figura 1.8, se muestran diferentes tipos de fluidos de perforación en relación a su velocidad de penetración, se puede observar que el aire es cuatro veces más veloz que un lodo convencional, sin embargo, tiene limitaciones en cuanto a su aplicación.

1.6.6 Problemas durante la perforación de pozos geotérmicos

La problemática de la perforación geotérmica y su efecto en el tiempo se tratará en el punto 1.7.

1.6.7 Cementación de pozos geotérmicos

El tercer punto importante a considerar es el de la introducción y cementación de las tuberías revestidoras, ya que una buena cementación asegura la vida útil de los pozos, proporcionando la correcta fijación de las tuberías a las formaciones y reduciendo la acción agresiva de los fluidos subterráneos para evitar problemas de corrosión.

Para lograr ésto, es necesario que los sistemas cementantes utilizados sean los adecuados y permanescan estables a elevadas temperaturas.

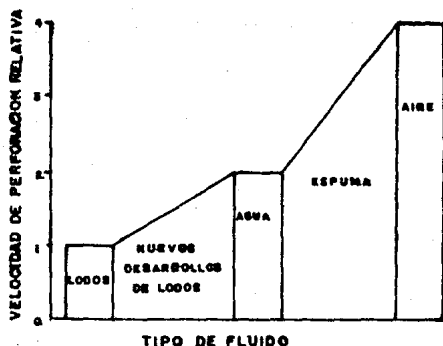


Fig. 1.8 Velocidad de perforación conforme al tipo de fluido utilizado.

El medio geotérmico es sumamente agresivo, las temperaturas entre 300°C y 400°C, las salmueras con componentes corrosivos y los gases disueltos en ellas, además de los cambios de temperatura que se presentan al abrir o cerrar los pozos, provocan la disminución en la vida útil de los sistemas cementantes que se degradan totalmente, dejando desprotegidas las tuberías y con ello aumentando los costos de mantenimiento y reparación en los pozos geotérmicos.

En la Figura 1.9 se muestra como el cemento de construcción a 80°C se degrada (pierde su resistencia), mientras en un cemento geotérmico la resistencia se va incrementando a medida que la temperatura se eleva hasta los 300°C donde parece estabilizarse.

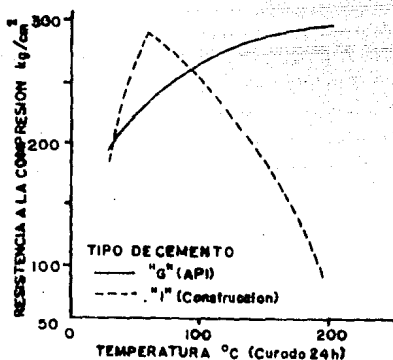


Fig. 1.9 Efecto de la temperatura sobre la resistencia de los cementos.

1.7 Problemática de la Perforación Geotérmica

Durante la exploración y desarrollo de un campo geotérmico surgen problemas relacionados en su mayoría con los fluidos de perforación utilizados. Estos problemas juegan un papel mucho más importante en la perforación geotérmica que en la petrolera, por la frecuencia y severidad con que se presentan. Una revisión de los registros de perforación de los pozos geotérmicos existentes, ha mostrado que estos

problemas provocan cuantiosas pérdidas de tiempo elevando por lo tanto el costo total del pozo geotérmico. Los problemas que comúnmente se presentan en la perforación y terminación de los pozos geotérmicos se describen a continuación :

- Pérdidas de circulación.
- Inestabilidad (gelación) de los lodos por altas temperaturas.
- Derrumbes durante la perforación y corridas de tuberías.
- Pegadura de tuberías.
- Ruptura de tuberías y pesca.
- Desviaciones del agujero.
- Atrapamiento de tuberías.
- Fallas de equipo.

1.7.1 Pérdida de circulación

Es el problema más serio y costoso de la perforación geotérmica debido al consumo elevado de materiales usados en ésta, al tiempo por renta de equipo parado y al número de pozos abandonados. Este problema consiste en la pérdida del lodo hacia la formación y se manifiesta como, una disminución gradual del nivel en las presas o como una pérdida completa del sistema de lodos, provocada en sistemas altamente fracturados y/o fallados, casos típicos en la mayoría de las áreas geotérmicas.

1.7.2 Inestabilidad (gelación) de los lodos por las altas temperaturas

La mayor parte de los lodos empleados en pozos geotérmicos son base-agua cuya estabilidad térmica en condiciones de circulación se reduce a temperaturas menores de los 180°C, acelerándose su degradación

al interrumpir la circulación de éste debido a que alcanza el equilibrio con las temperaturas de las formaciones penetradas.

La gelación del lodo ocurre cuando éste no está químicamente bien tratado, aunque durante la circulación del lodo, éste pasa a través de una torre de enfriamiento en donde se le reduce la temperatura ayudando con esto a contrarrestar el problema.

Fundamentalmente, el problema se origina a causa de la floculación de las arcillas coloidales que producen altas resistencias al corte y al gel, por ejemplo valores $\geq 9.576 \text{ N/m}^2$ (20 lb/100 ft^2), lo cual también provoca que sea difícil el control de la pérdida de agua o filtrado hacia la formación. Además, los agentes de control como el carboxi-metil-celulosa también se degradan rápidamente a 150°C , originando la formación de un enjarre excesivo sobre las paredes del pozo que finalmente, tendrá una incidencia negativa sobre el trabajo de cementación. Los lodos base aceite son más estables y soportan temperaturas de más de 250°C , pero no se consideran útiles para la perforación geotérmica debido a que la contaminación del acuífero por aceite podría disminuir su productividad, por su alto costo en zonas de pérdidas de circulación y por su tratamiento químico. Así, bajo condiciones estáticas y con tiempos de exposición prolongados el lodo tiende a desarrollar una gelatinosidad excesiva que causa problemas específicos como:

(1) Dificultades de circulación. - Se necesitan presiones altas para restablecer la circulación del lodo, las cuales causan problemas tales como fracturación de las formaciones provocando pérdidas de circulación y demoras por interrupción de la circulación, reduciendo con ello el diámetro anular en el agujero descubierto. Esto trae como consecuencia,

una mayor incidencia de pegadas o atrapamiento de tuberías, agudizándose durante el descenso de la T.R. en las operaciones de cementación.

(2) Canalización del cemento.- Un lodo demasiado gelado es difícil de desplazarlo durante los trabajos de cementación primaria y debido a las diferencias de movilidad, las lechadas cementantes pueden canalizarse a través de él, dejando sin cementar longitudes apreciables de la tubería de revestimiento.

(3) Daño a la formación.- Dentro de la zona de producción, el lodo perdido hacia las fracturas de alta permeabilidad puede llegar a gelarse hasta una condición casi sólida, provocando un deterioro de la zona productora.

1.7.3 Derrumbes de las paredes del pozo

La inestabilidad o derrumbe de las paredes del pozo se presentan durante las operaciones de perforación y/o acondicionamiento del pozo, previo a la corrida y cementación de las tuberías de revestimiento. El origen de este problema se debe en parte a:

(1) La presencia de arcillas deleznablees que son lavadas debido a una mala selección del tipo del lodo.

(2) A la falta de un buen acondicionamiento químico a base de reductores de filtrado.

(3) Elevado contenido de arcillas de alto rendimiento en la formación penetrada.

(4) Grado de compactación de la formación.

(5) Elevada humedad en las rocas penetradas o invadidas por el fluido de perforación.

(6) Deficiencia o mal diseño hidráulico de la perforación que provoca una elevada caída de presión en secciones estrechas como los lastrabarrenas de perforación, lavando o socavando estratos débilmente compactados.

1.7.4 Pegadura de tuberías

Este tipo de problemas está muy ligado con la falta de control de las propiedades de filtración y lubricidad del lodo de perforación, pues al existir un enjarre con un elevado coeficiente de fricción, éste tiende a provocar la pegadura de la sarta por presión diferencial. Esto se agudiza especialmente, en las zonas que tienen contacto con los lastrabarrenas de perforación.

1.7.5 Atrapamiento de tuberías

Este problema se encuentra relacionado de manera muy estrecha con la ocurrencia de derrumbes de las paredes del pozo, provoca que los recortes que caen, acúñen la tubería debido al mismo movimiento rotatorio de ésta, ocasionándose la ruptura de la misma.

1.7.6 Pesca

Como consecuencia del problema anterior, es necesario realizar las llamadas operaciones de pesca con el fin de recuperar la barrena y los tramos de tuberías de perforación atrapados. Las operaciones de pesca son muy difíciles y riesgosas debido a las altas temperaturas de los pozos geotérmicos. En algunos casos, la pesca se agudiza conforme transcurre el tiempo, llegandose a tener dos opciones abandonar o desviar el pozo. Esto se debe a que las herramientas usadas para tal

fin, dependen de características eléctricas mismas que son susceptibles a las elevadas temperaturas.

1.7.7 Fallas de equipo

Las principales fallas de equipo se presentan en las bombas de lodo debido a la presencia de un alto contenido de sólidos abrasivos en el lodo, que provocan un desgaste por erosión de los émbolos y empaques de éstos. Otra de las fallas se manifiesta en la descalibración de las barrenas a causa de las altas temperaturas del medio geotérmico.

CAPITULO II

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERDIDA DE CIRCULACION

La pérdida de circulación se define como la pérdida de fluido de perforación, hacia la formación expuesta durante la perforación. La pérdida puede variar desde un descenso gradual del nivel de las presas de lodo, hasta la pérdida parcial o total del lodo y no debe confundirse, con la disminución del volumen del lodo por pérdidas por filtración para llenar el pozo o el sistema de circulación. Al inicio de la perforación, la pérdida de agua por filtración es intensa y conforme se avanza en la perforación decrece sustancialmente.

Las pérdidas de fluido varían de acuerdo al tipo de formación, severidad y causas que la originaron.

Una manera apropiada de combatir la pérdida de circulación es previniéndola, aunque esto sólo puede alcanzarse, con una acertada comprensión de las causas que la originaron.

2.1 Tipos de Zonas de Pérdida de Circulación

Los tipos de zonas de pérdida de circulación se clasifican en:

- Formaciones Altamente Permeables
- Formaciones Cavernosas
- Formaciones Fracturadas

Las formaciones en las cuales se presentan con mayor frecuencia las pérdidas de circulación, son aquellas que tienen poros o fisuras tres veces más grandes que la mayor de las partículas presentes en el fluido de perforación.

2.1.1 Formaciones altamente permeables

En su mayoría están constituidos por rocas sedimentarias y en porcentajes menores por metamórficas e ígneas, se caracterizan por dar origen a gruesos enjarres, por estar asociados a profundidades someras y por contener fluidos raramente a presiones anormales. En el laboratorio se ha demostrado que una formación que tenga menos de 14 darcys no aceptará lodo, la formación lo aceptará dependiendo de la relación de abertura entre los poros y las partículas que forman el lodo. Generalmente se acepta que las aberturas en la formación que permitan el paso del lodo deben ser alrededor de 3 veces más grandes que el diámetro máximo de las partículas que forman el lodo. Ejemplos: arenas, gravas sueltas, lutitas y algunos tipos de caliza (ver Figura 2.1).

2.1.2 Formaciones cavernosas

Este tipo de formaciones está asociado con: calizas arrecifales y dolomitas así como con formaciones volcánicas. En la roca caliza, las cavidades se originan por el flujo continuo de agua natural que disuelve parte de la roca matriz. Las cavidades y cavernas pueden formarse en un ambiente volcánico, como consecuencia del enfriamiento del magma o del tipo de ceniza depositado. Los estratos que contienen cavernas son a menudo identificados geológicamente y la profundidad a la cual se encuentran, son hasta cierto punto predecibles en un área donde se hayan perforado varios pozos. Las cavernas pueden variar en sus dimensiones, desde unos centímetros hasta varios metros de abertura, (ver Figura 2.1).

2.1.3 Formaciones fracturadas

Dentro de estas formaciones existen dos tipos:

- Formaciones con Fracturas Naturales
- Formaciones Fracturadas Hidráulicamente o Inducidas

2.1.3.1 Formaciones con fracturas naturales

Las fracturas son características intrínsecas de las formaciones y se pueden encontrar en cualquier tipo de roca. Esta fractura natural se puede definir como la interfase entre dos planos de roca, los cuales tienen limitado vínculo químico entre sí. Cuando los planos son horizontales están unidos por la sobrecarga y cuando la interfase es aproximadamente vertical, las fuerzas con las cuales los planos se mantienen unidos pueden ser considerablemente menores y mayores, que la de la sobrecarga. Esto depende de los esfuerzos tectónicos de la localidad. Cuando las presiones críticas son alcanzadas, tales fracturas pueden ceder y admitir lodo, una fractura que ha comenzado a admitir lodo puede ampliarse, aceptando más lodo a una menor presión (ver Figura 2.1).

2.1.3.2 Formaciones fracturadas hidráulicamente o inducidas

El fracturamiento de ciertos tipos de formaciones son el resultado de perforar sin tomar en cuenta las reglas básicas de la perforación, como es la de "no generar sobrepresiones sobre formaciones expuestas". Las pérdidas de lodo por fracturas inducidas son probablemente las más graves, porque pueden ocurrir en cualquier tipo de formación. Las condiciones que favorecen la inducción de fracturas son:

- a) Irregularidades en el agujero.
- b) Alta densidad del lodo de perforación.

- c) Presión interior excesiva o presiones en el fondo del pozo.
- d) Zonas permeables.
- e) Sistema hidráulico cerrado.

Las fracturas inducidas se diferencian de las fracturas naturales debido a que la pérdida de lodo, en las primeras, se requiere de suficiente presión para romper la formación y en cambio para las naturales prácticamente no se requiere de gran presión para que éstas hagan acto de presencia. Las fracturas naturales pueden agrandarse por la excesiva sobrepresión y por el desgaste erosivo del flujo de lodo en los bordes de la fractura, ello trae como consecuencia que se comporten como fracturas inducidas (ver Figura 2.1).

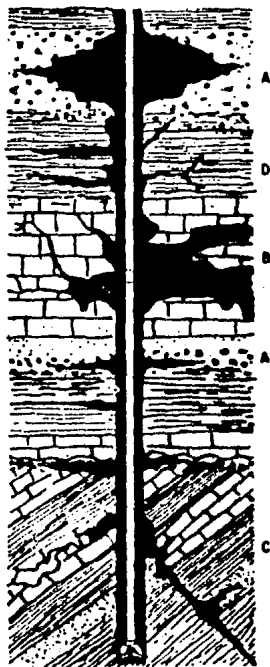


Fig. 2.1 TIPOS DE PERDIDA DE CIRCULACION: (A) Formación inconsolidada muy permeable; (B) Formaciones cavernosas; (C) Formaciones agrietadas, falladas y fisuradas (naturalmente); y (D) Formaciones agrietadas, falladas y fisuradas (inducidas).

2.2 Presiones de Bombeo

La rápida puesta en marcha de bombas para romper la circulación, cuando se está en el fondo del pozo después de un viaje, puede generar una sobrepresión. Parte de esta sobrepresión es causada por un exceso de la presión circulante, requerida para romper la estructura de gel del lodo de perforación.

Otra parte, es la presión requerida para acelerar la columna de lodo hasta la velocidad de circulación. El mantenimiento de bajas resistencias de gel y el comienzo lento del bombeo contribuirán a reducir esa sobrepresión que se requiere para iniciar la circulación.

Otra forma de reducir al mínimo la presión de ruptura, consiste en romper la circulación en diversas etapas del viaje dentro del pozo, particularmente si las resistencias de gel son de una naturaleza progresiva.

2.3 Densidad del Lodo

Los desprendimientos de lutitas que se integran al lodo, pueden también obturar el espacio anular y aumentar la densidad del lodo de manera notoria. Los lodos con alta pérdida de filtrado dan origen a la formación de un enjarre grueso que puede reducir el diámetro del pozo, o puede dar origen a pegaduras de tubería por presión diferencial. Este enjarre grueso reducirá o suprimirá el espacio anular. Un enjarre de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor, reducirá el calibre de un pozo de $8 \frac{1}{2}$ a $7 \frac{1}{2}$ pulgadas o de $6 \frac{1}{2}$ a $5 \frac{1}{2}$ pulgadas. Como consecuencia de esta reducción, se incrementará la fricción entre la tubería de perforación y el enjarre, reduciendo la capacidad de desalojo de los recortes hacia la superficie. Además, se incrementará la potencia de las bombas para poder compensar la reducción del espacio

anular, creando con esto presiones adicionales, como la presión de circulación, que traerá como consecuencia el incremento de presiones sobre la formación expuesta especialmente sobre el fondo del pozo.

El espacio anular reducido aumenta la densidad de circulación equivalente y con ello, la pérdida de filtrado debe ser reducida también.

Fuertes contrapresiones cuando el pozo se encuentra controlado por el preventor pueden inducir una presión de fractura sobre las formaciones expuestas. Para controlar un pozo, la presión en el fondo debe ser igual o mayor que la presión de la formación. En una perforación normal, la presión hidrostática del lodo es suficiente para el control, pero si existe surgencia o brote, la presión hidrostática del lodo será insuficiente para controlar esta presión, por lo que será necesario ajustar el peso del lodo.

La circulación a través de un preventor provee la presión adicional requerida para mantener el flujo invasor, la presión de estrangulación o de tubería de revestimiento debe de mantenerse por encima del mínimo para detener el flujo. Existe una presión máxima permisible basada en el gradiente de fractura de la formación, en la profundidad de la zapata de la tubería de revestimiento más profunda y en la densidad del lodo. Cuando esta presión se alcanza en el manómetro de la tubería de revestimiento, la formación se romperá.

Los ensayos realizados han demostrado que el esfuerzo cortante de lodo a lo largo de la tubería genera la parte más importante de la sobrepresión total, por lo tanto, cuanto más larga es la tubería, mayor es la sobrepresión ejercida sobre la formación. Esto implica que cuanto más profunda está la barrena, más lenta debe ser la penetración de la tubería en el pozo. También estas sobrepresiones o presiones impelentes

son aumentadas, considerablemente, por propiedades deficientes del lodo de perforación como son altas resistencias de gel, altas densidades y viscosidades. Es recomendable mantener las propiedades del lodo en los límites de la eficiencia y seguridad para minimizar los efectos de las sobrepresiones inducidas.

En las operaciones de perforación, es de enorme importancia el comportamiento de la presión hidrostática debida a la columna de lodo, porque ésta es la principal fuente de presión del pozo. Esta presión es requerida para mantener en su sitio los fluidos de la formación, además sirve para dar apoyo y sostén a las paredes del pozo. Una condición necesaria para evitar las pérdidas de circulación originadas por causas inducidas, es mantener la presión hidrostática igual a la presión de la formación, esto ejercerá un efecto positivo sobre la velocidad de penetración y evitará el aprisionamiento o pegadura de tubería por presión diferencial. Si esta condición no se cumple, la presión hidrostática puede aumentar lo suficiente y fracturar formaciones expuestas; esto puede dar como resultado un intento de brote y simultáneamente pérdida de circulación.

La acción normal del lodo circulante crea una presión en el pozo superior a la presión hidrostática. Esta presión es el resultado de pérdidas por fricción debidas a las propiedades del lodo y a la geometría del espacio a través del cual fluye. Esta pérdida de presión ocurre en el espacio anular y dado que el flujo es del fondo hacia la superficie, la presión debida a la fricción es mayor en el fondo que en la parte superior del pozo.

2.4 Manejo de la Sarta en el Agujero

Durante la perforación, existen operaciones que incrementan la

presión dentro del pozo, como cuando se retira la sarta de perforación, se produce un efecto de succión tanto por arrastre con fricción a lo largo de la tubería, como por el efecto de pistón de la barrena y los lastrabarreras. Este efecto de succión o pistoneo disminuye efectivamente la presión en el fondo del pozo y puede permitir la entrada de los fluidos de la formación. Dado que este efecto es agravado por altas densidades, viscosidades, gelatinosidades y por el reducido espacio anular; reiterando, las propiedades del lodo deben de mantenerse en un rango adecuado, esto reducirá los efectos de las sobrepresiones.

El movimiento de la sarta de perforación o herramienta dentro del pozo eleva la presión en el fondo. Cuanto más rápido es el movimiento, mayor es la sobrepresión. Muchos pozos que han mantenido el lodo con la sarta fuera del pozo, han experimentado luego pérdida de circulación al bajarla.

El movimiento de la tubería de perforación mientras se está circulando lodo causa sobrepresiones aún mayores. La rápida entrada de la tubería o la rectificación acelerada mientras se está circulando puede inducir fracturas, esos tipos de movimientos rápidos de la herramienta mientras se está circulando, se deben de evitar.

Todo lo que cierre o restrinja el espacio anular, genera aumentos de presión. El embolamiento de la barrena, los lastrabarreras y los estabilizadores o uniones, tienden a cerrar el espacio anular. En el caso de intenso embolamiento de la barrena, casi la totalidad de la presión de la bomba puede ejercerse sobre la formación expuesta. En áreas donde el embolamiento de la barrena es común, la extracción de varios tramos de tubería para verificar si existe arrastre indicara

esta situación. En el caso que la barrena quede aprisionada por causa de intenso embolamiento y reducido espacio anular, es a veces posible circular el lodo y separarlo de la barrena, esto es, separar el tramo atrapado del resto de la tubería. Esto se logra haciendo tensión en la tubería y simultáneamente detonar un explosivo frente a la junta de la tubería; ya separado el tramo atrapado se podrá iniciar la circulación y evitar así que el atrapamiento se convierta en la pérdida total del pozo. Por esta razón se debe evitar la práctica bastante difundida, de bajar la barrena repentinamente.

La combinación del espacio anular cerrado, más el movimiento de la tubería de perforación, puede provocar una sobrepresión superior al gradiente de fractura de la formación.

A medida que se colocan sargas de tubería de revestimiento adicionales, se reduce el espacio anular, entre la sarga de perforación y la tubería de revestimiento, así como el agujero descubierto. Esto también agrava la situación anteriormente descrita. En tuberías de revestimiento de diámetro interno reducido, los protectores de goma de la tubería de perforación, pueden causar restricciones al flujo.

Si hay un antecedente de pérdida de circulación en el área o si se encuentra una pequeña pérdida, el perforar sin protectores puede significar la prevención de la pérdida de circulación.

Cuando se está introduciendo tubería de revestimiento en el pozo, el espacio anular es mucho menor que con la tubería de perforación. Los raspadores y centradores que favorecen la cementación, acumulan enjarre y lutita dentro del espacio anular, lo cual contribuye también a cerrar éste. La bajada lenta de la tubería de revestimiento reducirá las sobrepresiones causadas por espacios reducidos. Después que la sarga de revestimiento ha sido colocada, es cementada en su lugar. Los cementos

son, en la mayoría de los casos, más pesados que el sistema de lodo. Si la formación no puede sostener la columna de cemento total, puede requerirse una cementación en múltiples etapas. Este procedimiento cementa sólo intervalos del pozo en cada etapa; de esa manera, las formaciones soportan solamente una porción del aumento de presión hidrostática.

En varios casos, las pérdidas de lodo en fracturas inducidas ocurren debido a que la tubería de revestimiento fue colocada en posición alta dejando expuesta una formación de baja presión, la cual se fracturará cuando la densidad del lodo se incremente, para controlar zonas más profundas de alta presión.

El intervalo donde existen cambios graduales de una zona de baja presión a una zona de alta presión, se le llama "zona de transición".

Si la tubería de revestimiento intermedia pudiera ser colocada dentro de esta zona de transición, muchas de las pérdidas de lodo por fracturas inducidas pudieran ser prevenidas.

La zona de transición puede establecerse directamente por:

1. Cambios en la velocidad de penetración.
2. Empacamientos del agujero.
3. Tendencias a pegarse la tubería.

2.4.1 Factores que generan sobrepresiones en el fondo del pozo

El conocimiento y estudio de los factores que generan sobrepresiones en el pozo, se considera como una de las herramientas más valiosas para solucionar y/o evitar, las pérdidas de circulación del lodo. Los principales factores involucrados en este fenómeno son los siguientes.

1. Inercia de la columna de lodo.
2. Levantamiento o abatimiento rápido de la T.P. y T.R.

3. Altas velocidades de penetración.
4. Altas densidades y viscosidades del lodo de perforación.
5. Alta gelatinosidad.
6. Deficiencia en el poder de suspensión de partículas sólidas.
7. Alto incremento de recortes de perforación en el pozo.
8. Alta presión de bombeo.
9. Movimientos de la tubería mientras se está circulando.
10. Movimientos de la tubería con el espacio anular cerrado.
11. Restricciones del espacio anular.
12. Alta presión de circulación debida a el aumento de la densidad de circulación equivalente.
13. Colocación de T.R. no programada (T.R. adicional).
14. Enjarre grueso del lodo de perforación.
15. Excesivo número de protectores en la tubería.
16. Altas columnas de lechada de cemento.
17. Ejecución de una cementación defectuosa (canalización).
18. Fuertes contrapresiones sobre formaciones expuestas, cuando el pozo está controlado por el preventor.

CAPITULO III MECANISMOS DE OBTURACION

Las zonas de pérdida pueden ser separadas ampliamente en áreas horizontales y verticales. Sin embargo, antes de discutir los mecanismos de obturación, podría ser útil, una revisión de la geometría del agujero en donde se manifiestan las zonas de contacto de pérdidas horizontales y verticales, durante la perforación del pozo.

Refiriéndose a la Figura 3.1, se puede observar que las zonas horizontales hacen contacto en círculo. La zona podría ser limitada en altura y la acción de los materiales para pérdida de circulación podrían quitar el enjarre en un plano horizontal o en la cara del agujero. Por otro lado, las zonas de pérdida verticales hacen contacto con el agujero en una línea y puede tener contactos verticales hasta de 500 pies de longitud. Los materiales para pérdida de circulación podrían fluir en un plano vertical sin formar enjarre, lo cual daría la posibilidad de que éstos tiendan a caer o de esta manera su acción sería una ampliación de la fractura, en lugar del sello de la misma.

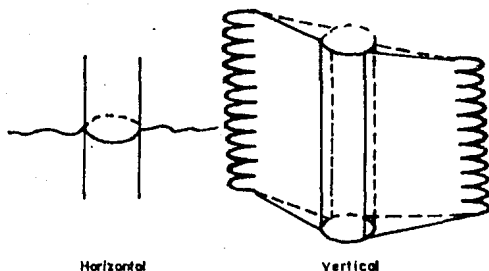


Fig. 3.1 Zonas de contacto.

3.1 Planos de Fractura Horizontal (Fracturas Naturales)

El problema de pérdidas de circulación en zonas horizontales se manifiestan predominantemente en cuerpos que estén conformados de arenas y gravas.

3.1.1 Arenas porosas y gravas

Los agentes puenteantes son efectivos para el obturamiento de las arenas porosas y gravas (Figura 3.2), pues son partículas más grandes que las contenidas en el lodo de perforación, estos agentes se acumulan en los intersticios de la grava, obstruyendo el flujo para que finalmente formen un enjarre sobre la cara de la grava. Para que el sello sea permanente es mejor que el enjarre penetre sustancialmente la grava hasta un cierto grado, con el fin de que no sea raspado por la barrena o removido por oleadas de presión desde la formación al agujero, debido a que éste es limpiado o por no mantenerlo lleno en el momento de un viaje. Los componentes fibrosos ayudan en esto por sujeción de los agentes granulares y laminares a la grava. La investigación de obturación en gravas con aserrín y fibras de cuero desmenuzadas han mostrado que las fibras de cuero obtuvieron un mejor comportamiento.



Fig. 3.2 Grava porosa obturada con materiales para pérdida de circulación.

Los agentes puenteantes son efectivos contra pérdidas de lodo en fracturas naturales de hasta un $\frac{1}{4}$ de pulgada de ancho, no obstante, la mezcla debe contener un agente granular con un tamaño de partícula aproximadamente al del ancho de la fractura. Para que la fractura sea sellada, el agente granular deberá formar un puente sobre la cara o preferiblemente fuera de la fractura (Figura 3.3). El sello es más permanente si el puente está fuera de la fractura y si ésta es empacada con materiales para pérdida de circulación y sólidos del lodo, por deshidratación o pérdida de todo el lodo. Existe poco riesgo de que la fractura pueda ser ampliada, a menos que la presión de sobrecarga de la formación sea retirada para lograr esto. Las fallas generalmente ocurren porque el sello en la cara es raspado o se abre un camino a través de éste en la formación.

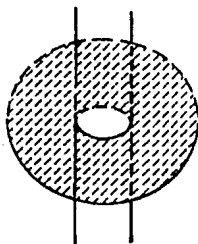


Fig. 3.3 Fractura horizontal natural obturada con materiales para pérdida de circulación.

Las fracturas horizontales naturales desde $\frac{1}{4}$ de pulgada a 1 pie de ancho pueden ser selladas usando lechadas de cemento, dado que éstas pueden ser mantenidas alrededor del pozo en contacto con el fondo y la cima de la fractura hasta que el cemento fragüe. Para lograr esto, con frecuencia se envían tapones suaves adelante de la lechada de cemento

para que actúen como un refuerzo y soporte de ésta en dicho lugar. Idealmente, la lechada de cemento debería formar un perfecto anillo concéntrico alrededor del pozo. El hecho es, sin embargo, que el tapón desarrolla una forma parecida a la ilustrada en la Figura 3.4. Hay que hacer notar que en la mayor parte de la circunferencia del sello, el tapón presenta una pequeña anchura. Esto hace que sea fácil de destruir el tapón, por un rompimiento o succionamiento del lodo de perforación o de los fluidos de formación a través de éste.

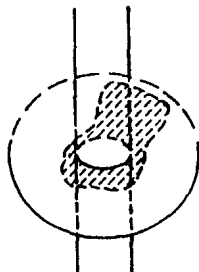


Fig. 3.4 Fractura natural amplia, sellada usando cemento.

Si los fluidos, usualmente agua, están fluyendo dentro de la fractura o desde una zona superior dentro de ésta, la lechada de cemento será lavada y retirada, sin que el sello sea obtenido. Lo anterior es indicado si la circulación es restaurada y el cemento es encontrado en el agujero cerca de la fractura. Cuando el tapón es perforado y la fractura es alcanzada, se vuelve a manifestar una completa pérdida total de circulación. Lo último es evidenciado si la lechada de cemento no es encontrada en todo el agujero, por lo que la circulación nunca será restablecida.

Los tapones suaves/duros y suaves son efectivos en fracturas

horizontales naturales desde $\frac{1}{4}$ de pulgada a 1 pie de ancho, debido a que éstos desarrollan un gel de alta resistencia. Este tipo de tapones presentan una mayor resistencia al flujo cuando son colocados y por lo tanto, son más apropiados para estar en contacto con el fondo y la cima de la fractura, así como para permanecer alrededor del agujero. Algunos tapones suaves reaccionan en presencia de agua. Estos pueden ser usados donde el agua esta fluyendo de las fracturas, reaccionando con la fórmula lodo (agua) + Diesel-Bentonita (DOB) o Diesel-Bentonita-2 Cemento (DOB2C) y parando así el agua que esta fluyendo. Para ello, se deberá estimar el volumen de agua que esta fluyendo para optimizar las cantidades de DOB y DOB2C que serán mezcladas con ésta. Si se realiza objetivamente, el agua será convertida en un cemento altamente gelado que fraguara.

Cuando el ancho de la fractura natural excede de 1 pie (2 pies es probablemente el máximo absoluto), lo más aconsejable es probablemente perforar a ciegas o con lodo aereado y un tubo auxiliar.

3.2 Planos de Fractura Vertical (Fracturas Inducidas)

Todas las fracturas verticales son inducidas. Una fractura vertical natural no absorberá lodo hasta que ésta sea abierta o ampliada, por tanto, viene a ser una fractura inducida. De este modo, una fractura vertical inducida no existe hasta que es motivada la fractura vertical natural. Esto es, se amplía y cierra de acuerdo a las presiones que son ejercidas en ella.

En un caso real, en Louisiana, se combatio en un pozo una fractura vertical inducida con dos baches de 2000 sacos de cemento Portland sin éxito. Después de cada aplicación, el pozo aún seguía vacío. Posteriormente, se aplicó un bache de 50 sacos de FormAPlug, una

fórmula de tapón suave mezclado en la superficie (actualmente, ya no es manufacturado). La colocación de este tapón se realizó con una presión de compresión de 1500 lb/pg², la cual fue sostenida, recuperando así la circulación del fluido. En este caso, es espectacular la diferencia de comportamiento entre lechada de cemento sin aditivos y la formulación de un tapón suave.

De 1976 a 1977, fue emprendido un estudio por el centro de investigación de la Mobil en Dallas para investigar la aplicación adecuada del aceite diesel, bentonita y cemento como materiales para pérdida de circulación. La base para el estudio fue que estos materiales son relativamente baratos y siempre se encuentran disponibles en la perforación. Aunque también estos materiales mostraron considerables promesas como materiales para pérdida de circulación. Se pensó que si estos materiales pudieran ser bien entendidos y aplicados en forma correcta, su desempeño podría ser inmensamente mejorado. Para alcanzar dichos objetivos, se diseñó y construyó un aparato para evaluar tapones suaves (Figura 3.5). Se logró formar la mezcla M+DOB2C que pudo ser colocado dentro de una fractura vertical inducida simulada, mediante compresión en el cabezal, en el laboratorio.

La fractura inducida simulada consistió de dos hojas de acrílico de 4 pies de diámetro, atravesadas por pernos tal como se muestra en la Figura 3.5, por los números del 1 al 12. Unos resortes fueron colocados en los pernos simulando así la presión de formación al comprimir los resortes. Se realizaron largas corridas en tiempo se tomó para que el M+DOB2C comprimiera completamente la columna interior de resortes o para que el tapón mas suave M+DOB2C, se derramara por fuera de los filos del acrílico.

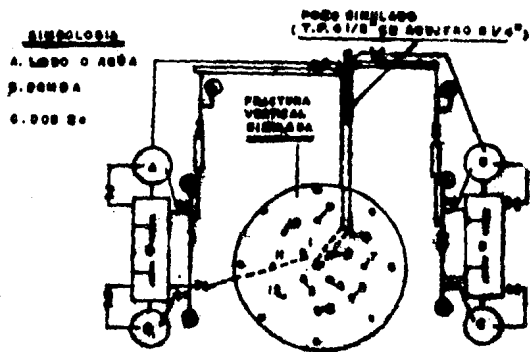


Fig. 3.5 Diagrama esquemático del aparato de tapón suave.

Para probar y comparar los tapones suaves, el aparato fue más simulado de lo requerido. Después de cada corrida, el aparato tuvo que ser desmantelado para que las muestras fueran tomadas para su análisis, y después este volvió a ser armado. El procedimiento fue laborioso y además consumía tiempo. Se encontró que la reproducibilidad de resultados fue tan buena, como la obtenida con un esfuerzo considerablemente menor si se mezcla la formulación de lodo y aceite-diesel-bentonita-dos cemento, en las porciones deseadas usando un batidor, vertiendo la mezcla en una mesa de laboratorio y amasándolos con una espátula.

De lo anterior se podría concluir que, el aparato para tapones suaves fue un gasto inútil. Sin embargo, esto no es concluyente ya que con la ayuda de éste se demostró, por vez primera en el laboratorio, la forma

y el mecanismo por el cual las fracturas verticales inducidas son obturadas.

Las lechadas de cemento Portland sin aditivos, aun cuando fraguan duro, no son efectivas contra fracturas verticales inducidas, mientras que los tapones suaves, también llamados plásticos o cementos suaves, tales como M+DOB, M+DOB2C, Bengum, tapón de polímero o Flo-Chek, son efectivos. La razón de esto es que la alta resistencia al gel de los tapones suaves causa que se resistan a fluir dentro de la fractura. Esto motiva que 1) separe la fractura, haciendo esto sucesivamente más difícil, y 2) previene la propagación de presión en fractura, desde el filo guía de ésta. Para hacer un sello permanente, se requieren más factores. Esto es, una vez que la fractura vertical inducida ha sido separada, ésta deberá ser sostenida mientras que los materiales de pérdida de circulación fraguan, se deshidratan o se pierde por completo el lodo. Una lechada de cemento Portland puro colocado en vacío, ni siquiera separa la fractura ni tampoco la mantendrá constante hasta que este cemento fragüe.

3.2.1 Obturación de fracturas verticales inducidas usando agentes puenteantes

Las fracturas verticales inducidas pueden ocurrir en cualquier tipo de formación pero más frecuentemente ocurren en lutitas y otras formaciones no porosas. Para obturar una fractura usando agentes puenteantes y hacerlo permanentemente, la fractura deberá ser permanentemente separada por empacamiento con los sólidos del lodo deshidratado y materiales puenteantes. Nótese que la deshidratación sólo puede ocurrir abajo de la fractura, debido a que ésta se encuentra en una formación no porosa. Varias técnicas recomiendan desarrollar y

mantener una ligera presión de compresión sobre el agente de obturación entre $1/2$ a 1 hora. Obviamente, el propósito de esto es de empujar con los materiales obturantes las fracturas abiertas y con ello limitándolas, haciendo que el sello sea permanente.

3.2.2 Obturación de fracturas verticales inducidas usando cemento Portland.

Anteriormente, se mencionó que las lechadas de cemento Portland puro no son efectivas para el sellado de fracturas verticales inducidas. Esto es absolutamente cierto si la lechada de cemento es colocada en vacío; dado que el agujero no se llena ni tampoco permite desarrollar una presión de compresión. De este modo para que la lechada de cemento sea efectiva, la fractura deberá ser abierta por medio de una presión de compresión, manteniéndola así mientras la lechada de cemento se deshidrata y después fragua. Hay dos circunstancias en donde es posible desarrollar la presión de compresión en una fractura vertical inducida, usando lechadas de cemento Portland. La más obvia es cuando la fractura está en una formación porosa (Figura 3.6). Esta permite que la lechada de cemento se deshidrate dentro de la formación porosa en donde los sólidos del cemento deshidratado la mantendrán abierta hasta que ésta fragüe.



Fig. 3.6 Lechada de cemento Portland contra fracturas verticales inducidas en una formación porosa.

La otra situación es en donde, aún cuando la formación no sea porosa, un puente puede ser formado en los límites de la fractura, lo cual inducirá a una deshidratación abajo de la fractura (Figura 3.7). En algunas formaciones dicho puente puede ser iniciado, adicionando agentes obturantes a la lechada de cemento, tales como arena de un tamaño de malla 10-20 (u otros agentes granulares de puenteo) a la lechada de cemento. La lechada de cemento podría entonces tener dos propiedades favorables: alta pérdida de filtrado (si se deshidrata completamente en dos minutos) y la capacidad de puenteo. De este modo, las operaciones de cementación a compresión son absolutamente necesarias para su éxito.



Fig. 3.7 Cemento Portland sin aditivos más agentes obturantes.

3.2.3 Obturación de fracturas verticales inducidas usando tapones suaves

Los tapones suaves son muy efectivos en el sellamiento de fracturas verticales. Las formulaciones M+DOB2C y M+DOB cuando se mezclan por primera vez, forman una masa altamente gelada que abre la fractura. Después el M+DOB2C desarrolla una resistencia compresiva (fraguado) que mantiene abierta la fractura, haciendo que el sello sea permanente (Fig. 3.8). Las probabilidades de falla de la formulación M+DOB2C son bajas cuando las condiciones de su colocación se tienen controladas.

Puesto que el M+DOB nunca fragua duro, éste se deforma para reacondicionar al sello en caso que la fractura se abra ligeramente. Además cuando se aplica cualquier tapón suave se desarrolla una presión de compresión, sellando la fractura más amplia y subsecuentemente, forzando el tapón suave hacia fracturas menos severas y pequeñas en tamaño. La mayoría de las lechadas de cemento Portland no muestran la cantidad de resistencia al gel que los tapones suaves desarrollan. Como un resultado de ello, la presión de compresión no se desarrolla, a menos que la lechada de cemento sea deshidratada de algún modo, como sucede con los agentes obturantes en el lodo o en la inyección de lechadas con alta pérdida de filtrado.

Estos mecanismos de obturación necesitan ser mantenidos de manera clara en la mente, cuando se está eligiendo la funcionalidad correcta del material para pérdida de circulación y de la técnica para una aplicación en particular.



Fig. 3.8 Sello M+DOB2C colocado dentro de una fractura vertical inducida.

CAPITULO IV

TECNICAS PREVENTIVAS Y CORRECTIVAS PARA SU CONTROL

4.1 Tecnicas de Control Preventivo

Fallas, grietas y fisuras ocurren en cualquier formación como resultado de los esfuerzos naturales de la tierra. Las zonas cavernosas generalmente están asociadas con formaciones de roca caliza o volcánicas. En las calizas, las cavernas son creadas por un flujo continuo de agua natural, la cual disuelve parte de la matriz de la roca, además de degradarla debido a la alta temperatura y contenido de cloruro de sodio. Cuando estas formaciones son penetradas, una rápida pérdida de lodo puede ser experimentada por la interconexión y capacidad de las cavernas. Cavernas similares se pueden formar por las características térmicas del magma o tipo de ceniza depositado en el ambiente volcánico. Estas formaciones son fácilmente predecibles por experiencias de perforación pasadas y probablemente, este tipo de pérdida pueda ser anticipada a una determinada profundidad.

Con frecuencia en la perforación, la presión del lodo excede la presión de formación. Una práctica aceptada es mantener la presión hidrostática de la columna de lodo tan grande como la presión de formación. Esto previene derrumbes y mantiene los fluidos en la formación para que no entren al pozo.

La pérdida de circulación puede ocurrir en la formación si esta presenta grandes aberturas. Si este fuera el caso, la pérdida de circulación puede ocurrir siempre que la formación es perforada. Evidencias actuales muestran que usualmente se tiene la pérdida en la vecindad de la última tubería de revestimiento del pozo. En la mayoría de los casos, la zona no toma lodo hasta que ésta es perforada, debido

a que la presión aplicada hacia la formación fracturará o extenderá las fracturas naturales que presente. Este proceso torna lugar cuando el lodo fluye a través de la formación erosionando y ensanchando la fractura. De este modo, al relevar la presión, la abertura puede no cerrarse completamente, permitiendo que la pérdida continúe. Pero si el total de la presión es mayor que la presión de fractura de la formación, esto motivará mecánicamente una fractura inducida. El manejo adecuado de las presiones hidrostáticas es el primer paso en la prevención de la pérdida de circulación para este tipo de formaciones.

4.1.1 Controlando presiones de fondo

Como se mencionó en el capítulo II, la presión hidrostática es la principal fuente de presión en un pozo. Dicha presión mantiene dentro de la formación a los fluidos contenidos en ellas y por otro lado, contribuye a soportar las paredes del pozo. La condición ideal es mantener un equilibrio entre la presión hidrostática y la presión de formación, lo cual presenta un efecto positivo en la velocidad de penetración y ayuda a evitar las pegaduras de la sarta de perforación por presión diferencial.

El circular lodo a través del pozo crea una presión superior a la presión hidrostática, debido a las pérdidas por fricción provocadas por las variaciones en las propiedades del lodo y de la geometría del espacio anular por el que fluye. Esta pérdida de presión ocurre en el espacio anular y dado que el flujo es desde el fondo a la superficie, la presión por fricción es más grande en el fondo que en la cima del pozo. La adición de estas caídas de presión a la presión hidrostática puede ser expresada matemáticamente a un peso equivalente de lodo. A esta expresión se le denomina Densidad de Circulación Equivalente

(DCE). La DCE es una medida de la presión total que el pozo experimenta en un punto específico, ésta se ve afectada por las propiedades reológicas del lodo tales como, la viscosidad plástica, el punto de cedencia y el gel; así como también por las restricciones del espacio anular y por los elevados gastos de bombeo.

Durante la operación de extraer la sarta de perforación, se presenta un efecto de succión provocado por las fuerzas de fricción en la longitud de la sarta, así como por el efecto de pistón de la barrena y los lastrarrenas. Esta succión o excitación hace que disminuya la presión en el fondo del pozo, motivando la entrada de fluidos de la formación hacia el mismo. Este fenómeno se agudiza cuando el lodo presenta altas resistencias al gel y un espacio anular reducido. (ver Figura 4.1)

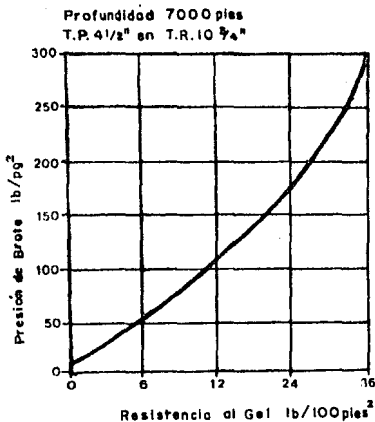


Fig. 4.1 Efecto de la resistencia al gel en la sobrepresión del pozo.

De este modo, una posible reducción del fenómeno se lleva a cabo empleando un lodo con bajos valores de viscosidad y de resistencia al gel.

También el movimiento de la tubería dentro del agujero eleva la presión en el fondo del pozo. En ciertos pozos, cuando la tubería está en la superficie y existe lodo dentro del agujero, se ha presentado la pérdida de circulación después de correr ésta dentro del pozo. La cantidad de tubería en el pozo también afecta la magnitud de la sobrepresión, se han realizado pruebas que muestran que el esfuerzo cortante a lo largo de la tubería genera una gran porción del total de la magnitud de la sobrepresión. Esto implica que, al introducir la tubería al agujero ésta debe ser corrida lentamente. La sobrepresión también es incrementada por una falta en el control de las propiedades del lodo, como lo son alta resistencia al gel y altas viscosidades. De esta forma baja resistencia al gel y baja viscosidad contribuyen a minimizar la sobrepresión en el pozo.

En la perforación de las capas superiores de la formación, el peso del lodo puede ser incrementado involuntariamente debido a una rápida perforación, lo cual ocasiona grandes espacios anulares y bajas velocidades de flujo del lodo. Relaciones de penetración altas pueden sobrecargar el espacio anular de cortes de perforación y con ello incrementar la presión hidrostática, que a su vez combinada con un bajo gradiente de fractura (típico de profundidades someras) puede causar la pérdida de circulación. Una manera de prevenir la sobrecarga del espacio anular, así como de evitar la presencia de pérdidas de circulación en profundidades someras, es manteniendo un control apropiado de la velocidad de penetración, de la viscosidad y de los altos gastos del flujo para sustentar el incremento de producción de

cortes.

Otra zona potencial de pérdida es el caso de arenas depresionadas, así como de las formaciones que producen en el mismo yacimiento o en la vecindad de éste, lo cual causa una presión de formación subnormal debido a la extracción de los fluidos de ésta. En tal caso, el peso del lodo requerido para soportar la presión de formación, puede ser en ese caso demasiado alto para la arena potencialmente productiva. En estas situaciones potencialmente peligrosas, deben seguirse una serie de procedimientos planeados previendo anticipadamente las condiciones de fondo del pozo.

También se ha mencionado que la presión de bombeo genera una sobrepresión en el fondo del pozo y con ello la presencia de una pérdida de circulación. De aquí que un buen manejo de la presión de bombeo o de circulación, también sea una medida a seguir para la prevención de la pérdida de circulación.

Cualquier cosa que obstruye o reduce el espacio anular puede causar un incremento de presión. Las obstrucciones pueden ser los lastrabarrenas, estabilizadores, juntas, o cualquier herramienta que tiende a reducir el espacio anular. Si éstas reducen demasiado el espacio anular, la presión aplicada podría ser proyectada en la formación, y de esta forma causar una fractura inducida que ocasionará una pérdida de circulación. Una combinación de reducción del espacio anular y el movimiento de la tubería puede hacer que la presión de brote vaya más allá de la presión de fractura. Desprendimiento de arcilla también puede obstruir el espacio anular e incrementar la densidad del lodo en forma notoria y causar algo semejante a lo dicho anteriormente. También la falta de control en la pérdida de fluido forma un grueso enjarre que reduce el diámetro anular del agujero y que

incrementa la DCE.

Al cementar una tubería de revestimiento, se reduce aún más el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la de perforación, agravando la situación. Los protectores colocados en la tubería de perforación pueden causar restricciones al flujo.

Cuando se está corriendo la tubería de revestimiento, los raspadores y contradores que benefician la cementación, recolectan o juntan enjarre y arcilla suelta que cierra el espacio anular. Si se emplea una baja velocidad para correr la tubería de revestimiento se provocarán menores sobrepresiones en estos espacios reducidos. Después de que la tubería de revestimiento es corrida se procede a cementarla en su lugar. En la mayoría de los casos la columna de carga hidrostática del cemento es más pesada que la del lodo. Si se estima que la formación no soporta el total de la columna de cemento, entonces se programa una cementación por etapas, la cual consiste en cementar porciones del agujero por etapas. De esta manera, se distribuyen las cargas hidrostáticas de la columna de cemento en diferentes secciones de la formación.

Se deben tener procedimientos de cementación apropiados para asegurar que el cemento tenga una buena adherencia y forme un buen sello, entre la tubería de revestimiento y la formación. La evaluación de la efectividad de la cementación después de que el cemento haya fraguado, previene futuros problemas. En el caso de una cementación defectuosa de la tubería de revestimiento superficial, no sólo podría ocurrir pérdida de circulación, también existe la posibilidad de un reventón alrededor de la tubería de revestimiento. Todas las posibles pruebas deben ser tomadas para asegurar el máximo de adhesión del cemento a la tubería de revestimiento y a la formación. Por otro lado, también hay que evitar

el ensanchamiento del agujero pues origina una mayor área de contacto, permitiendo que se mezclen lodo y cemento. La contaminación del cemento por lodo produce una mala adherencia de éste, además de una canalización que provoca zonas sin cementar. La canalización del cemento constituye un camino por donde se transmite la presión hacia la parte superior de la tubería de revestimiento. Por ende, el flujo del lodo, en todas las secciones del agujero, mientras se está perforando debe de mantenerse laminar para evitar los derrumbes.

Para controlar el pozo, la presión en el fondo debe ser igual o mayor que la presión de formación. En perforación normal, la presión hidrostática del lodo es suficiente para controlar el pozo, pero si se presenta un indicio de brote ésta resulta insuficiente.

El conocimiento del valor del gradiente de fractura, es importante en la determinación del valor máximo de presión para la tubería de revestimiento. Este valor puede ser estimado por muchas técnicas, pero debe ser obtenido por una prueba de admisión (leakoff) o por una prueba de integridad de presión. Esta prueba de presión verificará la efectividad del trabajo de cementación y de las formaciones expuestas. La prueba debe ser llevada a cabo 10 ó 20 pies debajo de la última zapata y repetida cuando la primera arena u otra zona débil sea penetrada.

4.1.2 Pretratamiento del lodo

El pretratamiento del sistema de lodo con materiales para pérdida de circulación debe de hacerse sólo cuando sea requerida para una zona particular. No sólo pretratar el lodo es caro, sino que además, esto puede inducir una fractura, pues dichos materiales agregados incrementan en el lodo su contenido de sólidos, su peso, viscosidad y

también, su densidad equivalente de circulación. Esto es más evidente con la adición de material grueso. Estos incrementos de viscosidad, DCE y peso del lodo, reducen además la velocidad de penetración.

4.1.3 Sumario de prevenciones

1. Reducir Presiones Mecánicas.

a. Mantener el mínimo peso de lodo para controlar las presiones del fondo del pozo. Esto permitirá una máxima velocidad de penetración y una mínima presión de circulación.

b. Mantener al mínimo la viscosidad y resistencia al gel. El valor mínimo requerido soportará el material pesado y los cortes y además reducirá la presión de circulación y de brote.

c. Mantener una presión de bombeo apropiada, que sea capaz de remover los cortes y de mantener buenas propiedades de flujo del lodo en el espacio anular. Esto reducirá la presión de circulación y evitara los derrumbes en el agujero.

d. Mantener la tubería en movimiento lento, especialmente mientras se está bombeando. La magnitud de presión de brote es dependiente de las propiedades del lodo, presión de bombeo, tamaño del agujero, profundidad y el número de protectores de la tubería de perforación. La tubería de revestimiento debe ser corrida lentamente por lo reducido del espacio anular.

e. Romper la circulación lentamente varias veces antes de alcanzar el fondo, esto rompe el gel gradualmente durante el viaje.

f. Realizar una prueba de verificación de fugas o de integridad de presión, después de perforar 10 o 20 pies por debajo de cada zapata. Esto prueba el desempeño del lodo y de las formaciones vecinas por el gradiente de fractura. La prueba debe ser corrida cada vez que se

penetra una zona débil o arena.

g. Durante procedimientos de control del pozo, mantener la presión en la tubería de revestimiento por debajo de la máxima calculada, basada en el peso del lodo, gradiente de fractura y profundidad de la formación más débil (usualmente la profundidad de la última zapata).

h. Tomar medidas correctivas contra el embolamiento de la barrena y desprendimiento de arcilla, ya que esto puede bloquear completamente el espacio anular e imponer la presión de bombeo sobre la formación.

2. Seleccionar zonas de la formación sensibles a la ocurrencia de pérdida de circulación.

a. Selección preliminar de puntos con probabilidad de pérdida, que deben venir de información obtenida de pozos cercanos.

b. Selección final de estos puntos, que deben venir de un intercambio de variables del pozo mientras se está perforando en una zona de transición.

3. Pretratar el lodo con materiales para pérdida de circulación.

a. Pretratar anticipadamente el lodo con materiales para pérdida de circulación sólo si se conoce la formación o si se determina un riesgo de fracturamiento inducido, mediante el cálculo del gradiente de fractura.

b. No pretratar para prevenir pérdida de circulación, si solo se piensa que existe una zona con probabilidades de pérdida y no se conoce lo suficiente como para afirmarlo.

4.2 Técnicas de Control Correctivo

No obstante aunque se tomen medidas preventivas, no existe una garantía de que no ocurra pérdida de circulación. Una vez que la pérdida de circulación se presenta, se deberán tomar medidas correctivas rápidamente para minimizar los efectos que ésta traiga como consecuencia.

4.2.1 Causas de la pérdida de circulación

Cuando una pérdida de circulación ocurre, es importante que las causas sean identificadas para que puedan ser implantadas las soluciones apropiadas. Las causas de la pérdida de circulación pueden ser agrupadas en tres categorías:

1. Perforación superficial- En la perforación superficial, las formaciones son generalmente débiles y el diámetro del agujero grande. Los sólidos de perforación en el agujero pueden aumentar la presión hidrostática, generando relativamente alta presión de fondo que puede romper la formación.

2. Perforación rápida- Alta densidad de circulación equivalente puede causar presiones que pueden exceder el esfuerzo de cierre. Altas relaciones de penetración pueden cargar el espacio anular con sólidos de perforación, creando problemas de reología e hidráulica.

3. Presión anormal- En perforación a través de zonas de alta presión, el peso del lodo es normalmente incrementado para propósitos de control del pozo, pero la pérdida de circulación puede resultar si una zona de baja presión o presión normal es encontrada.

Las primeras dos categorías constituyen problemas inducidos en la perforación, relacionados con la capacidad de acarreo del lodo (limpieza de cortes del agujero) y la densidad de circulación

equivalente. La última categoría es problema de formación.

Las tres categorías representan separadamente causas de pérdida de circulación, las cuales pueden ser interrelacionadas y así evaluar las causas primarias o problemas específicos. Por ejemplo, las categorías 1 y 2 pueden agravar y aumentar la categoría 3; y recíprocamente la categoría 3, puede conducir a problemas similares a las categorías 1 y 2.

4.2.2 Análisis del problema

Con el objeto de mejorar la aplicación de las técnicas correctivas, la zona de pérdida debe ser evaluada en términos de ubicación, tipo y severidad. Una vez que esto está perfectamente hecho, la técnica para solucionar la pérdida de circulación debe ser ajustada en funcionalidad y rapidez, con respecto a la severidad de la zona de pérdida.

La Tabla 4.1 ilustra las características típicas para identificar la mayoría de las zonas de pérdida de circulación. Si una nueva formación ha sido penetrada, esto puede ser apropiado para que la pérdida sea cerca del fondo. Aún cuando la mayoría de las zonas de pérdida son reportadas, con la excepción del primer punto donde ocurrió la pérdida, usualmente la ubicación de dichas zonas no están a la profundidad de la barrena. Nueve de diez veces, éstas se repiten en el punto de la primer pérdida, en donde la zona fue sellada, pero reabierta a medida que se procedía la perforación. Usualmente, el punto de la primer pérdida ocurre dentro de los 200 o 300 pies de la última zapata de la tubería de revestimiento. Sin embargo, a medida que se profundiza con la barrena, una repetición sucesiva de la primer pérdida será registrada como un nuevo horizonte de pérdida. Esto da como resultado un registro de muchas zonas de pérdida en la barrena, que están arriba del punto de

la primera. Si la pérdida no es encontrada en el punto donde se presentó por primera vez o dentro de los 200 a 300 pies de la última zapata de la tubería de revestimiento, entonces ésta debe ser encontrada mediante un registro de temperatura o de rayos gamma y material radioactivo. Una evidencia de la ubicación de esta zona, también puede ser obtenida a partir de cómo se desempeñaron los materiales de pérdida de circulación y donde fueron encontrados en el agujero. En realidad, los materiales para pérdida de circulación primeramente aplicados pueden ser elegidos hasta un cierto grado, de modo que puedan revelar en dónde está la zona de pérdida y si existe alguna complicación. Por ejemplo, la lechada de cemento aclarará el conocimiento sobre dónde está la zona y qué tan severa es, dependiendo de si está arriba o abajo del agujero, si permaneció ahí o desapareció.

Tabla 4.1

CARACTERISTICAS DE LAS ZONAS DE PERDIDA DE CIRCULACION
(Después de Howard y Scott)

Formaciones Inconsolidadas:

1. - Disminución gradual del nivel de lodo en las presas.
2. - La pérdida puede ser total si la perforación continúa.

Fracturas Naturales:

1. - Pueden ocurrir en cualquier tipo de roca.
2. - La pérdida se hace evidente por una disminución gradual en las presas de lodo. Si la perforación se continúa y más fracturas son expuestas, puede ser experimentada una pérdida total.

Fracturas Inducidas:

1. - Puede ocurrir en cualquier tipo de roca, pero debe ser esperada en formaciones con características de planos débiles.
2. - La pérdida usualmente es repentina y acompañada por una pérdida completa de retorno de lodo. Se tienen las condiciones que son convenientes para formar o inducir fracturas cuando el peso del lodo excede 10.5 lb/gal.
3. - La pérdida puede ser seguida por una repentina oleada de presión.
4. - Cuando ocurre la pérdida de circulación y los pozos adyacentes no tienen experiencia en pérdida de circulación, fracturas inducidas deben ser sospechadas.
5. - Puede ser en formaciones competentes o incompetentes.

Zonas Cavernosas:

1. - Normalmente confinadas en rocas calizas y volcánicas.
2. - La pérdida de retorno puede ser repentina y total.
3. - La barrena puede descender desde unas pocas pulgadas hasta varios pies justo antes de la pérdida.

El tipo de zona de pérdida (y algún indicio de su localización) es mejor determinado a partir de la litología, recordando que las zonas de pérdida son horizontales a profundidades de 2500 a 4000 pies y verticales abajo de estas profundidades.

La severidad es determinada por el volumen perdido (comparado con el tiempo involucrado) y la altura de columna estática de lodo.

Las zonas de pérdida pueden ser clasificadas como: (a) pérdidas por filtración, (b) pérdidas parciales, (c) pérdidas totales (agujero lleno con nivel de fluido de 200 a 500 pies), (d) pérdida parcial o total con fracturas verticales inducidas profundas, (e) pérdidas totales (nivel de fluido de 500 a 1000 pies con evidencia de largas secciones como panal y cavernas), y (f) pérdidas totales durante reventones en el fondo.

Las zonas potenciales de pérdida han sido colocadas primeramente dentro de dos amplias clasificaciones: horizontales y verticales. En general, las zonas de pérdida horizontales son arriba de los 2500 a 4000 pies y son verticales abajo de estas profundidades. Los tipos de zonas de pérdida horizontal son arenas porosas, gravas, fracturas naturales grandes y pequeñas, y las cavernas. Los tipos de zonas verticales son fracturas inducidas (fracturas verticales naturales que deben abrirse para aceptar lodo y de este modo son inducidas) y reventones en el fondo que causan fracturas verticales inducidas.

Las pérdidas por filtrado pueden ocurrir en cualquier tipo de zona de pérdida y en cualquier tipo de formación, cuando los agentes para pérdida de circulación en el lodo no son lo suficiente finos para completar el sello. Las pérdidas parciales se presentan en gravas, fracturas horizontales naturales pequeñas y en fracturas verticales inducidas escasamente abiertas. Las pérdidas totales ocurren a lo largo

de secciones abiertas de grava, intervalos largos de pequeñas fracturas horizontales naturales, grandes fracturas horizontales naturales y fracturas verticales inducidas parcialmente abiertas. Las pérdidas totales severas ocurren en grandes fracturas horizontales naturales abiertas, en cavernas y en fracturas muy abiertas del tipo vertical inducida.

4.2.3 Ajustando la solución en función de la severidad de la zona

Una correlación de la técnica para combatir la pérdida de circulación que tenga éxito más económicamente con el tipo y gravedad de las zonas de pérdida es mostrada en la Tabla 4.2. Este procedimiento de control de la pérdida de circulación ha sido para estimar la gravedad de la zona de pérdida y después, ajustar la técnica y el material en términos tanto de tamaño como operabilidad.

Tabla 4.2

TECNICAS COMUNES DE SOLUCION EN RELACION A LA SEVERIDAD DE LA PERDIDA

TIPO DE PERDIDA	TECNICA DE SOLUCION
Pérdida por filtrado	Levantar la tubería y esperar de 4 a 8 horas. Inyectar con lodo o con lechada de alta pérdida de filtrado y material obturante fino (mica, cáscara de nuez o de almendra, hojuelas de celofán, fibras o cuero molido).
Pérdida parcial	Levantar la tubería y esperar de 4 a 8 horas. Inyectar con lodo o con lechada de alta pérdida de filtrado y material obturante granular de tamaño regular (aserrín, cáscara de nuez molida o de almendra), hojuelas de celofán y fibras.
Pérdida total (agujero lleno con nivel de fluido de 200 a 500 pies)	Inyectar con lodo o lechada de alta pérdida de filtrado y material obturante granular (de 1/4 pg a 1/2 pg de tamaño) hojuelas de celofán grandes y fibras. Usar cemento bentonita o gilsonita sin aditivos.

Tabla 4.2 (continuación)

Pérdida parcial o total a fracturas inducidas profundas	Levantar la tubería y esperar de 4 a 8 horas. Aplicar un tapón suave.
Pérdida total severa (nivel de lodo de 500 a 1000 pies intervalos de pérdida en forma de panal, fracturas o cavernas. Agua moviéndose dentro de la zona de pérdida)	Inyectar con lechada de alta pérdida de filtrado y material para pérdida de circulación granular (de 1/4 a 1/2 pg de tamaño), hojuelas de celofán grandes y fibras o grandes cantidades de lechada de cemento diesel-bentonita (DOB). Usar perforación ciega o con fluido aerado.
Pérdidas totales durante reventones en el fondo	Controlar con un tapón de barita, reparar la zona de pérdida mezclando en el fondo del pozo un tapón suave/duro o colocar tubería corrida.

Los datos desarrollados por Howard y Scott en la Figura 4.2, muestran el efecto de la concentración de materiales para pérdida de circulación cuando sellan fracturas. Para concentraciones de hasta 24 lb/bl, el tamaño de la fractura sellada aumenta utilizando agentes de puenteo, pero a 20 lb/bl, la curva del tamaño de la fractura contra la concentración del material viene a ser asintótica con la línea de tamaño de la fractura sellada. Esto muestra que la mayor fractura sellada también depende de la partícula más grande en el agente obturante. Un material fibroso típico como el aserrín de $\frac{1}{4}$ de pulgada debe sellar una fractura de 0.11 pg; y un material granular típico como la cascara de nuez de $\frac{3}{16}$ pg debe sellar una fractura de 0.2 pg. Los datos en la Tabla 4.3 ayudan a demostrar la relación entre el tamaño de las partículas que el agente puenteante contiene y el tamaño de la fractura que deberá sellar.

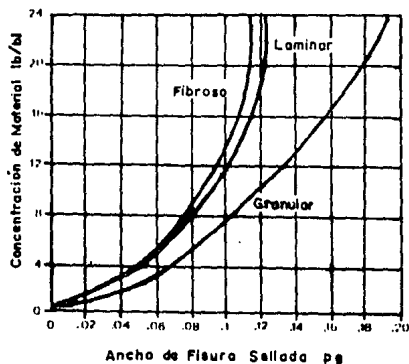


Fig 4.2 Comportamiento de los materiales para pérdida de circulación en el sellado de fisuras (Después de Bugbee).

Tabla 4.3
SUMARIO DE EVALUACION DE MATERIALES

MATERIAL	TIPO	DESCRIPCION	CONCENTRACION lb/bd	ANCHO DE FRACTURA SELLADA pg					
				0	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
Cáscara de nuez	Granular	50M malla 3/16+10 50M malla 10+100	20						
Plástico	"	"	20						
Caliza	"	"	40						
Sulfuro	"	"	120						
Cáscara de nuez	"	50M malla 10+16 50M malla 10+100	20						
Perlita expandida	"	50M malla 3/16+10 50M malla 10+100	60						
Celofán	Laminar	láminas de 3/4 pg	8						
Aserrín	Fibroso	partículas de 1/4 pg	10						
Paja	"	fibras de 1/2 pg	10						
Ladrillo	"	fibras de 3/8 pg	10						
Cáscara de semilla de algodón	Granular	fino	10						
Paja	Fibroso	partículas de 3/8 pg	12						
Celofán	Laminar	láminas de 1/2 pg	8						
Madera desmenuzada	Fibroso	fibras de 1/4 pg	8						
Aserrín	"	partículas de 1/16 pg	20						

Con esto se puede concluir que tanto el tamaño del agente puenteante como su concentración en el lodo determinan el tamaño de fractura que éste sellará. De lo anterior, el tamaño es lo más importante. Para que el agente puenteante sea efectivo en el sellado de la zona de pérdida, éste debe contener algunas partículas que sean aproximadamente del ancho de la zona de pérdida. El tamaño del agente puenteante debe ser proporcionado según la severidad (ancho) de la zona de pérdida.

El tamaño del obturante debe ser ajustado de acuerdo a la severidad de la zona de pérdida. Se tienen pequeñas ventajas si la concentración de materiales para pérdida de circulación excede de 15 a 20 lb/bl, en el sistema del lodo o de la lechada con alta pérdida de filtrado (Figura 4.2). La utilización de altas concentraciones puede ocasionar problemas de bombeo y propiedades deficientes en el lodo. Es muy importante incrementar el tamaño y la cantidad del agente granular, si los materiales comunes clasificados a un tamaño convencional no son efectivos. Ahora bien, si van a ser aplicados obturantes en un bache de lodo, las concentraciones que pueden ser más efectivas son arriba de 30 a 40 lb/bl.

Los agentes obturantes pueden ser agregados de manera segura a lodos base-aceite y base-agua, aunque los obturantes son más efectivos en lodos base-agua porque la pérdida por filtrado es muy alta, lo cual permite una mayor deshidratación y una mejor ampliación y empacamiento de la zona. Otra razón de que los obturantes tengan un uso limitado en lodos base-aceite, es que normalmente éstos no son usados a profundidades someras, en donde las zonas de pérdida son horizontales. Los obturantes pueden ser mejor transportados en espaciadores base aceite, los cuales usualmente son preparados sin agentes para el control de pérdida por filtrado con el fin de que se tenga una alta

pérdida de este tipo. Esto aún no ha sido probado en el campo.

Las pérdidas de lodo varían en severidad, desde filtrados hasta pérdidas totales dentro de fracturas naturales e inducidas de $\frac{1}{8}$ pg a $\frac{1}{4}$ pg. Para que el agente funcione, se debe tener una estimación aproximada del tamaño de la abertura que va a ser obturada. De acuerdo con esto, se debe usar contra pérdidas por filtrado el material granular fino (cáscara de nuez y micas), fibras finas (cuero, nylon, caña, lino, alfombra, asbestos) y láminas de celofán de $\frac{1}{2}$ pg a 1 pg.

Para solucionar pérdidas totales de circulación se debe emplear material granular grueso (cáscara de nuez o pecan de $\frac{1}{4}$ pg o $\frac{1}{2}$ pg), fibras gruesas (madera dura desmenuzada o cedro), fibras medianas (pino desmenuzado o caña de azúcar), fibras finas (cuero, lino, nylon o asbestos) y láminas gruesas (láminas de celofán de 1 pg). Se ha observado que cuando la severidad de la zona de pérdida se incrementa, solamente el tamaño del obturante aumenta y no la concentración.

Hoy en día con los agentes obturantes disponibles, éstos pueden ser aplicados a través de la bomba de lodos, pudiendo ser obturadas fracturas naturales e inducidas arriba de $\frac{1}{4}$ pg de ancho. Se tiene reportado un caso en donde se emplearon exitosamente botellas de cerveza directamente al agujero como agentes obturantes para solucionar zonas de pérdida severas. La mayoría de los objetos huecos y rígidos, llenados con fluido de perforación o un fluido más ligero, serían lo suficientemente resistentes aún cuando tuvieran una densidad cercana al lodo, que permitiera transportarlos en éste, de modo intacto hasta las restricciones de la zona de pérdida.

Cuando el ancho de la fractura natural o caverna exceda este tamaño, deben ser usadas las técnicas de cemento o taponos suaves. Si se aplica correctamente el cemento, ya endurecido debe obturar fracturas

horizontales naturales y cavernas con aberturas de $\frac{1}{4}$ pg a 1 pie de ancho. Las fracturas de 2 pies de ancho son absolutamente el límite superior. Cavernas más grandes que éstas deben ser perforadas a ciegas o con fluido aireado y con tubería auxiliar.

Lechadas de cemento que fraguan duro y que tienen baja resistencia al gel no son efectivas en fracturas naturales e inducidas. Los tapones suaves que si son efectivos son los llamados plásticos y cementos suaves como el M+DOB2C, Pal-mix 110R, M+DOB, Bengum, tapón de polímero, OM+WOB y Flochek. Esta función la desarrollan debido a que el gel de alta resistencia del cemento plástico causa, que éste se resista a fluir dentro de la fractura, abriendo ésta y haciendo que sea más difícil de ampliarla. También evitan que la propagación de la presión se extienda desde los límites de la fractura.

4.2.4 Técnicas para restablecer la circulación

No obstante que muchos métodos y técnicas para restablecer la circulación han sido descritas en la literatura, existen tres clasificaciones básicas, estas son:

1. Levantar y esperar.
2. Técnicas de inyección forzada.
3. Técnicas de cementación.

4.2.4.1 Levantar y esperar

En caso de filtrado o pérdidas parciales, la técnica de levantar y esperar es común. Como el nombre lo dice a la primera indicación de pérdida, la circulación es parada y la barrena es subida a un punto seguro en el agujero (usualmente dentro de la T.R.). Se debe tener cuidado cuando la tubería se este moviendo a través del agujero, esto

es para minimizar las sobrepresiones que podrían romper la formación. El agujero es dejado que permanezca estático de 4 a 8 horas.

Durante el tiempo de espera es común mezclar el material para pérdida de circulación "píldoras" en el lodo (50 a 100 bl). Para sellar eficientemente la superficie de una formación permeable, un fluido de obturación requiere el tamaño y la concentración adecuada de partículas formadoras de puente, ya que el tamaño de los poros varía considerablemente en el pozo. El diseño del obturante requiere una distribución de partículas que abarque una gran amplitud de permeabilidades de la formación, al material de pérdida de circulación que tiene las características anteriores se le llama obturante píldora. Este tipo de píldoras generalmente se fabrica en granos de tamaño fino a medio y mezclado en el lodo, la concentración de éste raramente excede de 15 lb/bl si es bombeado a través de las toberas de la barrena. Usualmente, cualquier material para pérdida de circulación, que se tenga a la mano, es usado en estas píldoras y su concentración, generalmente es decidida por el operador. Si la circulación no puede ser restablecida en el agujero después de esperar, estas píldoras deben ser bombeadas lentamente dentro del agujero (1 bl/min), cerca de donde esta la zona problema. Otro periodo de espera es deseable mientras un segundo bache con píldoras es elaborado, usualmente más grande que el primero. Si la circulación no es restablecida después de que el segundo bache con píldoras es colocado, una técnica de compresión o cementación debe ser considerada.

Si la circulación es restaurada usando agentes puenteantes, una presión de compresión pequeña de 50 a 75 lb/pg² con preventores cerrados por cerca de 30 minutos debe ayudar a levantar el tapón. Una vez que la circulación es recuperada, los materiales de pérdida de

circulación deben ser retirados fuera tan pronto como sea posible.

4.2.4.1 Técnicas de inyección forzada

Una vez que la zona conflictiva ha sido localizada, una de diversas técnicas compresivas puede ser intentada para sellar ésta. Todas las técnicas tienen una aplicación, la principal diferencia está en el tamaño y tipo de material para pérdida de circulación que va a ser usado, lo cual depende de la severidad de la pérdida. Una vez que los materiales han sido seleccionados, la tubería (preferiblemente franca) debe ser colocada cerca de la zona conflictiva y la lechada bombeada hasta el final de la sarta (a través de la zona). Los preventores son entonces cerrados y la lechada inyectada a presión dentro de la zona con bombeo lento. En algunos casos, todo el lodo también es bombeado simultáneamente para que se mezcle con las píldoras para contribuir a un incremento en su viscosidad.

Los éxitos de estas técnicas varían, pero casi siempre son necesarios repetidos intentos antes de que la formación pueda resistir altas densidades de lodo. Si la zona fue lo suficientemente débil para fracturarse en un punto, entonces presiones iguales o mayores que la presión original de fracturamiento causarán que zonas adyacentes también se rompan.

Para evitar fracturar otras zonas, la siguiente tabla es una buena regla de manejo para presiones de inyección en exceso a la presión hidrostática en el espacio anular.

0 a 1000 pies	0 a 200 lb/pg ²
1000 a 5000 pies	100 a 500 lb/pg ²
5000 a más pies	500 lb/pg ² .

Para altas pérdidas de fluido, la inyección de material de sellado es la técnica de compresión más fácil y económica de aplicar. Esto implica el bombeo de píldoras de obturante en lodo viscoso y densamente cargado de material sellante a la zona, cerrando el pozo, e inyectando lentamente la mezcla dentro de la zona. Tan pronto como una presión adecuada es levantada, el bombeo es parado y sostenida la presión por algunas horas. Este método tiene gran aplicación cuando las pérdidas no son severas y no son esperados grandes incrementos en la densidad del lodo.

Una segunda técnica usa un sellante que es una mezcla de aceite diesel y bentonita, la mezcla (50 bl por 300 lb/bl de arcilla Imco Gel por barril de diesel) es colocada frente a la zona conflictiva e inyectada con 50 bl de diesel como espaciador, en frente y atrás de la lechada. Simultáneamente, el lodo debe ser bombeado por el espacio anular para obtener una mezcla viscosa que contribuya al sellamiento de la zona conflictiva. Una presión de inyección de 100 a 300 lb/pg² debe ser aplicada mientras se coloca la lechada. Una lechada similar, diseñada para uso en sistemas invertidos o base aceite, es la bentonita organofílica y la compresión de agua. La única diferencia es el uso de una arcilla especial hidratable sólo en presencia de un ambiente aceitoso en vez de una arcilla común.

La siguiente mezcla puede ser aplicada en la misma manera en que se aplica para fluidos base-agua.

A 100 bl de lodo de densidad media agregar:

12 sacos de sosa caústica

20 sacos de cal

40 sacos de Diesel M

4000 lb de material para pérdida de circulación.

Otra mezcla que puede ser aplicada de esta forma es el Bengum que es un sellante que forma un tapón suave. Bengum es una goma natural y es empaquetado en una combinación premezclada de un 10% Bengum y 90% bentonita (por peso). Una lechada con Bengum es preparada añadiendo 100 lb de la mezcla por cada 15 gal de aceite diesel. Este fragua más duro que la lechada de aceite diesel y bentonita, particularmente, cuando es mezclada en aguas salinas y lodos. Este es un buen método cuando la fractura natural o caverna excede $\frac{1}{4}$ pg de ancho.

En todas las técnicas compresivas, inmediatamente la presión es mantenida, la presión debe ser sostenida de 8 a 12 horas para asegurar un buen fraguado.

4.2.4.3 Técnicas de cementación

Cuando la pérdida ocurre en la base de la T.R., indica una pobre cementación, el mejor remedio es comprimir con cemento. Este también es uno de las mejores alternativas cuando el ancho de la fractura natural o caverna excede $\frac{1}{4}$ de pg en ancho.

En el asiento de la T.R., el cemento usualmente es usado para combatir el problema de una pobre cementación. Cementaciones forzadas también han sido usadas donde las pérdidas están cercanas del asiento de la T.R. así que el cemento puede ser desplazado fácilmente del empacador al punto de la pérdida.

Cementos que fragúan duro no son efectivos contra fracturas inducidas. Mezclando el cemento con aceite diesel y bentonita o con gilsonita u otro material para pérdida de circulación, es de gran ayuda en esta situación.

En casos de pérdidas severas y totales, la perforación en todo lo posible debe de continuar sin retorno a través de la zona conflictiva.

Después de que ésta ha sido totalmente perforada, sacar la tubería fuera del agujero e instalar a 2 pies un dispositivo de mezcla en el fondo (mixing sub) igual al diámetro de la tubería de perforación y obturar hasta abajo. Localizar la zona de pérdida y colocar el final del sub aproximadamente 50 pies arriba de ésta. Mientras esto se hace, 50 bl de lechada de cemento gel es mezclado de la siguiente manera:

100 sacos de cemento
100 sacos de Imco Gel
50 bl de aceite diesel.

Esta mezcla producirá aproximadamente 1.39 bl de lechada por 1 bl de diesel y pesará 11.5 lb/gal.

Después de que la lechada ha sido mezclada, se desplaza por la tubería de perforación con un colchón de 25 bl de diesel adelante de la lechada y un colchón de 10 bl de diesel atrás de ésta. Cuando los 25 bl espaciadores llegan al sub, se cierran los preventores y se bombea a 4 bl/min. Desplazar la mitad del volumen de la pildora obturante dentro de la formación a esta velocidad de bombeo. Reducir el gasto de bombeo a la mitad y desplazar dentro de la formación el siguiente cuarto del volumen que sobra. Otra vez reducir el gasto de bombeo a la mitad y bombear el volumen sobrante dentro de la formación. Cuando esto se termina, sacar la tubería del agujero y dejar que el cemento fragüe por lo menos 12 horas antes de seguir perforando.

4.2.5 Control de las pérdidas parciales de circulación en zonas permeables

Las pérdidas parciales de circulación encontradas en las zonas permeables tales como gravas y arenas, se controlan disminuyendo la

densidad del lodo y agregando al mismo material obturante de tamaño medio y fino, como es la mica en hojuelas, la cáscara de nuez, el celofán y la borra de algodón. Cuando la pérdida en esta zona no se controla con material obturante, se recurre a impermeabilizar las paredes del pozo con una película formada por silicato de sodio y cloruro de calcio.

Este método ha dado resultados cuando la pérdida no es grande y la formación no está demasiado caliente (200°C).

Rotando la sarta de perforación en el fondo del pozo, se bombea una cantidad relativamente grande de agua (15000 l), con el fin de eliminar el enjarro, inmediatamente después del agua se bombea una solución de silicato de sodio (1500 l), seguido de un colchón espaciador de agua (1000 l) y seguida a su vez de una solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl_2). El silicato de sodio al estar en contacto con la pared del pozo libre de enjarro, se pierde hacia la formación permeable, lo mismo sucede con el cloruro de calcio, que al reaccionar con el silicato de sodio dentro de los poros de la formación, forman una película impermeable, sellando automáticamente la zona de pérdida.

4.0.5 Control de las pérdidas totales de circulación en formaciones naturalmente fracturadas o cavernosas

Cuando la pérdida de circulación es total, y se presenta en este tipo de formaciones, los métodos anteriores de control no proporcionan ninguna ayuda, este tipo de pérdida de circulación normalmente se presenta al iniciar o perforar la formación productora y se agota a estar perforando la misma.

densidad del lodo y agregando al mismo material obturante de tamaño medio y fino, como es la mica en hojuelas, la cáscara de nuez, el celofán y la borra de algodón. Cuando la pérdida en esta zona no se controla con material obturante, se recurre a impermeabilizar las paredes del pozo con una película formada por silicato de sodio y cloruro de calcio.

Este método ha dado resultados cuando la pérdida no es grande y la formación no está demasiado caliente (200°C).

Rotando la sarta de perforación en el fondo del pozo, se bombea una cantidad relativamente grande de agua (15000 l), con el fin de eliminar el enjarre, inmediatamente después del agua se bombea una solución de silicato de sodio (1500 l), seguido de un colchón espaciador de agua (1000 l) y seguida a su vez de una solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl). El silicato de sodio al estar en contacto con la pared del pozo libre de enjarre, se pierde hacia la formación permeable, lo mismo sucede con el cloruro de calcio, que al reaccionar con el silicato de sodio dentro de los poros de la formación, forman una película impermeable, sellando automáticamente la zona de pérdida.

4.2.6 Control de las pérdidas totales de circulación en formaciones naturalmente fracturadas o cavernosas

Cuando la pérdida de circulación es total, y se presenta en este tipo de formaciones, los métodos anteriores de control no proporcionan ninguna ayuda, este tipo de pérdida de circulación normalmente se presenta al iniciar o perforar la formación productora y se agrava a estar perforando la misma.

Los métodos más comunes para atacar este problema son:

1. Efectuar una cementación forzada para tratar de obturar con cemento la fractura y poder continuar perforando.
2. Perforar a "fondo perdido" o "perforación ciega".

4.2.6.1 Cementación forzada

La cementación forzada para obturar las fracturas con cemento da buenos resultados cuando la pérdida de circulación realmente se debe a fracturas naturales, ya que cuando existen cavernas es casi imposible restablecer la circulación. El método más usado debido a los buenos resultados obtenidos en varios casos de pérdida por fractura, es colocar un tapón de cemento enfrente de la zona problema y posteriormente inyectarlo a presión a la formación.

Un ejemplo donde este método fue aplicado con éxito es el pozo T-402, localizado al oeste del campo en la sección denominada Cerro Prieto I.

4.2.6.2 Perforación ciega

Quando es imposible restablecer la circulación de lodo a la superficie y se continúa perforando sin retorno de fluido, se dice que se perfora a fondo perdido. Esta práctica es común en Cerro Prieto, en la zona productora cuando ya se ha atravesado y aislado las zonas problema de no consolidados, ya que es riesgoso perforar a fondo perdido cuando existen lutitas deleznales o hidratables.

Debido a que el lodo no retorna a la superficie, es necesario colocar arriba de la barrena una canasta chatarra para recuperar muestras de la formación perforada, incrementando el costo por metro de la perforación debido a los viajes. El lodo en las presas se agota rápidamente haciendo necesario la suspensión de las operaciones para preparar más

fluido y continuar perforando. Lo anterior, ha llevado a la necesidad de perforar con agua en algunos casos extremos como fue la perforación en la zona productora en el pozo M-200, donde las pérdidas de fluido alcanzaron un volumen de 12 000 000 litros.

En el pozo M-200 se decidió usar, por primera vez el agua almacenada en la presa de desperdicio, a lo largo de la perforación del pozo con magníficos resultados; ya que no fue necesario suspender la perforación debido a las pérdidas del lodo.

El perforar con agua en la zona productora no representa ningún problema, ya que la formación está compuesta por areniscas y lutita gris, las cuales están en contacto con el fluido geotérmico.

4.2.7 Selección de materiales para pérdida de circulación

Si no se tiene conocimiento de porosidad o geometría de fractura, deben ser usados primero materiales para pérdida de circulación pequeños, si estos no son exitosos entonces se aplican tamaños progresivos de materiales para pérdida de circulación. Sin embargo, usualmente materiales grandes son primeramente usados con la esperanza de resolver rápidamente el problema, pero esto puede acarrear aún problemas más grandes. Materiales para pérdida de circulación de tamaño grande, requieren un especial cuidado en el lodo, también el bombeo es más difícil y frecuentemente, es necesario parar el bombeo para controlar los sólidos. Tratar de solucionar la pérdida de circulación primero con materiales pequeños, permite una mejor definición del problema en el fondo, además de proveer información técnica útil para operaciones subsecuentes.

Para propósitos de obturación, la concentración de materiales para pérdida de circulación en el lodo es importante; por ejemplo, con

cáscaras de nuez, un operador determinó que 10 lb/bl es la máxima concentración necesaria para una obturación efectiva. Concentraciones mayores no incrementan la capacidad de obturación y puede causar problemas de control de sólidos. Si una concentración de 10 lb/bl no obtura la zona de pérdida, entonces píldoras en una concentración de 50 lb/bl debe ser colocada dentro del intervalo.

Como una regla general, los materiales de pérdida de circulación para obturar fracturas, requieren que el tamaño máximo de diámetro de partícula sea equivalente a $1\frac{1}{2}$ del ancho de la fractura, y el 5% del volumen de sólidos en el lodo sean del tamaño del obturante. Un rango de tamaños de material para pérdida de circulación es entonces requerido para un control total de la pérdida. Esto pasa frecuentemente en la elaboración de los materiales para pérdida de circulación, por el proceso de trituración usado en la manufactura, el cual provee un rango de partículas gruesas, medianas y finas.

En adición a las características de puenteo y obturamiento, la resistencia a la compresión de los materiales de pérdida de circulación a temperatura de fondo es un parámetro crítico para perforación geotérmica. Después de la colocación, un tapón con material para pérdida de circulación debe ser diseñado para resistir la presión diferencial del pozo a través de este.

4.2.8 Las siguientes observaciones y conclusiones totalizan la experiencia en el manejo de la pérdida de circulación en pozos geotérmicos

1. En formaciones sedimentarias la pérdida de circulación no es un problema grave. Usando materiales para pérdida de circulación, bajo

peso de lodo, control de sólidos y una hidráulica adecuada para limpiar el agujero son suficientes para manejar la pérdida de circulación cuando ésta ocurre.

2. Las peores condiciones para pérdida de circulación ocurren en las formaciones de baja presión fracturadas y/o formaciones cavernosas. Operadores petroleros y geotérmicos creen que la propagación de presión y rompimiento, por esfuerzos térmicos debido a la perforación, contribuyen al problema de la pérdida de circulación, pero el por qué se extienden aún no es conocido. En esas formaciones fracturadas y cavernosas, los materiales para pérdida de circulación son generalmente aplicados primero, seguidos por tapones de cemento y finalmente, se aplica perforación ciega como último recurso.

3. Hinchamiento de arcillas e inestabilidad del pozo puede acompañar a la pérdida de circulación. Un lodo de bajo peso para control de la pérdida, puede no generar la suficiente presión en el fondo del pozo para estabilizar las zonas de arcilla. También los reducidos gastos de flujo cerca de los intervalos de pérdida de circulación, causan problemas de limpieza del agujero y un incremento en la acumulación de cortes en el fondo. Estos problemas pueden provocar pegadura de tubería. Los bajos pesos de lodo y una química apropiada de éste son importantes para el control del hinchamiento de la arcilla. Si la inestabilidad del pozo es severa y no puede ser controlada, la práctica general es cementar una tubería para proveer un soporte antes de empezar a perforar más profundo.

4. El uso de tubería de perforación concéntrica ha sido intentada por algunos operadores, pero el costo extra en equipo y tiempo no justifica su uso. Aunque una sarta de perforación concéntrica puede prevenir la pérdida de circulación del lodo durante la perforación, el

problema durante la cementación de la tubería de revestimiento permanece.

4.2.9 Diseño de cementación y tubería de revestimiento

Cuando los materiales para pérdida de circulación no son efectivos, la colocación de tapones de cemento es la práctica común para sellar las zonas de pérdida de circulación. Frecuentemente, son requeridos numerosos tapones para sellar completamente el intervalo de pérdida. De numerosas investigaciones y experiencias son encontradas las siguientes conclusiones:

1. Frecuentemente la obturación con cemento de las pérdidas de circulación en pozos geotérmicos fallan, particularmente, en el primer intento. La principal razón es la temperatura del fondo, la cual no se conoce de manera precisa para determinar la cantidad apropiada de retardador. También los movimientos del agua de la formación y de los fluidos del agujero, pueden lavar la lechada de cemento o inhibir la reacción de fraguado.

2. La inyección forzada de cemento-bentonita-diesel, el cual es usado con éxito en la industria petrolera para combatir pérdidas de circulación severas, no se usa en perforación geotérmica por razones ambientales asociadas con los componentes del diesel. Además el diseño es difícil para pozos geotérmicos, ya que el nivel de fluido en el espacio anular, cerca de la zona de pérdida, usualmente no es conocido.

3. Los sistemas de silicato de sodio empiezan a ser usados por algunos operadores geotérmicos para controlar la pérdida total de circulación. El gel silicato de sodio es bombeado dentro de la zona de pérdida delante del cemento y esto forma una barrera que detiene la lechada mientras esta fragua.

4. Cuando se esta colocando tubería de revestimiento a través del intervalo de pérdida, se emplean frecuentemente la tubería corta (liner) y accesorios (tieback). La tubería corta puede ser cementada desde encima y hasta abajo para asegurar una buena cementación. Una vez que la tubería corta es puesta frente a la zona de pérdida, la sarta tieback puede ser cementada a través de la abertura total con la pérdida de circulación agotada. La sarta tieback totalmente cementada no tiene que usar tubería de revestimiento en la perforación y no tiene daños en los viajes, pesca, obturación u otras operaciones.

5. Los problemas en la tubería de revestimiento se pueden presentar por secciones de pérdida de circulación mal cementadas, originando cargas excéntricas y altas concentraciones de esfuerzos que pueden ocurrir debido a un soporte desproporcionado alrededor de la tubería. La exposición a fluidos de la formación, particularmente, los fluidos que fluyen pueden causar corrosión, picaduras y desgaste en lugares calientes y esfuerzos termales en la tubería de revestimiento.

4.2.10 Consideraciones en la cementación

Un problema mayor en la cementación y obturación de la zona de pérdida, es la determinación de la temperatura a la cual la lechada reaccionará en el fondo para que ésta pueda ser apropiadamente diseñada con retardadores o aceleradores. Si la temperatura actual es mayor que la esperada, entonces la lechada puede fraguar en la sarta de perforación provocando que se tenga que limpiar ésta, lo cual resulta muy costoso. Si por otro lado, la temperatura es menor que la esperada, el tiempo de fraguado será excesivo y probablemente, resultará que la lechada fluya fuera de la zona de pérdida antes que ésta frague. Idealmente, la lechada debe empezar a fraguar cuando

esta es bombeada dentro de la zona de pérdida, pero esto depende mucho de la temperatura en el fondo del pozo.

El cemento puede no ser el material de llenado óptimo, si la pérdida de circulación es por presión inducida; de este modo, la presión de cementación no sólo abrirá la fractura, sino que también creará otras nuevas. Así un material de llenado, de peso ligero, que pueda expanderse durante el fraguado, reducirá la presión de ruptura y proporcionará un sello efectivo después de la colocación. Tal material de llenado para aplicación en altas temperaturas no ha sido diseñado.

En pozos geotérmicos, el cemento puede no fraguar apropiadamente por el agua en movimiento alrededor de éste. El cemento de peso ligero, generalmente, requiere un tiempo de fraguado largo, ya que es particularmente susceptible a ser lavado.

Taponos de cemento en zonas de pérdida de circulación pueden estorbar la cementación de la tubería de revestimiento. Las obstrucciones en el pozo causadas por taponos de cemento pueden generar problemas cuando se está corriendo la tubería de revestimiento, desplazando el lodo y circulando el cemento.

4.2.11. Nuevos conceptos y alternativas para cementaciones

Los taponos de cemento bentonita y diesel son vistos por los operadores con un gran potencial para el control de la pérdida total de circulación, pero estos sistemas deben ser apropiadamente diseñados e implementados para que sean exitosos. Además el componente diesel puede no ser aceptado por razones de ambiente en el pozo. Con algunas investigaciones, puede ser posible reemplazar el diesel con algún otro componente el cual si sea aceptado por el ambiente geotérmico.

Una compañía de perforación realizó un programa de investigación para

resolver las pérdidas de circulación. La investigación involucró al silicato de sodio como agente sellador. El proyecto fue tomado con el objetivo de formular un aditivo para el lodo de perforación que cree un sistema tipo cemento, con el que no se tenga la necesidad de usar equipo de cementación ni procedimientos de colocación de cemento. Las mayores ventajas de este sistema son:

1. El material puede ser almacenado en la locación.
2. El material puede ser agregado al lodo y dejarlo en la presa a la intemperie. Cuando la pérdida de retorno ocurra, el acelerador puede ser adicionado al lodo y la lechada bombeada hacia el agujero.
3. El método elimina el tiempo de espera.

Los problemas de temperatura con cementación convencional aún existen con el nuevo sistema, el cual es una combinación de cemento, arcilla, silicatos y otros ingredientes. El sistema es básicamente retardado y debe ser acelerado para su aplicación dependiendo de la temperatura en el fondo del pozo.

El producto es diseñado para temperaturas de 250° a 350°F, el cual corresponde al rango esperado de temperaturas de operación en el pozo. Esta temperatura es menor que la normal del pozo ya que el pozo se enfría durante la perforación y la circulación. Si el pozo está estático antes de la operación de obturamiento, entonces la temperatura estará incrementada.

4.2.12 Causas frecuentes de fallas en la solución

Algunas de las causas más usuales, directas o indirectas, por las que falla la solución de la pérdida de circulación son las siguientes.

(1) Frecuentemente, la localización de la zona de pérdida no es establecida, dando como resultado que los materiales se coloquen en el

lugar equivocado. Muchas zonas de pérdida registradas en la barrena, están realmente arriba de ésta, en el primer punto de pérdida. Usualmente, las zonas de pérdida de circulación no están en el fondo (a la profundidad de la barrena) pero si están cerca de la zapata de la última T.R. o en el punto de la primer pérdida.

(2) Los materiales de pérdida de circulación y las técnicas utilizadas no son sistemáticamente ajustadas de acuerdo con el tipo y gravedad de la zona de pérdida.

(3) Muchas veces existe aversión en proceder rápidamente con la técnica requerida para combatir la severidad de la zona de pérdida. (perforación ciega y cementación de tubería).

(4) No se tienen registros adecuados que describan las pérdidas, los materiales y técnicas que han sido empleadas de manera efectiva contra ellas. Por esto, la información exacta de la experiencia obtenida en esta área es de gran valor.

(5) En la cementación, las columnas no están balanceadas y el lodo de perforación rompe a través del tapón de cemento antes de que éste fragüe. Además, cuando la tubería es retirada del agujero después de colocarlo, el nivel del lodo en el espacio anular decrece y con esto, este puede romper a través de la lechada recién colocada. Por ello se deben emplear técnicas de columna balanceada, descenso y colocación del tapón hasta su sitio, levantando y comprimiéndolo.

Para incrementar la relación de éxito, los materiales para pérdida de circulación y las técnicas deben ser funcionalmente relacionadas con las pérdidas, con ello se evita un retraso de tiempo. Por ejemplo, donde una cantidad razonable (15 a 20 lb/bl) de materiales obturantes no ha trabajado en la compresión de una lechada de alta pérdida de filtrado, usualmente resulta inútil aplicar altas concentraciones de

los mismos materiales. El siguiente paso debe ser incrementar el tamaño de los materiales granulares; si esto no da resultado, entonces lo más recomendable es emplear una técnica más severa (como la colocación de cemento o un tapón suave).

CAPITULO V

MATERIALES EMPLEADOS EN EL CONTROL DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACION

Los materiales obturantes usados en el control y restablecimiento de la circulación se clasifican en obturantes temporales y permanentes. Los materiales obturantes temporales pueden ser del tipo granular, fibroso y laminar. Y los materiales obturantes permanentes se consideran a los tapones de cemento, plástico, polímero y de barita.

La diferencia básica entre los obturantes temporales y permanentes, es que los temporales no realizan ninguna reacción química pues son inertes; mientras que los obturantes permanentes sí experimentan cambios químicos durante su colocación en el agujero.

5.1 Materiales Obturantes Temporales

Este tipo de obturante es incorporado al fluido de perforación o lechada de cemento, y es desplazado a través de las toberas de la barrena o de la tubería franca, para posteriormente ser colocado en la zona de pérdida. Una vez atravesada la formación con pérdida, los obturantes son eliminados del sistema circulatorio, mediante la mesa vibratoria.

5.1.1 Obturantes granulares

Los obturantes granulares más representativos son:

- Cáscara de nuez
- Perlita
- Gilsontita
- Carbonatos
- bentonita de grano grueso

- Asfalto quemado
- Ladrillo molido
- Diásel M.

Los granos de malla grande deben aplicarse en fracturas o canales, o en áreas donde existan irregularidades, formando puentes o tapones debido a los efectos de concentración de partículas que se forman cuando el lodo o lechada de cemento se pierde como filtrado.

Los granos medianos pueden sellar fracturas de 0.12 pg y los granos finos pueden sellar fisuras hasta de 0.04 pg. Los agentes obturantes usados en tamaños y grados adecuados son efectivos para sellar fracturas hasta de 1 pg.

Características de los materiales obturantes granulares

Cáscara de nuez

Es un material fuerte y no poroso, es muy efectivo en sellar formaciones no consolidadas y fracturadas, además tiene la propiedad de ser químicamente inerte y carece de influencia en el fraguado de la lechada de cemento.

Este material es triturado y graduado en tres tamaños: fino, mediano y grueso. Por lo regular la cáscara de nuez de grano medio a grueso es usado en operaciones de cementación de T.R. o cementaciones forzadas, con una concentración de 1 a 5 lb/saco de cemento. Es recomendable el uso de un gel bentonítico al 4% cuando se usa cemento y cáscara de nuez, con la finalidad de facilitar el bombeo de la lechada. Cuando este material se incorpora al fluido de perforación se recomienda una concentración de 20 lb/bl (57 kg/m³), para sellar fracturas de 0.04 a 0.12 pg.

Propiedades del obturante:

Peso específico: 1.28 g/cm^3 .

Requerimiento de agua: cero.

Volumen absoluto: 0.0938 gal/lb (0.783 l/kg).

Rango de uso:

Temperatura estática: $60 \text{ a } 290 \text{ }^\circ\text{F}$ ($15.6 \text{ a } 143 \text{ }^\circ\text{C}$).

Concentración 1 a 5 lb/sc de cemento.

Los nombres comerciales que tiene en el mercado son: Tuf-plug, wallnut, imco-plug y Vil-plug.

Perlita

Existen dos tipos: perlita expandida y perlita seis.

Perlita expandida- Es una roca volcánica, la cual es tratada con calor para formar un material granular con huecos o estructuras celulares.

Se utiliza como obturante en formaciones porosas y fracturadas, al incorporarse a una lechada de cemento, ésta altera las siguientes propiedades: reduce la densidad e incrementa el volumen de agua para la mezcla. Los efectos secundarios son la reducción de la resistencia inicial y final a la compresión del cemento; no tiene influencia alguna sobre la viscosidad, pérdida de filtrado y tiempo de bombeabilidad.

Para evitar que la perlita flote mientras se está mezclando, es recomendable usar bentonita del 2 al 6% para incrementar un poco la viscosidad.

Propiedades de la perlita:

Peso específico: 2.20 g/cm^3 .

Requerimiento de agua: 0.5 gal/lb.

Vol. absoluto: 0.546 gal/lb (0.46 l/kg) a una presión de 3000 lb/pg².

Rango de uso:

Temperatura estática: 60 a 260 °F (15.6 a 127 °C).

Concentración: 0.5 a 1.76 pie³/sc.

Perlita seis- Es una mezcla de perlita regular y pozmix A, se aplica como un aditivo obturante en formaciones porosas y fracturadas. Los efectos sobre las propiedades del cemento son: reduce la densidad de la lechada y la resistencia a la compresión inicial y final del cemento; no tiene ningún efecto sobre la viscosidad y pérdida de filtrado de la lechada. Por otra parte incrementa, en forma notable, el volumen de agua para mezcla así como el tiempo de bombeabilidad de la lechada.

Propiedades de la perlita seis:

Peso específico: perlita regular 2.20 g/cm³.

Pozmix A 2.46 g/cm³.

Requerimiento de agua: 0.1526 gal/lb.

Rango de uso:

Temperatura estática: 60 a 260 °F (15.6 a 127 °C).

Concentración: 0.5 a 1.76 pie³/sc.

Gilsonita

Míneralógicamente la gilsonita está clasificada como un hidrocarburo natural, está constituida de gránulos triturados y clasificados adecuadamente para ser usados en la lechada de cemento.

La gilsonita no absorbe agua de la lechada cuando se somete a la presión de operación, por lo tanto, la presencia de ésta no afecta

significativamente el tiempo de fraguado de la lechada. La influencia sobre las propiedades de la lechada de cemento son la de reducir la densidad y no tiene ningún efecto sobre la viscosidad, pérdida de filtrado, durabilidad y tiempo de bombeo. Una de sus reacciones secundarias es el incremento del volumen de agua para mezclar.

Por lo regular, bastan de 6 a 14 kg (13 a 30 lb) por saco de cemento, para sellar una formación con pérdida de circulación; exceptuando las pérdidas totales severas. En formaciones débiles, el uso de este obturante permite manejar lechadas con densidades de hasta 1.5 a 1.6 g/cm³ (12.5 a 13.3 lb/gal) con buenos resultados en la cementación.

Las características del material son lo suficientemente fuertes para soportar presiones de inyección moderadas, además son lo bastante blandas para permitir la deformación bajo presión, proporcionando un sello efectivo contra la zona de pérdida.

Propiedades de la gilsonita:

Peso específico: 1.07 g/cm³.

Requerimientos de agua: 0.04 gal/lb.

Vol. absoluto: 0.1122 gal/lb (0.9363 l/kg).

Rango de uso:

Temperatura estática: 60 a 275 °F (15.6 a 135 °C).

Concentraciones: 12.5 a 30 lb (5.7 a 13.22 kg).

Algunos nombres comerciales de la gilsonita son: gilsonite, D-24 y D-7.

Carbonatos (Circotex)

Es una mezcla de diferentes tamaños de carbonatos, la función de este

tipo de material es la de contribuir junto con otro obturante más fino a restaurar la circulación; puede ser usado en agua dulce o en agua salada, salmueras deshidratadas, salmueras de cloruro de sodio o de calcio. Puede ser agregado directamente a cualquier sistema para ser mezclado. Es efectivo en situaciones difíciles de pérdida, en donde las características de un sello superior son requeridas. Bajo estas condiciones una cantidad de 29 a 143 kg/m³ de circotex deberán ser agregados a una lechada compuesta por lignosulfonato, polímero sintético y varios tamaños de carbonatos.

Bentonita

Es uno de los miembros más conocidos del grupo de la montmorillonita, tiene propiedades tixotrópicas bien desarrolladas. Se supone que es un producto final del desgaste, por los agentes atmosféricos, de la ceniza volcánica.

El tamaño de la partícula es excesivamente pequeño siendo apenas visible con los microscopios más potentes. Estas partículas coloidales mínimas absorben agua rápidamente, expandiéndose muchas veces su tamaño original que tienen al estar secas. Aún cuando estén presentes en cantidades pequeñas, se dispersan fácilmente en agua y también se gelatinizan para formar una red celular que contiene relativamente gran cantidad de agua, lo cual le proporciona al fluido cierto grado de rigidez. Cuando no está gelatinizado, las partículas tienen gran movilidad y sus superficies relativamente grandes llevan fuertes cargas eléctricas negativas, propiedad que les permite permanecer flotando en agua con poca tendencia a asentarse o flocularse. Las partículas de bentonita tienen muy desarrollada la propiedad de absorber el agua y iones de varias sustancias con las que llegan a estar en contacto.

Tiene la propiedad de hincharse al absorber agua en varios grados y el alcance de la expansión al hidratarse, se considera como un índice del valor del material para perforación. Una buena bentonita se expandirá 20 a 40 veces su volumen seco al hidratarse lentamente. La bentonita es un excelente auxiliar para solucionar las pérdidas de circulación, pues puede ser usado como aditivo con cemento-diesel o puede ser mezclado con aceite diesel para su colocación dentro del pozo, esta mezcla es muy efectiva y barata, en las pérdidas donde la causa son cavernas o cavidades vulgares en la formación.

Es un material totalmente disponible en los campos de perforación y por su bajo precio es una buena opción para el control de las pérdidas.

Fragmentos de ladrillo

Quando se está perforando una formación con pérdida de circulación severa, los fragmentos de ladrillo pueden ser utilizados como un coadyuvante para restablecer la circulación.

Diesel M

Es una mezcla de tierras diatomeáceas y fibras de asbesto finas, su uso es frecuente contra las pérdidas de filtrado, pérdidas parciales y pérdidas totales poco severas.

El diesel M es muy versátil, puede mezclarse en agua dulce, salada o petróleo. Para mezclarlo con agua dulce se debe de aplicar un pretratamiento al agua. Se le agrega $\frac{1}{4}$ lb/bl (0.7 kg/m³) de carbonato de sodio, $\frac{1}{4}$ lb/bl de sosa cáustica, lo anterior tiene la finalidad de remover los iones de calcio y magnesio, permitiendo con esto un mejor rendimiento de las arcillas.

El diesel M mantiene la misma versatilidad, al mezclarse con otro

tipo de obturante, es compatible con material fibroso, granular y laminar; por ello que es recomendable su uso. En situaciones más severas es recomendable agregar celofán fino a mediano, el tamaño de los materiales deberá seleccionarse teniendo en cuenta la gravedad de la pérdida.

Bridge-Sal

Este fluido es soluble al agua no causa daños y hace uso de sal tratada de tamaño especial para controlar la pérdida de fluido.

El fluido es simple, económico y efectivo; inhibe la expansión de las lutitas y sella temporalmente las formaciones altamente permeables.

El material se retira fácilmente con cualquier agua no saturada o con fluido de formación, eliminando así la necesidad de acidificar.

El sistema puede aplicarse como un bache obturante para restablecer la circulación o empacar gravas y sellar eficientemente la superficie de una formación permeable. El fluido de obturación requiere de un tamaño y concentración adecuada de partículas formadoras de puente, debido a que el tamaño de los poros de la formación varía considerablemente en diferentes pozos, el diseño del obturante requiere una distribución de partículas que abarque una gran amplitud de permeabilidades de formación.

Los resultados de laboratorio demuestran que la curva de solubilidad indica que sólo pequeñas cantidades de sal se disuelven en la salmuera saturada, a medida que la temperatura aumenta de condiciones atmosféricas a las condiciones típicas del fondo del pozo. Por ejemplo, sólo se disuelven 5 lb/bl de sal en la salmuera saturada cuando la temperatura aumenta de 70 a 250 °F. La información de solubilidad a temperatura muestran que el sistema es térmicamente estable y puede

usarse a temperaturas de fondo de pozo de por lo menos 300 °F.

5.1.2 Obturantes fibrosos

Son materiales extraídos de vegetales fibrosos como: bagazo de caña, paja, heno, aserrín, corteza de semilla de algodón y madera desmenuzada. También existen materiales obturantes fibrosos de origen animal, mineral y sintético, ejemplos de éstos son: cuero molido, fibras de asbesto, vidrio y nylon.

Las fibras actúan formando una malla en la superficie de la formación, cuando penetra en ésta a través de canales y fracturas forma puentes o tapones. Los obturantes fibrosos más efectivos son capaces de sellar fracturas hasta de 1 pg de espesor, mientras que los obturantes más finos se limitan a sellar fisuras de 0.125 pg de espesor.

Características de los materiales obturantes fibrosos

Paja

Son fibras vegetales de tamaño de $1/2$ a $3/8$ de pg, la concentración recomendada para sellar fisuras de hasta 0.1 pg es de 10 a 12 lb/bl (29 a 34 kg/m³).

Heno

Son fibras vegetales y tienen un tamaño de $1/2$ a $3/8$ de pg, su concentración recomendada es de 10 a 12 lb/bl (29 a 34 kg/m³), para sellar fisuras de hasta 0.04 pg.

Aserrín

Son fragmentos de madera con un tamaño de $1/16$ a $1/4$ de pg, la concentración recomendada es de 10 lb/bl (29 kg/m³), para sellar

fisuras de hasta 0.1 pg.

Corteza de semilla de algodón

Son fibras de $\frac{3}{8}$ de pg, su concentración recomendada es de 10 lb/bl (29 kg/m³), para sellar fisuras de hasta 0.07 pg.

Madera desmenuzada

Son fibras de $\frac{1}{4}$ de pg, su concentración recomendada es de 8 lb/bl (23 kg/m³), para sellar fracturas de hasta 0.03 pg de grosor.

Drill-sal

Es un material fibroso a base de asbestos, usado especialmente en agua salada. En algunas ocasiones se presentan pérdidas de circulación en formaciones productoras, ya sea porque éstas fueron sometidas a fracturamiento, acidificación o depresión. Una mezcla de un polímero base carbonato de calcio y de drill-sal puede obturar satisfactoriamente este tipo de formaciones, empleando una concentración de 6 lb/bl (15 kg/m³).

Una limitación que tienen estos materiales obturantes es la baja resistencia a la compresión mecánica y a la degradación, a considerables profundidades.

5.1.3 Obturantes laminares

Estos materiales son efectivos para sellar o resellar pequeñas fisuras y para controlar la pérdida de filtrado.

Los obturantes laminares más comunes son el celofán y mica. Tanto el papel celofán como la mica se encuentran disponibles en tamaños fino y grueso; el tamaño grueso es efectivo para sellar gravas y fracturas de

hasta 0.1 pg; y el tamaño fino es apropiado para controlar pérdidas de filtrado y sellar fracturas pequeñas de hasta 0.06 pg. Los tamaños finos tienen la ventaja de pasar a través de la malla 12 permitiendo que los recortes de perforación se queden en ésta; mientras que los finos continúan en el sistema, manteniendo un nivel apropiado en la obturación.

Características de los materiales obturantes laminares

Celofán

Las escamas de celulosa retienen su resistencia aún estando mojadas, debido a que presentan un área grande, también se pueden integrar a la lechada de cemento, para sellar o resellar formaciones altamente permeables o fisuradas durante la cementación de T.R. La concentración recomendada es de $\frac{1}{8}$ a $\frac{3}{8}$ de lb (0.5 a 6.2 kg) por cada saco de cemento. Por otra parte, se puede incorporar al fluido de perforación para reducir las pérdidas por filtración. Este material puede ser desplazado a través de las toberas de la barrena o tubería franca, además tiene la propiedad de ser químicamente inerte y de no afectar las propiedades del lodo ni de la lechada de cemento.

Cuando se use celofán con lechadas de cemento es recomendable usar escamas de $\frac{3}{8}$ de pg.

Propiedades del celofán:

Peso específico: 1.42 g/cm³.

Requerimiento de agua: cero.

Rango de uso:

Temperatura estática: 60 a 260 °F (15.6 a 127 °C).

Modelos comerciales: Flocele, Cello-seal, D-29, Jek-Flake, Imco-Flake

y Cello-Flake.

5.2 Materiales Obturantes Permanentes

El uso de estos materiales está indicado para sellar formaciones con fracturas o secciones cavernosas de hasta 1 pie de amplitud.

Los obturantes sólidos permanentes comparados con los obturantes temporales presentan una mayor resistencia a la compresión mecánica y a la degradación por altas temperaturas y/o profundidades.

Los obturantes permanentes básicos son: cemento Portland, bentonita y diesel, los cuales son materiales relativamente baratos y disponibles en cualquier localidad.

Existe toda una variedad de aditivos para lechadas de cemento que son capaces de hacerla más ligera o pesada, retardar o acelerar su fraguado, bajar su pérdida de filtrado para proporcionar puentes dentro de ellas mismas y para aumentar o disminuir la fuerza de gelatinosidad (gel).

Existen otros tipos de cementos tales como: polímeros, orgánicos, sintéticos, yeso y puzolanas, que pueden ser usados para combatir el tipo de pérdida encontrado.

Los cementos se manejan a base de lechadas de las cuales se recomiendan tres: cemento puro, cemento-bentonita y cemento-gilsonita.

5.2.1 Tapones duros

La aplicación de un tapón de cemento Portland proporciona un fraguado duro, el cual es de gran utilidad para sellar fracturas naturales, secciones cavernosas con abertura de $\frac{1}{4}$ pg hasta 1 pie (1.48 a 30.48 cm) y caliza quebradiza o de cantos rodados. No se recomienda su uso para sellar formaciones que han sido fracturadas hidráulicamente debido

que sus características de fraguado duro y la carencia de fuerza de gelatinosidad (gel), estimularía la expansión y prolongación de las fracturas naturales.

Ejemplos de este tipo de tapones son: cemento Portland, cemento puzolánico, cemento de yeso y cemento diesel.

5.2.2 Tapones plásticos o suaves

Estos tapones son usados para sellar formaciones que han sido fracturadas hidráulicamente, en pérdidas parciales o totales y para soportar la colocación de lechadas de cemento cerca de las paredes del agujero, hasta que éste frague.

Su efectividad radica en su alta gelatinosidad (gel), dichos tapones causan resistencia al flujo dentro de las fracturas, lo cual evita que ésta se expanda o extienda. Como un cemento plástico nunca fragó duro, puede deformarse para rehacer el sello en caso de que la fractura esté ligeramente abierta; además cuando un tapón plástico es aplicado origina una presión de inyección, que no sólo sella fracturas amplias, sino que fuerza al cemento plástico a que penetre en las fracturas severas y pequeñas.

Los cementos convencionales no tienen fuerza de gel, por lo tanto en estos no ocurre la presión de inyección durante su aplicación.

Para la aplicación de estos tapones plásticos se tienen dos alternativas de colocación, una es mezclarlos en la superficie y la otra que se realice en el interior del pozo.

Los tapones plásticos que se mezclan en la superficie son diferentes a los que son mezclados dentro del pozo, aunque para ambos casos, el tapón plástico tendrá mejores resultados si es mezclado correctamente. Indudablemente, es difícil mezclar dos materiales correctamente en el

fondo de un agujero que esta perdiendo circulación del fluido.

El tapón plástico en algunas ocasiones llega a fallar porque las lechadas son demasiado viscosas o demasiado fluidas. El éxito del mezclado de tapones suaves en el fondo del agujero, dependerá de la colocación de las cantidades justas de cada uno de sus componentes y muy especialmente, de que se mezclen cerca de la zona de pérdida.

Ejemplos de este tipo de tapón son: Bentonita-Diesel, Instant-Plug y Bengum.

5.2.3 Tapones de polímeros

Otra clase de cementos diferentes a los convencionales son los polímeros orgánicos y sintéticos, éstos poseen propiedades peculiares que los habilitan para efectuar obturamientos selectivos en zonas con problemas de invasión de fluidos de la formación, canalización del agua a través del cemento de la T.R. y en operaciones de cementación forzada. Además, pueden ser empleados en operaciones de control y restablecimiento de la circulación cuando otros tipos de obturantes han fracasado.

Los nombres comerciales de estos cementos son: Polímeros Dowell, Flochek, Tapón Zonelock y gelatina IMP-OP-301.

5.2.4 Tapones de barita

Una situación muy crítica puede llegar a presentarse cuando un pozo comienza a fluir y a perder circulación simultáneamente. Cuando esta situación se presenta, la opción más viable es la de matar el pozo hidrostáticamente, esto se puede hacer, sólo si la zona de alta presión está ubicada por debajo de la zona de pérdida. Puede emplearse un taponamiento con barita para taponar el pozo.

Para la aplicación de este tapón se necesita una lechada extremadamente densa y de alta pérdida de agua. De este modo, la sedimentación y decantación de la barita formará un tapón sólido en el pozo descubierto proporcionando densidad y peso, sellando así la zona de alta presión. Una vez colocado el tapón de barita, se pueden adoptar las medidas normales para tratar de restablecer la circulación con relativa seguridad. Los tapones de barita cuya densidad fluctúa entre 18 a 24 lb/gal (2.16 a 2.88 g/cm³) están integrados por barita, lignosulfonato, sosa cáustica y agua dulce.

CAPITULO VI

PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL CALCULO DE LAS PRESIONES DE BROTE Y DE FRACTURA EN UN POZO GEOTERMICO

6.1 Presiones de Brote

Las siguientes fórmulas pueden ser usadas en el cálculo de presiones de brote para sarta de tubería de perforación:

a) Flujo laminar

$$P_s = B \mu_p v_p + \frac{Y_P}{0.3(dh-doe)} \dots\dots\dots(\text{Ec. 6.1})$$

- donde:
- Ps- presión de brote en lb/pg²/1000 pies de tubería
 - B- coeficiente de geometría para flujo laminar
 - vp- velocidad de la tubería en pie/min
 - μp- viscosidad plástica en cp
 - YP- punto de cedencia en lb/100 pie²
 - doe- diámetro exterior efectivo de la tubería en pg
 - dh- diámetro del agujero en pg.

b) Flujo turbulento

$$P_s = A \mu_p^{0.21} q^{0.805} v_p^{1.8} \dots\dots\dots(\text{Ec. 6.2})$$

- donde:
- q- gasto de lodo en pie³/min
 - A- coeficiente de geometría para flujo turbulento

La presión de brote debe ser determinada tanto para flujo laminar como para turbulento y el mayor de los dos valores deberá ser usado. Para sargas de tubería de revestimiento un término β es sumado en la

primera parte de la ecuación (6.1) (parte derecha) y un término α sumado en la parte derecha de la ecuación (6.2).

Los términos A, B, α y β son obtenidos de las siguientes ecuaciones aproximadas mediante regresión, las ecuaciones solo funcionan para tuberías de diámetros de 4 1/2" (tubería de perforación), 7" y 9 5/8" (tuberías de revestimiento), ya que estas son las tuberías más frecuentemente usadas en la perforación geotérmica.

Coefficiente de flujo turbulento A

Tubería	Ecuación
9 5/8 "	$y = 1999227119 X^{-11.59217402}$
7 "	$y = 1157355240 X^{-12.85800516}$
4 1/2 "	$y = 1118.705605 X^{-8.139845402}$

Coefficiente de flujo laminar B

Tubería	Ecuación
9 5/8 "	$y = 1575891265 X^{-10.50270026}$
7 "	$y = 243.942514 e^{-1.120813358 X}$
4 1/2 "	$y = 67483.82139 X^{-8.662128107}$

Coefficiente de flujo turbulento para TR (α)

Tubería	Ecuación
9 5/8 "	$y = -3.68078332 + 1.58464861 \ln X$
7 "	$y = -3.000520727 + 1.456841168 \ln X$

Coefficiente de flujo laminar para TR (β)

Tubería	Ecuación
9 5/8 "	$y = -3.919250266 + 1.728121183 \ln X$
7 "	$y = -3.086335441 + 1.547365054 \ln X$

Las ecuaciones antes presentadas muestran que existen dos fenómenos como producto de la extracción e introducción de la sarta mientras se esta perforando: (1) efecto de succión (swabbing) y (2) efecto de brote (surge). Estos efectos a su vez dependen de: (1) propiedades del fluido de perforación, (2) espacio libre entre la tubería y el agujero, (3) tamaño de la tubería, (4) longitud de tubería de perforación y (5) velocidad de viaje.

Cuando la tubería de perforación esta siendo sacada del agujero, la fuerza de fricción en la totalidad de la tubería de perforación y el efecto de pistón, por la barrena y los lastrabarrenas, crean una succión en el fondo del agujero. Este fenómeno induce a la extracción de fluidos de la formación, los cuales han sido confinados por la presión generada por la columna hidrostática del fluido de perforación dentro del pozo. Una mayor intensidad de estos efectos de succión crean repentinos cambios en la distribución de esfuerzos alrededor del pozo, conduciendo a un fracturamiento inducido, y con esto una posible pérdida de circulación.

Contrariamente, la presión de brote (incremento en la presión de fondo) puede resultar por la introducción de la tubería en el pozo. Esta presión aumenta al elevarse los valores de la resistencia al gel del fluido de perforación y debido al incremento de la fuerza de fricción o adherencia del fluido de perforación a la tubería de perforación y/o revestimiento. Es indiscutible que tanto las propiedades del fluido de perforación (punto de cedencia y resistencia al gel) como la velocidad con que se corre la tubería, son factores que pueden ser controlados. El aumento de la presión en el fondo motivado por la introducción de la tubería, puede ser suficiente como para romper una formación débil o no consolidada, causando con ello la

pérdida de circulación. Es por ello que en la planeación de un pozo es de primordial importancia el conocimiento de los gradientes de fractura (vertical y horizontal) de las formaciones que van a ser penetradas.

De acuerdo con Moore (1974), arriba del 25% de los reventones resultan de presiones de succión, mientras que presiones de brote excesivas son frecuentemente responsables de pérdida de circulación y/o daño a la formación (bloqueo con sólidos).

6.2 Presiones de Fractura

Hoy en día, un máximo control del pozo y la reducción de costos son factores claves en las operaciones de perforación. Para lograr esto, es básico el entendimiento de dos presiones de formación, la presión de poro y la presión de fractura.

La presión de formación puede ser determinada a partir de los parámetros de perforación y registros. La presión de fractura (o gradiente) puede ser calculada usando uno de los diversos modelos disponibles o puede ser determinado por pruebas en el pozo (pruebas de presión). Una prueba de presión abajo de la última zapata puede: (1) probar la calidad de la cementación y (2) determinar la integridad (gradiente de fractura) en la primer zona débil (permeable) debajo de la zapata.

Para el programa de cómputo se utilizó el método de Matthews y Kelly (1967). En donde K_i es determinado mediante un análisis tipo regresión con datos de campo. Esta ecuación es:

$$FP/D = K_i (19.2 - Pf/D) + Pf/D$$

donde: $K_i = 0.23375 + 4 \times 10^{-5} D$

FP - Presión de fractura en el punto de interés (lb/pg²)

D - Profundidad de la zona de interés (pies)

Pf - Presión de formación (lb/pg²)

Ki - Coeficiente adimensional de esfuerzos en la matriz.

8.3 PROGRAMA DE COMPUTO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA PRESION DE BROTE

CUALTEMOC SOTO SANCHEZ

ENTRADA DE DATOS

```
10 CLS
INPUT " PROFUNDIDAD DEL POZO (pies)": D
INPUT " PRESION DE FORMACION O DE PORO (lb/ps2)": PP
INPUT " VELOCIDAD DE LA TUBERIA (pie/min)": VP
INPUT " GASTO DE LODO (pie3/min)": Q
INPUT " VISCOSIDAD PLASTICA DEL LODO (cb)": MUP
INPUT " PUNTO DE CEDENCIA DEL LODO (lb/100 pies2)": YP
INPUT " DIAMETRO DEL AGUJERO (po)": DH
PRINT
PRINT
PRINT
PRINT " DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA?"
PRINT
PRINT " 1.- 4 1/2 po (TUBERIA DE PERFORACION)"
PRINT " 2.- 7 po (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)"
PRINT " 3.- 9 5/8 po (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)"
PRINT
INPUT "TECLEA TU OPCION": DP
```

CALCULO DE LA PRESION DE FRACTURA A LA PROFUNDIDAD DEL POZO

```
KI = .23375 + .00004 * D
PF = (KI * (19.2 - PP / D) + PP / D) * D
```

CALCULO DE LAS CONSTANTES A, B, BETA Y ALFA

```
IF DP = 1 THEN
  A = 1118.705605 * DH ^ (-8.1398454620)
  B = 67483.82139 * DH ^ (-8.6621281069999999)
  ALFA = 0
  BETA = 0
  DP = 4.5
```

END IF

```
IF DP = 2 THEN
  A = 1157355240 * DH ^ (-12.85806516)
  B = 243.942514 * EXP(-1.126813358 * DH)
  ALFA = -3.000520727 * 1.456941136 * LOG(DH)
  BETA = -3.08633544 * 1.54765054 * LOG(DH)
  DP = 7
END IF
```

IF DP = 3 THEN

A = 1999227119 * DH ^ (-11,593174620)

B = 1675891265 * DH ^ (-10,502796260)

ALFA = -3,880783320 + 1,584648610 * LOG(DH)

BETA = -3,9192592660 + 1,7281211830 * LOG(DH)

DP = 9,625

END IF

CALCULO DE LA PRESION DE BROTE

PS1 = B * MUP * VP + BETA + YP / (.3 * (DH - DP))

PS2 = A * (MUP ^ .21) * (Q ^ .806) * (VP ^ 1.8) + ALFA

IF PS1 > PS2 THEN PS = PS1 * D / 1000 ELSE PS = PS2 * D / 1000

IF PS > PF THEN

CLS

LOCATE 5, 10: PRINT "LA PRESION PROVOCADA POR EL MOVIMIENTO DE LA TUBERIA"

LOCATE 6, 10: PRINT " PUEDE CAUSAR FRACTURAMIENTO DE LA ZONA "

LOCATE 7, 10: PRINT " QUE SE ENCUENTRA A ": D1 "PIES "

PRINT

PRINT

PRINT

PRINT "RECOMENDACIONES:"

PRINT " DISMINUIR LA VELOCIDAD DE LA TUBERIA"

PRINT " DISMINUIR LA VISCOSIDAD PLASTICA DE EL LODO"

PRINT " DISMINUIR EL GASTO DEL LODO"

PRINT " DISMINUIR EL PUNTO DE CEDENCIA DE EL LODO"

ELSE

CLS

LOCATE 5, 10: PRINT " LAS CONDICIONES DE OPERACION ACTUALES NO CAUSARAN"

LOCATE 6, 10: PRINT "PROBLEMAS EN LA FORMACION A LA PROFUNDIDAD DE": D1 "PIES"

END IF

LOCATE 20, 10: INPUT "DESEAS CONOCER LAS PRESIONES DE FRACTURA Y DE BROTE (S/N)": IN#

IF IN# = "S" THEN

CLS

LOCATE 5, 10: PRINT "PRESION DE FRACTURA EN EL PUNTO DE INTERES": PF: "(lb/pq2)"

LOCATE 7, 10: PRINT "PRESION DE BROTE EN EL PUNTO DE INTERES": PS: "(lb/pq2)"

END IF

PRINT : PRINT : INPUT "DESEAS HACER OTRO CALCULO ": CAL#

IF CAL# = "S" THEN 10

END

CAPITULO VII

VALIDACION DEL PROGRAMA

Este programa de cómputo fue corrido con datos reales de campo tomados del Manual de Perforación para la zona geotérmica de Cerro Prieto, que se encuentra localizado al norte de la República Mexicana aproximadamente a 30 km al sur de Mexicali, B. C.

CORRIDA DEL PROGRAMA

PROFUNDIDAD DEL POZO (pies)? 2296
PRESION DE FORMACION O DE PORO (lb/qq2)? 1300
VELOCIDAD DE LA TUBERIA (pie3/min)? 1200
GASTO DE LODO (pie3/min)? 135
VISCOSIDAD PLASTICA DEL LODO (cp)? 13
PUNTO DE CEDENCIA DEL LODO (lb/100 pies2)? 4
DIAMETRO DEL AGUJERO (po)? 12.25

DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA?

- 1.- 4 1/2 dg (TUBERIA DE PERFORACION)
- 2.- 7 dg (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)
- 3.- 9 5/8 dg (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)

TECLEA TU OPCION? 3

LA PRESION PROVOCADA POR EL MOVIMIENTO DE LA TUBERIA
PUEDE CAUSAR FRACTURAMIENTO DE LA ZONA
QUE SE ENCUENTRA A 2296 PIES

RECOMENDACIONES:

DISMINUIR LA VELOCIDAD DE LA TUBERIA
DISMINUIR LA VISCOSIDAD PLASTICA DE EL LODO
DISMINUIR EL GASTO DEL LODO
DISMINUIR EL PUNTO DE CEDENCIA DE EL LODO

DESEAS CONOCER LAS PRESIONES DE FRACTURA Y DE BROTE (S/N)? S

PRESION DE FRACTURA EN EL PUNTO DE INTERES 15229.78 (lb/qq2)

PRESION DE BROTE EN EL PUNTO DE INTERES 72003.53 (lb/qq2)

DESEAS HACER OTRO CALCULO ? S

PROFUNDIDAD DEL FOLIO (pies) 2296
PRESION DE FORMACION O DE PORO (lb/peg) 4000
VELOCIDAD DE LA TUBERIA (pies/min) 50
GASTO DE LODO (pies/min) 105
VISCOSIDAD PLASTICA DEL LODO (cp) 13
PUNTO DE CEDENCIA DEL LODO (lb/100 pises) 4
DIAMETRO DEL AGUJERO (pulg) 12.25

DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA?

- 1.- 4 1/2 dg (TUBERIA DE PERFORACION)
- 2.- 7 dg (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)
- 3.- 9 5/8 dg (TUBERIA DE REVESTIMIENTO)

TECLEA TU OPCIÓN: 3

LAS CONDICIONES DE OPERACION ACTUALES NO CAUSARAN
PROBLEMAS EN LA FORMACION A LA PROFUNDIDAD DE 2296 PIES

DESEAS CONOCER LAS PRESIONES DE FRACTURA Y DE BROTE (S/N)? 5

PRESION DE FRACTURA EN EL PUNTO DE INTERES (7050.69 (lb/peg))

PRESION DE BROTE EN EL PUNTO DE INTERES (118.00 (10-peg))

DESEAS HACER OTRO CALCULO? N

CONCLUSIONES

La severidad con que se manifiesta la pérdida de circulación del fluido y el medio ambiente getérmico, hacen que la solución de este problema sea muy complejo. Los grandes esfuerzos realizados en investigaciones y en la experiencia obtenida a través del tiempo, no han sido suficientes para resolver completamente el problema de la pérdida de circulación.

Se han establecido las circunstancias y los mecanismos físicos bajo los cuales se presenta la pérdida de circulación del fluido, con el objetivo principal de proporcionar una base de conocimiento más precisa al operador de campo. Con ello se pretende que el operador esté habilitado para realizar una identificación precisa del problema y de esta forma planee una estrategia adecuada para solucionarlo satisfactoriamente

Se tiene un compendio de las técnicas más utilizadas para solucionar la pérdida de circulación del fluido. Este representará una herramienta básica para el desarrollo de estrategias más apropiadas para combatir la pérdida.

Se tiene una recopilación de los materiales más comúnmente utilizados en la solución de la pérdida de circulación. La utilidad de esta recopilación es un instrumento invaluable para el operador, debido a la facilidad que desarrollará para elegir correctamente el material, su concentración y manejo para obtener el mejor desempeño posible del mismo; y de este modo, solucionar el problema en el menor tiempo y a un costo reducido.

Se desarrolló un sencillo programa de cómputo que permitirá estimar la presión de brote y/o de fractura para zonas conflictivas. Este programa tiene como aplicación básica, prever una condición de riesgo por mal manejo en las técnicas de ascenso y descenso de tubería, que pueda originar un fracturamiento de la formación y con esto una posible pérdida de circulación.

La experiencia obtenida en el tratamiento de la pérdida de circulación del fluido, detectó que se requiere de una mayor capacitación en el personal. Por ello es recomendable, partir de la información presentada para desarrollar un programa de capacitación de operadores, mediante el desarrollo de un simulador y/o un sistema experto. Este último serviría como una herramienta de apoyo continuo durante la perforación de pozos, con lo cual se obtendría una serie de alternativas de solución más apropiadas para solucionar física y económicamente el problema de la pérdida de circulación de fluidos en pozos geotérmicos.

Tabla de Conversion de Unidades

Propiedad	Unidad Tradicional	Unidad Recomendada SI	Factor de Conversion Multiplicar por
Profundidad	pie	m	0.3048
Diámetro del agujero	pg	mm	25.4
Diámetro de tubería	pg	mm	25.4
Tamaño de barrena	pg	mm	25.4
Peso en barrena	lb	N	4.4
Velocidad de mesa rotatoria	rpm	rpm	1
Tamaño de tobera	1/32 pg	mm	0.79
Velocidad de tobera	pie/s	m/s	0.3048
Velocidad de perforación	pie/h	m/h	0.3048
Volumen	bl	m ³	0.159
Longitud de carrera	pg	mm	25.4
Gasto de bombeo	bl/min gal/min	m ³ /min m ³ /min	0.159 0.00378
Presión de bombeo	lb/pg ²	kPa	6.9
Velocidad anular	pie/min	m/min	0.3048
Velocidad de resbalamiento	pie/min	m/min	0.3048
Temperatura	°F	°C	$\frac{F-32}{1.8}$
Viscosidad con embudo	s/1000 cm ³	s/l	1
Peso del lodo	lb/gal lb/pie ³	kg/m ³ kg/m ³	120 16
Gradiente de presión	lb/pie	kPa/m	22.6

Tabla de Conversión de Unidades

Propiedad	Unidad Tradicional	Unidad Recomendada SI	Factor de Conversión Multiplicar por
carga hidrostática	lb	kPa	6.9
Esfuerzo cortante	lb f/100 pie ²	Pa	0.48
Viscosidad plástica aparente y efectiva	cp	cp	1
Punto de cedencia	lb f/100 pie ²	Pa	0.48
Resistencia al gel	lb f/100 pie ²	Pa	0.48
Filtrado API	cm ³ /30 min	cm ³ /30 min	1
Enjarre	1/32 pg	mm	0.8
Concentración de aditivos	lb/bl	kg/m ³	2.85
Potencia Hidráulica	HP	Kv	0.746
Tamaño de malla	aberturas/pg	aberturas/cm	0.254
Área descubierta de malla	% de área	m ² /m ²	0.01
Peso de tubería	lb/pie	kg/m	1.49

BIBLIOGRAFÍA

- Domínguez B.A. y Michel S.D. (1983): Perforación de pozos geotérmicos. Curso Latinoamericano de OLADE-UNAM-CFE-IIE. México, D.F.
- Domínguez B.A. y Michel S.D. (1987): Problemática de ademes de pozos geotérmicos en México. In: C. Heard (Editor), Proceedings on the International Symposium on the Development and Exploitation of Geothermal Resources, Cuernavaca, Mor., México, 366-373.
- Gupta B.S., Chilingarian G.V. and Vorabutr P. (1983): Drilling and drilling fluids, updated textbook edition. Chapter 14. Lost Circulation. Developments in Petroleum Science 11. Ed. Elsevier: 537-556.
- Messenger Joseph U. (1981): Lost circulation: Chapter 3- Plugging Mechanisms. PennWell Publishing Company.
- Messenger Joseph U. (1981): Lost circulation: Chapter 4- Corrective Lost-Circulation Measures. PennWell Publishing Company.
- Santoyo-Gutiérrez S., Barroso G.A. y Morales M.R. (1987): Control apropiado de las condiciones del fluido de perforación durante la construcción de los pozos geotérmicos. In: C. Heard (Editor), Proceedings on the International Symposium on the Development and Exploitation of Geothermal Resources, Cuernavaca Mor., México, pp. 346-354.
- Santoyo-Gutiérrez S., Barroso G.A. y Morales M.R. (1988): Tecnología de construcción de pozos geotérmicos: Capítulo II- Problemática de la perforación geotérmica y su relación con las propiedades de los fluidos de perforación. Curso de Geotermia: Especialidad en Ciencias de la Tierra para Profesionistas de Centro América, IIE/SRE/UAEM, Cuernavaca, Mor., México.
- Santoyo-Gutiérrez S., Barroso G.A. y Morales M.R. (1988): Tecnología de construcción de pozos geotérmicos: Capítulo III- Importancia de los fluidos de perforación en pozos geotérmicos. Curso de Geotermia: Especialidad en Ciencias de la Tierra para Profesionistas de Centro América, IIE/SRE/UAEM, Cuernavaca, Mor., México.

Santoyo-Gutiérrez S. y Morales M. (1990): Alternativas de solución a la problemática de la pérdida de circulación en pozos geotérmicos. Memorias del Seminario Internacional sobre Perspectivas Geotérmicas en América Latina y el Caribe. San Salvador, El Salvador, Centro América.

Santoyo-Gutiérrez S., Morales M. y Baca A. (1992): Análisis de costos en la construcción de pozos geotérmicos. Parte I: Influencia en la generación de electricidad. El Reto Energético para el Siglo XXI, Libro de Editorial Universitaria Potosina: ISBN-968-6194-45-2 0249-92004-A0036, pp. 169-176.

Santoyo-Gutiérrez S., Morales M. y Baca A. (1992): Estado de la tecnología de perforación de pozos geotérmicos en México. El Reto Energético para el siglo XXI, Libro de Editorial Universitaria Potosina: ISBN-968-6194-45-2 0249-92004-A0036, pp. 159-164.

Santoyo-Gutiérrez S., Morales M. y Baca A. (1990): Parte I Desarrollos tecnológicos de IIE en fluidos de perforación. Monografía IIE sobre Tecnología en Construcción de Pozos para el Aprovechamiento Comercial de Recursos Geotérmicos: Perforación de Pozos Geotérmicos, Curso Latinoamericano de OLADE-UNAM-CFE-IIE. Cuernavaca, Mor., México.

Santoyo-Gutiérrez S., Morales M. y Baca A. (1990): Parte II Desarrollos tecnológicos de IIE en sistemas cementantes. Monografía IIE sobre Tecnología en Construcción de Pozos para el Aprovechamiento Comercial de Recursos Geotérmicos: Perforación de Pozos Geotérmicos, Curso Latinoamericano de OLADE-UNAM-CFE-IIE, Cuernavaca, Mor., México.

Pérez Ramayo U.J. (1988): Técnicas de perforación en pozos geotérmicos: Capítulo VI- Perforación. Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.

Vaca J.S., (1987): Tecnología de la perforación de pozos en México. In: C. Heard (Editor), Proceedings on the International Symposium on the Development and Exploitation of Geothermal Resources, Cuernavaca, Mor., México, pp 339-345.

Vázquez Flores G. (1990): Obturantes permanentes: Capítulo III- Clasificación de los Materiales Obturantes. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.