

14
2oj.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

APLICACION DE LA PERFORACION CON
AIRE EN POZOS GEOTERMICOS.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
SERGIO HERNANDEZ ALAVEZ



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

APLICACION DE LA PERFORACION CON AIRE EN POZOS GEOTERMICOS

INDICE

CAPITULO I	INTRODUCCION	.....	4
I.1	Fenómeno geotérmico.	.....	6
I.2	Perforación de un pozo geotérmico.	.....	7
I.2.1	Primera etapa : preparación para la perforación	.....	9
I.2.2	Segunda etapa : tubería conductora	.....	9
I.2.3	Tercera etapa : tubería superficial	.....	10
I.2.4	Cuarta etapa : tubería intermedia	.....	11
I.2.5	Quinta etapa : "liner" o tubería corta	.....	11
I.2.6	Sexta etapa : inducción y desarrollo	.....	13
	Bibliografía.	.....	16
CAPITULO II	EMPLEO DEL AIRE COMO FLUIDO DE PERFORACION	.....	17
II.1	Diferencias básicas entre la perforación de un pozo geotérmico y uno petrolero.	.....	18
II.2	Aspectos generales de la perforación con aire.	.....	19
II.3	Equipo para perforación con aire.	.....	21
II.4	Perforación con aire.	.....	27
	Bibliografía.	.....	32
CAPITULO III	APLICACION DE LA PERFORACION CON AIRE EN EL MUNDO.	.....	33
III.1	Caso Nuevo México.	.....	34
III.1.1	Características de la formación.	.....	34
III.1.2	Métodos de perforación.	.....	37
III.1.3.	Primera etapa de perforación.	.....	37
III.1.3.1	Programa de tuberías.	.....	37
III.1.3.2	Programa de lodos.	.....	41
III.1.3.3	Pérdidas de circulación.	.....	41
III.1.3.4	Preventores de reventones.	.....	43

III.1.4	Segunda etapa de perforación.	.....	43
III.1.4.1	Inhibidor de corrosión.	.....	45
III.1.4.2	Balanceo del sistema aire-agua.	.....	46
III.1.5	Técnicas de terminación y cementación.	.....	48
III.1.6	Registros.	.....	49
III.2	Caso Geysers.	.....	50
III.2.1	Perforación geotérmica.	.....	50
III.2.2	Control de la corrosión.	.....	51
III.3	Caso Matsukawa.	.....	53
III.3.1	Historia y perforación en Matsukawa.	.....	53
III.3.2	Perforación con aire.	.....	54
	Bibliografía.	.....	57
CAPITULO IV APLICACION DE LA PERFORACION CON AIRE EN MEXICO.			..... 58
IV.1	Caso Primavera.	.....	59
IV.2	Caso Azufres.	.....	60
IV.2.1	Introducción.	.....	60
IV.2.2	Plan de perforación.	.....	61
	Bibliografía.	.....	68
CAPITULO V DISCUSION DE TECNICAS			..... 69
V.1	Perforación con aire-polvo.	.....	70
V.1.1	Limpieza del agujero.	.....	71
V.1.2	Erosión.	.....	71
V.1.3	Control de la corrosión.	.....	72
V.2	Perforación con niebla.	.....	73
V.2.1	Limpieza del agujero.	.....	73
V.2.2	Control de la corrosión.	.....	74
V.2.3	Determinación del gasto volumétrico de aire.	.....	75

V.3 Perforación con fluidos aireados.	.....	76
V.3.1 Técnicas de perforación con fluidos aireados.	.....	78
V.3.2 Equipo para fluidos aireados.	.....	79
V.3.3 Hidráulica.	.....	79
V.3.4 Control de la corrosión.	.....	81
V.4 Perforación con espumas.	.....	82
V.4.1 Medición del volumen de aire.	.....	83
V.5 Ventajas	.....	83
Bibliografía.	.....	87
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	88
APENDICES.	.....	91
Apéndice A	.....	92
Apéndice B	.....	99

CAPITULO I

INTRODUCCION

La creciente demanda de energía eléctrica así como su obtención mediante fuentes de energía que no sean las convencionales (nuclear, carbón e hidrocarburos) han llevado a que centremos nuestra atención hacia la energía geotérmica. En la actualidad, la geotermia es la única fuente de energía no convencional, que por su bajo costo de generación eléctrica compete con las fuentes convencionales (Alonso, 1986).

La energía geotérmica toma importancia a nivel nacional como complemento de los combustibles fósiles y de la energía nuclear para propósitos de generación eléctrica. Un aspecto muy importante que debe tomarse en cuenta, para el buen aprovechamiento de la energía geotérmica, es que su producción deba ser económicamente favorable para que los proyectos llevados a cabo resulten atractivos.

México con 650 Mw de capacidad instalada, ocupa actualmente el tercer lugar en la generación geotérmica en el mundo. El potencial probado, la amplia distribución geográfica de este recurso, así como el hecho de contar con tecnología propia y una perspectiva de integración nacional en la manufactura del equipo, son parámetros importantes para considerar a la geotermia en los programas de reconversión industrial.

Actualmente, aún no es posible contar con una cuantificación precisa sobre la disponibilidad de este recurso. La intensidad con que se han realizado los trabajos de exploración a detalle y la evaluación de yacimientos, permiten sólo estimaciones aproximadas en cuanto al potencial de generación de energía eléctrica probable y posible (Alonso, 1986).

Debido al gran avance técnico que ha alcanzado la industria petrolera, al gran despliegue de recursos financieros que se dedican en su investigación y dada su importancia económica mundial, la geotermia no ha tenido la oportunidad de desarrollarse al mismo

ritmo, por lo que aún, hoy día, se están haciendo intentos en varias partes del mundo por crear los equipos y las metodologías que puedan resolver la variedad de problemas que se encuentran en la producción de vapor.

I.1 FENOMENO GEOTERMICO.

Uno de los recursos más antiguos por su origen, pero entre los más reciente en cuanto a su aprovechamiento por el hombre, es la energía geotérmica. El calor de la tierra normalmente está localizado a grandes profundidades, pero en ocasiones se encuentra en capas cercanas a la superficie, en lugares donde la corteza terrestre está fracturada. Es precisamente a través de estas fracturas o fallas por donde el agua de las lluvias o de otro origen se filtra hasta entrar en contacto con las capas calientes, lo cual eleva su temperatura. Dicha agua tiende a subir nuevamente hacia la superficie y al encontrarse con el agua almacenada en el subsuelo, le transmite su calor.

Por medio de pozos similares a los petroleros, la energía de esas aguas subterráneas es canalizada a la superficie, donde el hombre la utiliza para generar energía eléctrica mediante turbinas impulsadas por el vapor formado por esta agua caliente. Cuando el fluido geotérmico llega a la superficie puede estar en las siguientes formas : vapor seco, líquido (agua caliente), o una mezcla de agua y vapor.

Para que el calor del subsuelo sea explotable, es indispensable que existan depósitos de agua subterránea para almacenar la energía térmica que hay en la roca y una capa impermeable que le impida su escape a la atmósfera. La acumulación de calor a altas temperaturas es mayor cuando la circulación del agua subterránea es más lenta y las rocas que la cubren tienen un gran espesor. Los pozos geotérmicos deben atravesar los estratos impermeables superiores y llegar hasta los acuíferos productores de fluidos geotérmicos. De esta manera, queda comunicada la fuente de calor con la superficie terrestre, donde el fluido es controlado por medio de un sistema de válvulas.

El agua en el subsuelo que origina el vapor por medio del calor terrestre, puede tener uno de los siguientes orígenes.

Meteórico : Agua de lluvia que cae sobre la superficie terrestre y con el paso de los años se va infiltrando, debido a la permeabilidad de la tierra, hasta encontrar una capa impermeable, en la cual se almacena formando grandes depósitos; también esta agua forma corrientes subterráneas cuando cae sobre montañas o en un nivel más alto, tomando dirección hacia otros niveles más bajos, formando algunos depósitos en el subsuelo o desembocando en el mar.

Marino : Esta agua se supone que queda atrapada a cierta profundidad debido a algún movimiento tectónico de la tierra cuando estaba sujeta a ellos frecuentemente, o por filtraciones de agua marina a zonas de más bajo nivel.

Magnético : Esta agua se origina cuando el calor endógeno (del magma), actúa sobre las moléculas del material desprendiendo el agua de cristalización que contenían, acumulándose en huecos o espacios al encontrar una capa impermeable, formando depósitos geotérmicos.

Por lo tanto 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 2000 metros (Amador, 1971).

I.2 PERFORACION DE UN POZO GEOTERMICO.

Los datos de las profundidades y los tipos de formaciones varían para cada campo en especial, en ocasiones en las diferentes áreas en las que se dividen y conforme los objetivos por alcanzar.

La Fig. 1.1 muestra un diagrama del equipo utilizado en la perforación de un pozo geotérmico.

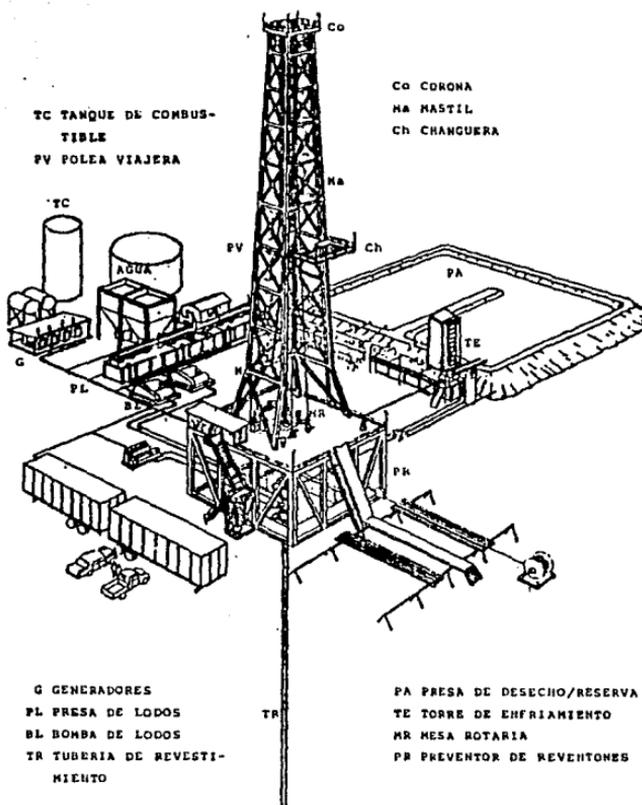


Fig. 1.1 Equipo utilizado en la perforación de un pozo geotérmico.

I.2.1 PRIMERA ETAPA : preparación para la perforación.

En el sitio definido para la perforación, se construye una plataforma de terracería de 70 por 60 m y un camino de acceso. Sobre la plataforma se coloca el equipo bien centrado en el punto donde quedará el agujero.

Antes de iniciar la perforación se hace un "contrapozo", (fosa rectangular con 3.0 m de largo, 2.0 de ancho y 1.50 de profundidad que se refuerza con cemento de 20 cm. de espesor, ver Fig. 1.2.a), para facilitar la instalación y operación de los equipos para controlar el pozo. (preventores, válvula maestra, etc.).

Después de terminado el contrapozo, se prepara el fluido de perforación y posteriormente se construyen dos agujeros auxiliares de diámetro pequeño y poca profundidad : un agujero que sirve para guardar el "kelly" y otro que sirve para contener la tubería durante conexiones rápidas. Ya terminados se procede a perforar en seco un agujero de 40 pg de diámetro y de 4 a 10 m de profundidad.

Se introduce el primer tramo de tubería con diámetro de 30 pg, éste es cementado llenando el espacio anular por gravedad. En la parte superior de la tubería se le fija una línea de flujo de manera que actúe como difusor del flujo de lodo y completando así un sistema de circulación cerrado.

El objetivo principal es evitar la erosión y/o la inundación del pozo en la base del equipo y proporcionar un conducto para controlar el fluido de perforación a la superficie a medida que se va perforando.

I.2.2 SEGUNDA ETAPA : tubería conductora.

Esta tubería se introduce para proteger el pozo de fallas que se presentan generalmente cerca de la superficie, filtraciones de agua de los mantos superficiales y evita que se contaminen estos últimos con los fluidos de perforación. Además sirve para soportar formaciones no consolidadas.

Se inicia la perforación empleando fluido de perforación y barrena de 12 ¹/₄ pg, hasta una profundidad de 50 m, posteriormente se utiliza el ampliador de 20 pg con barrena piloto de 12 ¹/₄ pg, para ampliar el agujero o "rebajar", hasta la misma profundidad. Una vez hecho esto, se introduce un ampliador de 26 pg, con una barrena piloto de 20 pg (ver Fig. 1.2.b y 1.2.c): quedando así listo el pozo para introducir la tubería de revestimiento con diámetro de 20 pg. La cementación del espacio anular se realiza empleando la tubería de perforación (ver Fig. 1.2.d).

Terminando el tiempo de fraguado (periodo necesario para que se endurezca el cemento), se hace una prueba hidráulica, que consiste en aplicar 100 lb/pg² de presión durante 30 minutos. Esta prueba se realiza después de cada cementación con el fin de detectar algún defecto.

I.2.3 TERCERA ETAPA : tubería superficial o de anclaje.

Se corta el excedente de la tubería conductora en la superficie para instalar el sistema de preventores. Después se rompe el cemento en el fondo del pozo con barrena de 17 ¹/₂ pg, para seguir perforando con barrena de 12 ¹/₄ pg, hasta la profundidad aproximada a los 1000 m, posteriormente con ampliador de 17 ¹/₂ pg y barrena piloto de 12 ¹/₄ pg se rebaja el agujero hasta la misma profundidad (ver Fig. 1.2.e y 1.2.f). Se corren registros de temperatura y presión, se introduce la tubería de revestimiento de 13 ⁹/₈ pg: se cimenta el espacio anular hasta la superficie (ver Fig. 1.2.g).

Se coloca el equipo para prevención de reventones en la boca del pozo y después que el cemento ha fraguado, se aplica la prueba hidráulica.

En esta etapa el objetivo es evitar atrapamientos de la tubería de perforación. Sobre esta l.R. de 13 ⁹/₈ pg se colocan equipos para controlar el pozo durante la perforación y posteriormente las válvulas y conexiones que controlan el flujo durante su vida productiva.

I.2.4 CUARTA ETAPA : tubería intermedia.

Se perforan los accesorios de la cementación y se continua la perforación con la barrena de 12 ¹/₄ pg. hasta la profundidad de 2000 m. (ver Fig. 1.2.h y 1.2.i).

Antes de cementar se corren registros de temperatura y presión. Se introduce la tubería de revestimiento con diámetro de 9 ⁵/₈ pg y se realiza la operación de cementación en dos etapas, conforme a las condiciones de las formaciones (ver Fig. 1.2.j y 1.2.k).

Después de fraguado el cemento se le aplica la prueba hidráulica. Esta tubería tiene el objeto de conducir el fluido geotérmico desde la tubería de producción hasta la superficie, aisla zonas arenosas o de arcilla hidratable, además aisla acuíferos profundos que ocasionan corrosión en la tubería de producción.

I.2.5 QUINTA ETAPA : "Liner" o tubería corta.

En esta etapa se continua la perforación con barrena de 8 ¹/₂ pg. hasta la zona productora (2000 - 3000 m de profundidad) esta es la etapa más delicada ya que se atraviesan zonas de alta temperatura con el fin de encontrar una permeabilidad apropiada que soporte económicamente la explotación del yacimiento geotérmico (ver Fig. 1.2.l).

Se toman los registros de presión y temperatura y posteriormente se coloca un colgador del cual quedara suspendido el liner de 7 pg. desde unos 80 m arriba de la zapata de 9 ⁵/₈ pg. hasta el fondo del pozo; por último se cimenta el espacio anular entre la I.R. de 9 ⁵/₈ pg y el liner de 7 pg.

Esta tubería tiene unas perforaciones frente a la zona productora con la finalidad de permitir el flujo de vapor y/o salmuera geotérmicos desde el fondo del pozo hasta la tubería intermedia y aislar la zona productora evitando flujos desde y hacia otras formaciones (ver Fig. 1.2.m).

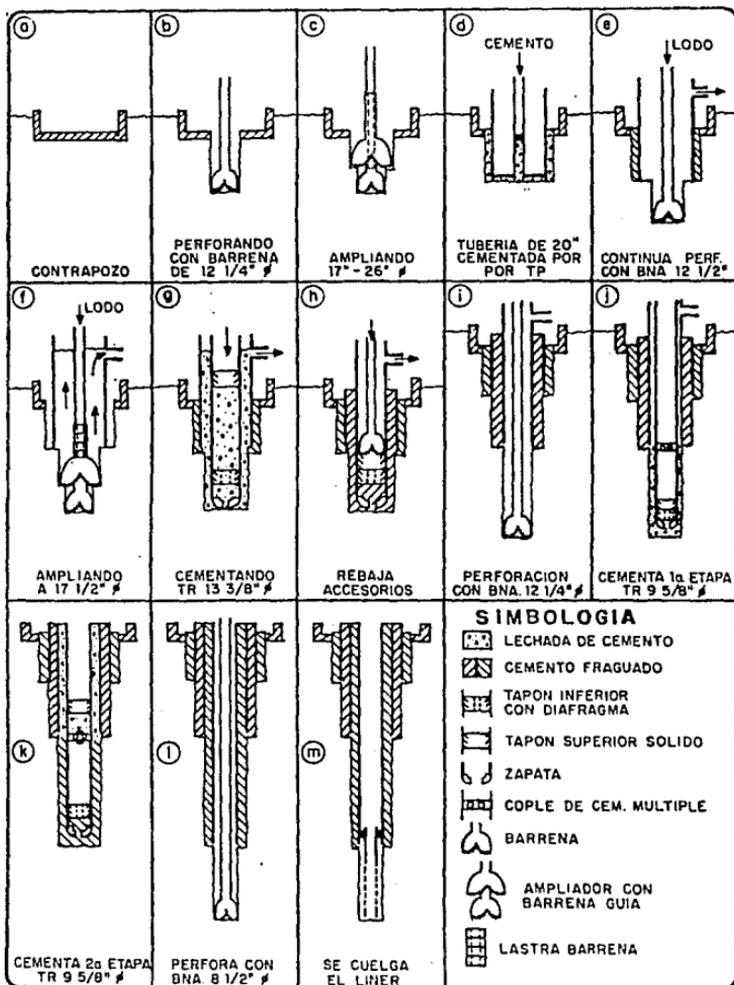


Fig. 1.2 Perforación de un pozo geotérmico

La Fig. 1.3 muestra un diagrama con las tuberías de revestimiento de un pozo geotérmico.

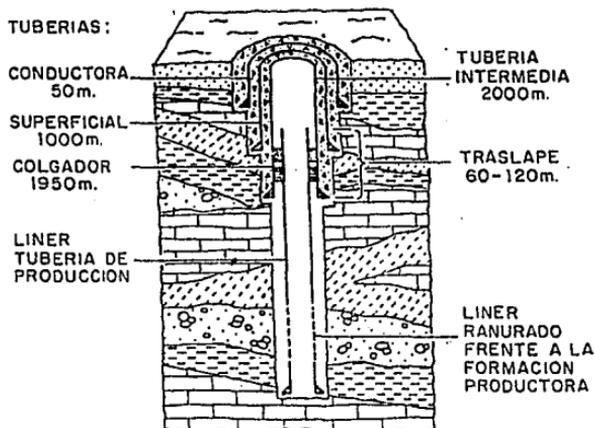


Fig. 1.3 Tuberías de revestimiento de un pozo geotérmico

I.2.8 SEXTA ETAPA : inducción y desarrollo.

Terminadas las operaciones anteriores se retira el equipo de perforación, se coloca la válvula maestra y se instalan los equipos necesarios para registrar presión, temperatura y dilatación de la tubería en la superficie, ver fig. 1.4, entonces el pozo atraviesa una serie de etapas que nos permiten conocer sus características de producción; estas son :

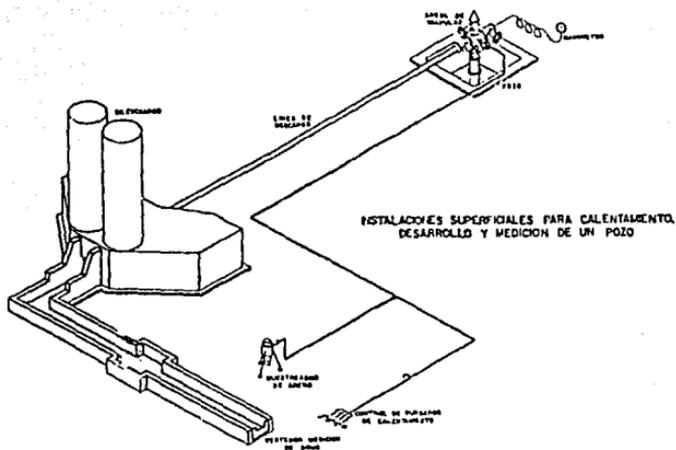


Fig. 1.4 Instalaciones superficiales para calentamiento, desarrollo y medición de un pozo.

Observación : En esta etapa se corren registros de presión y temperatura, a lo largo del pozo, mientras este se calienta lentamente hasta alcanzar la temperatura del yacimiento. En esta etapa se identifican los estratos calientes y fríos del pozo.

Inducción : En aquellos pozos que no llegan a fluir por sí mismos se requiere algún método para provocar el flujo, las técnicas utilizadas en geotermia son : presurización con gases, empleo de agentes tensioactivos e inyección de aire.

Calentamiento y desarrollo : El objetivo es medir y calibrar gradualmente el pozo, haciéndolo fluir a través de tuberías con diámetros diferentes, desde 1 pg hasta 10 pg, es importante iniciar esta prueba lo más pronto posible después de terminar la perforación para así evitar problemas de corrosión en las tuberías.

Evaluación : En esta etapa se realizan mediciones del fluido descargado por el pozo a diferentes presiones con lo que se determinan sus curvas características de producción. Finalmente se realizan las conexiones del pozo a la central o a una planta generadora a boca de pozo.

La perforación geotérmica presenta una fuerte problemática debido a las condiciones extremadamente severas a las que se enfrenta, para esto se requiere tener un buen sistema de lodos. Es conveniente mencionar que el costo en el sistema de lodos representa entre el 6 y el 8 % del costo total del pozo (Morales y Santoyo, 1986).

Los fluidos de perforación convencionales son una de las principales herramientas en la perforación de pozos profundos, tanto petroleros como geotérmicos, pudiéndose decir con certeza, que sin el auxilio de la moderna técnica de los lodos de perforación, habría sido imposible alcanzar las grandes profundidades en los pozos actuales, sobre todo en los petroleros.

Actualmente, para perforar pozos geotérmicos, los fluidos de perforación utilizados, son lodos bentoníticos emulsionados para atravesar todas las zonas que preceden a las formaciones productoras y agua cuando se perfora la zona fracturada con posibilidades de obtener producción de vapor.

Como un intento por mejorar las técnicas de perforación en la búsqueda de vapor con fines de generación eléctrica, se está tratando de cambiar el empleo de fluidos convencionales por el empleo de aire a presión para mejorar las condiciones de producción, reducir el daño causado a la zona productora y obtener reducciones significativas en los costos de operación. El presente trabajo tiene como finalidad mostrar la aplicación del aire como fluido de perforación en pozos geotérmicos, así como mostrar la factibilidad de usar esta técnica en México.

BIBLIOGRAFIA

* Alonso, H.E., "Estado actual de la geotermia en México", Comisión Federal de Electricidad, 1986.

* Alonso, H.E., "Actuales perspectivas de desarrollo en México", Segunda Conferencia IIE-EPRI, sobre programas de Geotermia, 1985.

* Morales, R.M., Santoyo-Gutierrez, S., "Análisis de costos en la construcción de pozos geotérmicos. Parte I : Influencia en la generación de electricidad", Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1986.

* Morales, R.M., Arriola Reyna., "Construcción de pozos geotérmicos", Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1986.

* Amador, H.M., "Cimentación de pozos geotérmicos", Tesis profesional, UNAM, 1991.

CAPITULO II

EMPLEO DEL AIRE COMO FLUIDO

DE PERFORACION

II.1 DIFERENCIAS BASICAS ENTRE LA PERFORACION DE UN POZO GEOTERMICO Y UN PETROLERO.

El procedimiento a seguir, el equipo y las herramientas empleadas durante la perforación de un pozo geotérmico, son semejantes a los empleados en pozos petroleros.

A continuación se enumeran las diferencias básicas que existen entre la perforación de un pozo geotérmico y un pozo petrolero.

A.- Temperatura : En un pozo petrolero se encuentran temperaturas en el orden de 40 a 180 °C, dependiendo de la profundidad del pozo, ya que el gradiente geotérmico es de aproximadamente 30 °C/km, mientras que un pozo geotérmico se encuentran temperaturas hasta de 360 °C con gradientes geotérmicos que van desde 30 hasta 200 °C/km.

B.- Fluidos de perforación : Debido a las altas temperaturas existentes en la perforación de un pozo geotérmico, se deben usar lodos de una composición especial para evitar su degradación y mantener condiciones óptimas de operación como son: un buen acarreo y suspensión de los recortes procedentes de la formación, filtrado controlado, estabilidad del agujero, enfriamiento y lubricación de la sarta de perforación entre otros.

En los pozos petroleros se usan lodos para temperaturas máximas de 180 °C, las funciones de estos lodos son similares únicamente que el pozo petrolero no presenta las altas temperaturas de un pozo geotérmico. Puesto que las altas temperaturas en los lodos aumentan la deshidratación y propician su descomposición ocasionando un aumento en la viscosidad y en la gelatinosidad. Para evitar estas anomalías, se les añaden sustancias químicas que impidan dicha deshidratación.

C.- Equipo : En la perforación de pozos geotérmicos, se emplean torres de enfriamiento con mamparas para disminuir la temperatura alcanzada por los lodos durante su ciclo (viaje a través del pozo); esta disminución en la temperatura depende del tamaño de la torre y de la capacidad en el ventilador de la misma.

En la perforación de pozos petroleros no son necesarias las torres de enfriamiento, ya que no existen altas temperaturas como en los pozos geotérmicos.

D.- Diámetros de producción : En los pozos petroleros los diámetros de producción varían generalmente desde 2 1/2 hasta 2 7/8 pg, mientras que en los geotérmicos se necesitan diámetros desde 7 hasta 13 pg.

En ambos casos las válvulas usadas en la terminación de los pozos tienen el mismo diámetro que las tuberías de producción.

E.- Cementaciones : En los pozos petroleros, las primeras tuberías de ademe son cementadas usando cemento común y tipo "G" en la tubería más profunda. En los pozos geotérmicos, las tuberías de anclaje, ademe y producción se cementan en toda su longitud usando cemento tipo H ó J estabilizado con sílice, retardadores y otros aditivos.

La cementación de pozos petroleros no presenta el problema de elongación de la tubería ni tampoco el rompimiento del empaque por cambios en su composición debido a las altas temperaturas a las que están expuestos los lodos y el cemento.

II.2 ASPECTOS GENERALES DE LA PERFORACION CON AIRE.

Dentro de la problemática técnica que constantemente se presenta durante la perforación geotérmica exploratoria en el eje neovolcánico, está el conservar lo más limpio posible las zonas

productoras, principalmente cuando se tienen fracturas pequeñas, a través de las cuales pudiera haber alguna aportación de vapor o agua caliente que incremente la producción del pozo. Cuestión que hasta la fecha no se ha logrado debido a que la técnica de perforación empleada ha venido empleando fluidos convencionales como son los lodos bentoníticos emulsionados.

Se ha observado que al encontrar alguna fractura grande (teniendo aún lodo en la columna) y presentarse una pérdida parcial o total de circulación, el lodo que se pierde obtura parcial o totalmente este posible conducto de flujo, y si la fractura es pequeña, en ocasiones ni siquiera se nota durante la perforación normal, solamente se han podido identificar cuando se toman los registros finales del pozo.

Por otro lado, si la perforación se realiza con agua, no se tienen las características reológicas tixotropicas requeridas para acarrear y suspender los recortes de la formación, por lo que éstos son "remolidos" varias veces, reduciendo su tamaño hasta quedar finamente divididos.

Este material fino, como viaja hacia la superficie con una velocidad relativamente baja, se deposita en esas pequeñas fracturas, obturandolas temporal o definitivamente, con la consecuente reducción en la producción de vapor del pozo.

Debido a lo anterior e intentando mejorar las técnicas de perforación, en la búsqueda de vapor endógeno con fines de generación eléctrica, se están cambiando los fluidos de perforación convencionales por el empleo de fluidos aerados o en su defecto por aire comprimido para mejorar las condiciones de producción; al reducir el daño causado a la formación productora y aumentar la velocidad de penetración con lo cual se reducen costos de operación.

Para poder realizar una planeación óptima de un programa de perforación con aire, se deberá contar con una amplia información del sitio donde se va a perforar. Dicha información deberá incluir datos geológicos y los historiales durante la perforación de los pozos ya

existentes en la zona, dicha información debe ser lo más confiable posible.

Los puntos principales que deberá contener esta información serán:

- Zonas con flujo de fluidos.
- Formaciones por atravesar.
- Correlaciones con pozos vecinos.

Hecho una vez un buen programa de perforación y llevado a cabo de manera eficiente obtendremos las siguientes ventajas:

- Bajo costo por pozo.
- Mayor velocidad de penetración.
- Mayor vida en las barrenas.
- Mejor control en las zonas con pérdida de circulación.
- Daño mínimo a la formación.
- Mayor limpieza de la zona productora.
- Menor costo en el fluido de perforación.

Los flujos de agua y gas, los derrumbes en el agujero y las formaciones débiles ocasionarán problemas y harán que la eficiencia del aire se vea reducida, por lo que hay que contemplar otras alternativas, es por ello que en el programa de perforación se deberán incluir las técnicas para controlarlos.

II.3 EQUIPO PARA PERFORACION CON AIRE.

Cuando se desea perforar con aire, se deberá de instalar equipo adicional, el cual consiste de lo siguiente:

A. Compresores: el número de compresores dependerá de los volúmenes y presiones de aire que circularán en el pozo; por lo general son 3 y su colocación debe ser como se muestra en la Fig. 2.1.

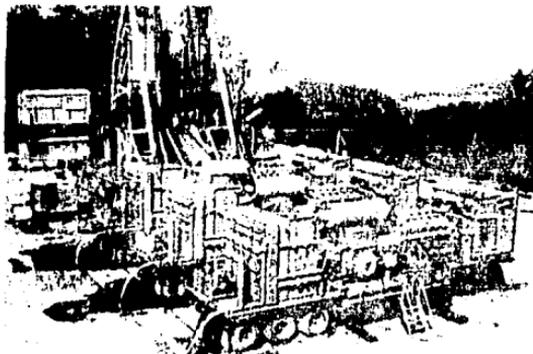


Fig. 2.1 Compresores para el equipo de perforación.

Los compresores de aire son recíprocos, con doble acción, en cuatro etapas y con desplazamiento positivo (pistones), con capacidad para descargar 1550 pies³/min (43.89 m³/min) a una presión de trabajo de 1250 lb/pg² (87.88 kg/cm²) acoplado directamente a un motor diésel de 12 cilindros, con potencia nominal de 800 H.P., montado sobre su misma estructura, tiene un sistema para enfriamiento de aire a través de radiadores especiales y otro para eliminar la humedad en el aire comprimido, así como un generador eléctrico para su servicio.

B.- Portadifusor : es una pieza que se instala en el cabezal del pozo, como puede verse en la Fig. 2.2, sobre los preventores normales de operación, y su función principal es la de desviar el flujo de aire que sale del pozo para que descargue directamente en el silenciador recuperador de muestras (Fig. 2.3).

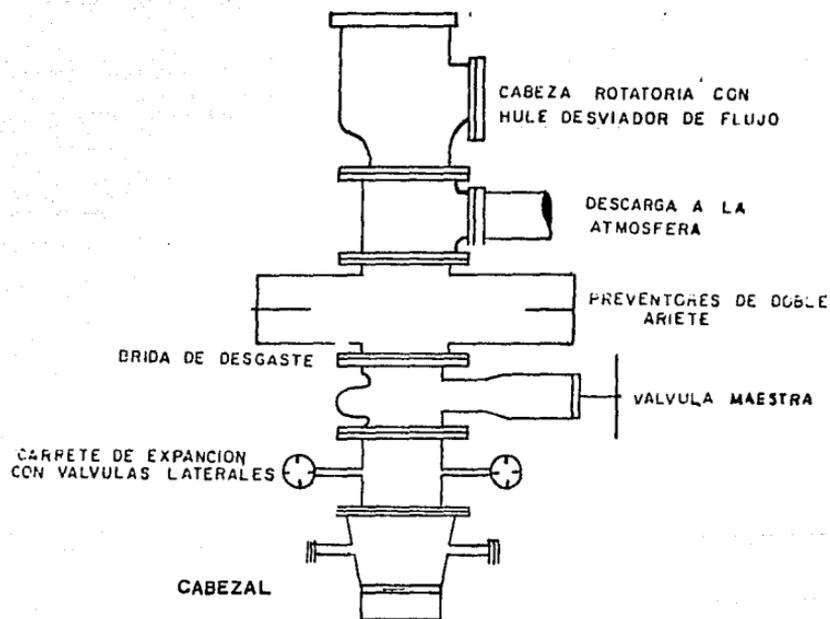


Fig. 2.2 Conexiones superficiales

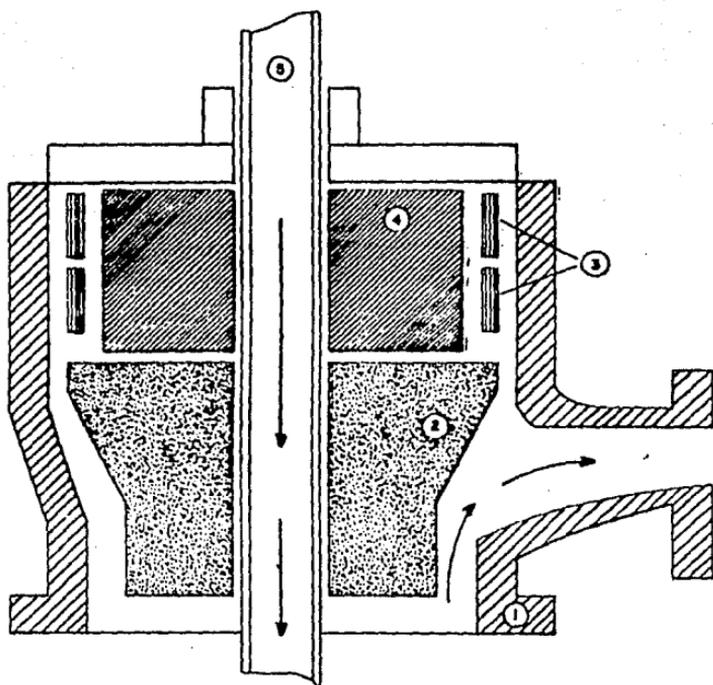


Fig. 2.3 Silenciador recuperador de muestras.

Esta cabeza consta de un elemento de hule que hace un sello con la sarta de perforación o con el "kelly" permitiendo así operar dentro de determinados rangos de presión, con diferentes diámetros de tuberías y lastrebarrenas. Este elemento está fijo a una camisa rotatoria, la que gira contra unos baleros que están alojados en el cuerpo del desviador de flujo. Finalmente tiene un cuerpo principal que se acopla tanto a la forma como al tamaño de la flecha, así como a un cuadro que está en la camisa rotatoria, permitiendo así girar libremente, a la misma velocidad (Fig. 2.4).

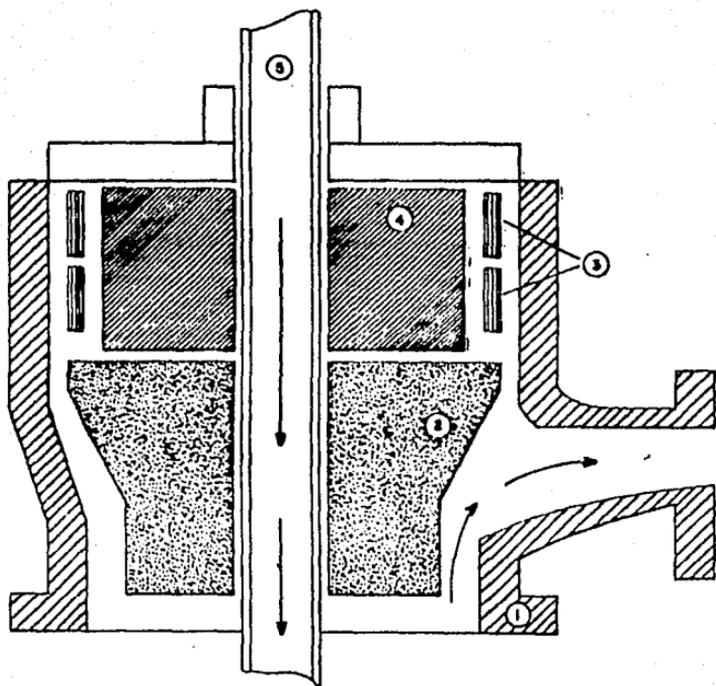
C.- Bomba inyectora : para la inyección de espumas e inhibidores de corrosión, con sus respectivos tanques dosificadores.

D.- Alarma de presión : se coloca cerca del perforador una alarma para indicar cualquier incremento peligroso en la presión de inyección (dicho incremento deberá ser de aproximadamente 5 Kg/cm²), que es una indicación de la posible presencia de un problema.



- 1 Cuerpo
- 2 Mule intercambiable
- 3 Sistema de rodamiento
- 4 Buje de transmisión
- 5 Kelly o flecha

Fig. 2.4 Diagrama de la cabeza rotatoria.



- 1 Cuerpo
- 2 Hule intercambiable
- 3 Sistema de rodamiento
- 4 Suje de transmisión
- 5 Kelly o flecha

Fig. 2.4 Diagrama de la cabeza rotatoria.

E.- Humidificador: consiste de una tubería conectada a la línea de descarga, mediante el cual se inyecta agua con el fin de que no se formen nubes de polvo que puedan dificultar las labores del personal (Fig. 2.5).

E.- Muestreador: para poder obtener muestras de los recortes de formación, este muestreador se coloca antes del humidificador sobre la misma línea de descarga.

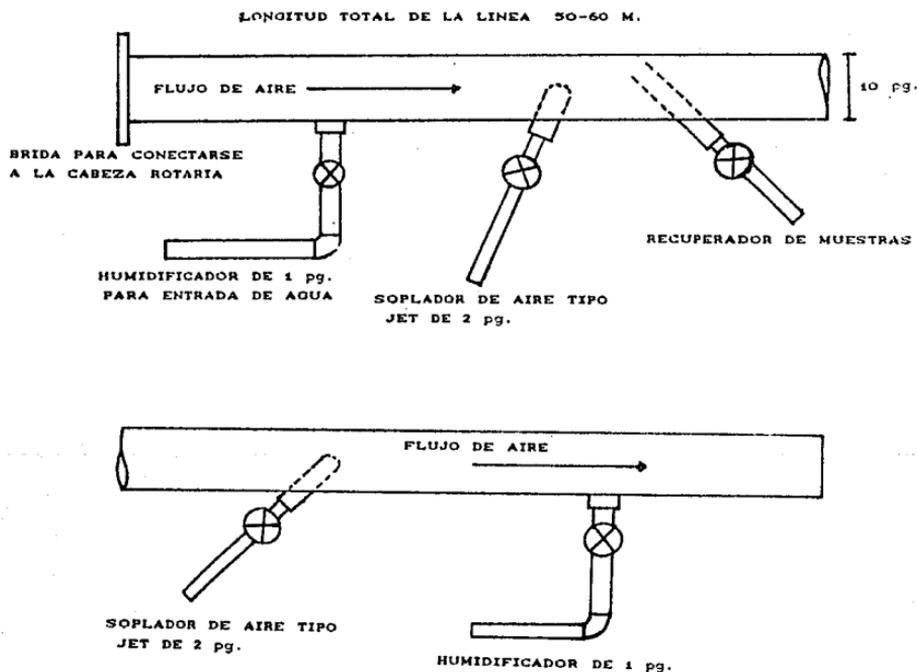


Fig. 2.5 Diagrama de la línea de flujo de aire a la atmósfera

II.4 PERFORACION CON AIRE.

Como puede apreciarse en el diagrama de la Fig. 2.6, todo el sistema de flujo de aire, está conectado al sistema convencional de circulación de lodo, por lo tanto, dependiendo de las condiciones que se van encontrando durante la perforación se pueden utilizar indistintamente el lodo de perforación normal, el aire o una mezcla de ambos, teniendo así tres diferentes sistemas de perforación. El resto del equipo de perforación, así como las tuberías, lastrabarreras y barrenas, son las mismas que se emplean en la perforación convencional. Como aditamentos auxiliares en la perforación con aire, se debe mencionar que en la sarta de perforación se deben instalar una o varias válvulas de flotación, con el fin de impedir que la tubería se descomprima ahorrando tiempo durante las conexiones y además si hay algún posible bruto de gas o vapor impedir que estos puedan fluir por dentro de ella.

Un componente importante en la instalación de la descarga de aire, durante la perforación, es la línea de flujo que descarga los recortes arrastrados con el fluido de perforación hasta la superficie; esta deberá ser recta para evitar la erosión causada por la abrasividad de los recortes y tiene entre 7 y 10 μ g de diámetro. También tiene dos conexiones de aire y una de agua; Las primeras son para desalojar posibles asentamientos en el interior de la línea y la de agua se utiliza para humedecer el polvo y así evitar contaminación. En la Fig. 2.6 se muestra el diagrama de dicha línea.

Se puede considerar que la perforación con aire, nació de las observaciones efectuadas tanto en los trabajos realizados por los mineros que empleaban este método para extraer canteras, así como las experiencias que fue dejando la perforación con lodo. En lo que a la densidad se refiere, cuando por alguna necesidad se tenía que aumentar el peso del lodo, inmediatamente se observaba una disminución en la velocidad de penetración, dado que desde el punto de vista ideal, una roca se fractura más fácilmente cuando tiene sobre ella la mínima carga posible, es decir, cuando sólo la afecta

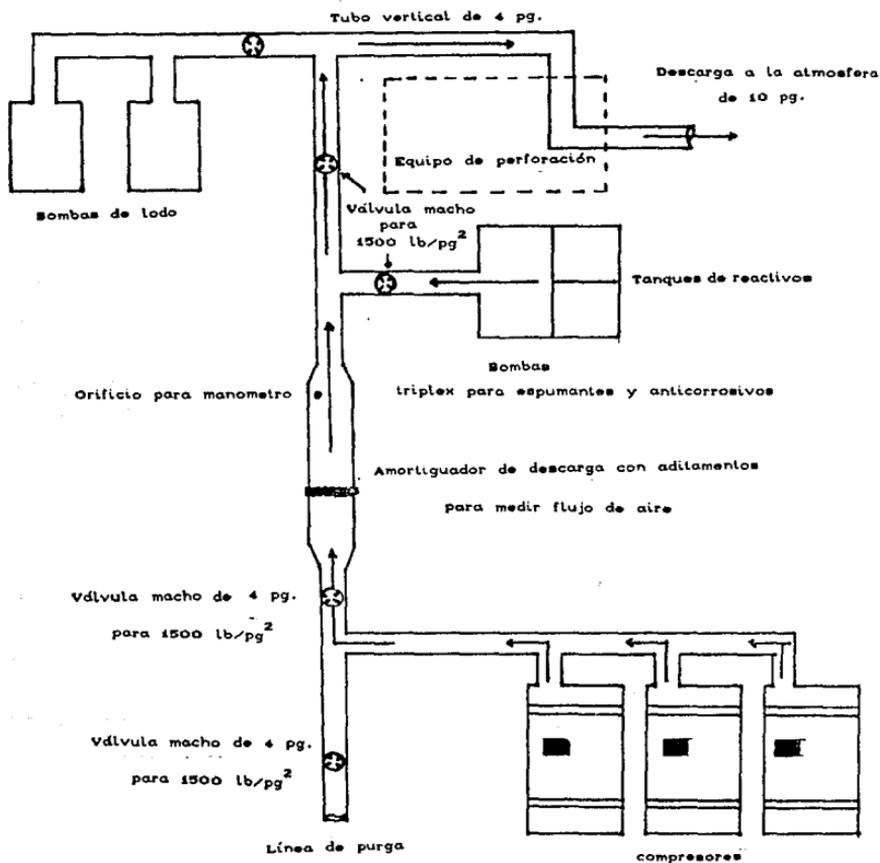


Fig. 2.6 Diagrama de flujo para la perforación con aire

la presión atmosférica. Otro efecto muy importante que rige la alta velocidad de penetración es el hecho de que la presión de formación en el fondo del pozo siempre es mayor que la presión atmosférica, por lo que la roca prácticamente "estalla" cuando es afectada por los esfuerzos del peso y la rotación de la barrena.

El siguiente paso fue el desarrollo de un lineamiento técnico, que sirviera de base para manejar las diferentes condiciones de flujo que debe tener la perforación con aire, en determinado momento y ante diferentes condiciones, para arrastrar hasta la superficie los recortes de la perforación ya que no se cuenta con el auxilio que proporciona la tixotropía de los lodos convencionales.

Volviendo nuevamente a la experiencia de la perforación minera, y confirmando con pruebas de laboratorio, resultó que el único parámetro que podía utilizarse era la velocidad del aire en el espacio anular, teniendo un valor mínimo de 3000 pies/min. que como se ve, es altísima si se compara con la velocidad de ascensión entre 100 y 120 pies/min. que se emplea en el sistema convencional. Estas velocidades mínimas fueron el resultado de los estudios realizados por los señores Bruce y Williams.

Otro aspecto muy importante, es determinar el volumen de aire se necesita para perforar y conservar las velocidades anulares mínimas recomendables. Sin embargo, este varía principalmente con la profundidad del pozo, la velocidad de penetración, el diámetro en la tubería de perforación, el diámetro del agujero, el tipo y la densidad de la formación atravesada. A continuación se presenta la expresión para calcular el gasto de aire necesario [Reyes, 1987].

$$G = Aa \left[\frac{4g \cdot Lp \cdot \rho_p \cdot S \cdot F}{3 \cdot Ca \cdot 53.3 \cdot T} \right]^{1/2}$$

Donde :

G = Gasto de aire, lb/seg.

Aa = Área del espacio anular, pies².

g = Aceleración de la gravedad, pies/seg².

- d_p = Diámetro de la partícula, pies.
- ρ_p = Densidad de la partícula, lb/pie³.
- S = Peso específico del aire, adim.
- P = Presión en cualquier punto, lb/pie².
- C_a = Coeficiente de arrastre del aire, adim.
- T = Temperatura, °K

La deducción de esta ecuación se presenta en el apéndice A.

De acuerdo a la fórmula anterior, la cantidad de aire requerida es una función de la presión, y esta varía de acuerdo a la densidad del fluido en determinado punto, la cual cambia si el medio es húmedo y/o si está caliente.

Otro investigador, el Sr. R.R. Angel dió la siguiente fórmula para determinar la presión en cualquier punto [Angel, 1958].

$$P = \rho_m \left[\frac{g}{g_c} + \frac{f v^2}{2 g_c (D_h - D_p)} \right] * H$$

donde :

- P = Presión en cualquier punto, lb/pie²
- ρ_m = Densidad del aire, lb/pie³
- g = Aceleración de la gravedad, 32.2 pies/seg².
- f = Factor de fricción, adimensional
- v = Velocidad de flujo, pies/seg.
- D_h = Diámetro del agujero, pies
- D_p = Diámetro de la tubería, pies
- H = profundidad del pozo, pies

También es sabido que las partículas o recortes dentro del pozo, por sus propiedades físicas, tienen una caída hacia el fondo, por lo que para poder levantarlas se tendrá que tener una velocidad de flujo más alta que la velocidad de la partícula, de lo anterior se ha deducido la siguiente fórmula :

$$V_s = \left[\frac{4g D_p \rho_p}{3 C_a \rho_f} \right]^{1/2}$$

donde :

V_s = Velocidad de deslizamiento de la partícula, pies/seg.

g = Aceleración de la gravedad, pies/seg².

D_p = Diámetro de la partícula, pies

ρ_p = Densidad de la partícula, lb/pie³

ρ_f = Densidad del fluido, lb/pie³

C_a = Coeficiente de arrastre, adimensional

El coeficiente de arrastre en el aire, que es la tercera condición necesaria para tener una buena limpieza dentro del agujero, se puede definir como la fuerza de fricción que ejerce el fluido alrededor de la partícula y se expresa en términos de esfuerzo cortante para calcular el coeficiente de arrastre, se emplea la siguiente fórmula :

$$C_a = \frac{2 F g_c}{\rho_f V_s^2 A_p}$$

donde :

C_a = Coeficiente de arrastre, adimensional

F = Fuerza de fricción, adimensional

A_p = Área de la partícula, pies²

g_c = Constante de conversión, 32.2 pies/seg².

ρ_f = Densidad del fluido, lb/pie³

V_s = Vel. de deslizamiento de la partícula, pies/seg.

Con lo anteriormente descrito, se puede concluir que, para cada estrato y columna geológica esperada, se deben calcular su velocidad de asentamiento, el coeficiente de arrastre del fluido en base a su densidad, la presión en el punto crítico de acumulación de recortes y finalmente el volumen de aire requerido para la perforación a cualquier profundidad.

BIBLIOGRAFIA

* "Fluidos de perforación de pozos geotérmicos". Lodos y cementos IIE. División fuentes de energía.

* Reyes, S. H., "Perforación en rocas volcánicas empleando aire como fluido de perforación", CFE, 1987.

* Frias, M. J., "Fluidos de perforación geotérmica", Instituto Tecnológico Regional de Culiacán, Tesis, 1981.

* "1^ª Reunión Interdisciplinaria de Actividades sobre el Campo Geotérmico de los Azufres, Mich.", IIE-CFE., 1983.

* Angel, R.R., "Volume Requirements for Air and Gas Drilling". Gulf Publishing Company, 1958.

CAPITULO III

APLICACION DE LA PERFORACION

CON AIRE EN EL MUNDO

Perforar con aire, niebla o espuma en vez de fluidos convencionales se ha hecho con éxito en algunas áreas del mundo. La economía favorece el uso de estos medios alternos de perforación cuando se atraviesan formaciones duras con poco flujo de agua a profundidades bajas. El uso de aire, espuma y niebla ha tenido éxito en Nueva Zelanda, Estados Unidos, Japón y en otras partes del mundo.

A continuación se presenta la experiencia que se ha tenido en algunos lugares al utilizar estos fluidos de perforación.

III.1 CASO NUEVO MEXICO.

A continuación se describen los métodos que actualmente son usados para perforar, terminar y mantener pozos geotérmicos en Baca, Nuevo México. La Fig. 3.1 muestra la localización general del campo "Baca" (Dondanville, 1978).

III.1.1 Características de la formación.

Para poder comprender estos métodos de perforación y terminación se requiere un conocimiento general de la geología y las características de los fluidos (Dondanville, 1978). La Fig. 3.2.a y 3.2.b muestran una gráfica de presión y temperatura vs profundidad (Union Oil y Public Service, 1970).

La mayoría de los pozos que se localizan en Baca tienen tuberías de revestimiento colocadas en la parte superior de la anomalía termal en la toba "Bandalier" y producen desde ella o en una combinación con Andesita. De esta forma se tiene que los mejores pozos producen desde fracturas naturales en la toba Bandalier y/o Andesitas.

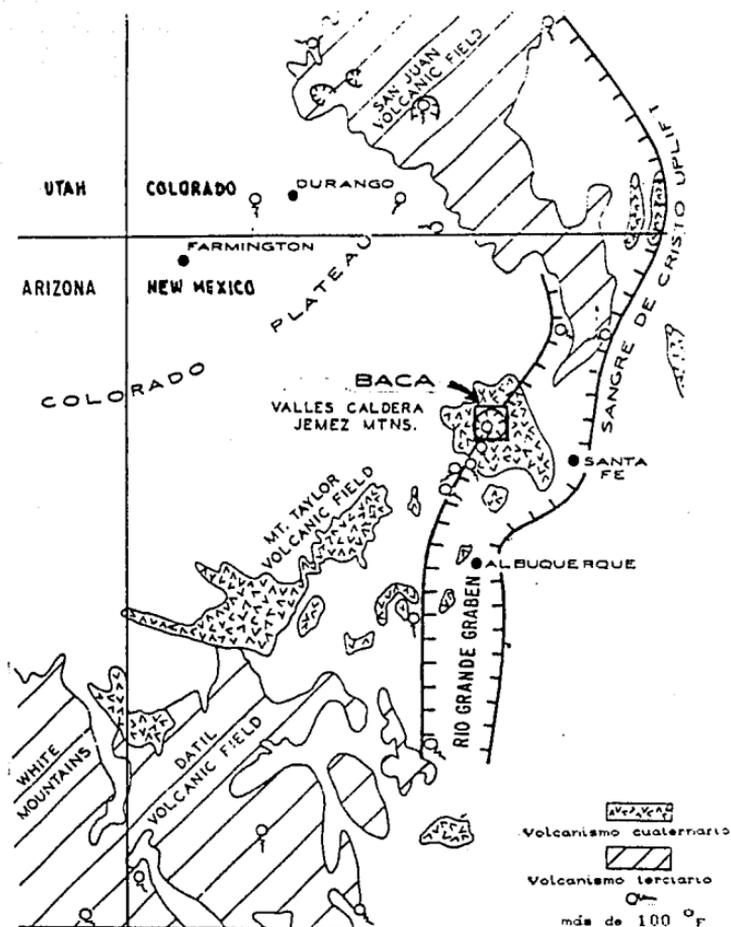


Fig. B.1 Localización general del campo " Baca ", N. M. USA.

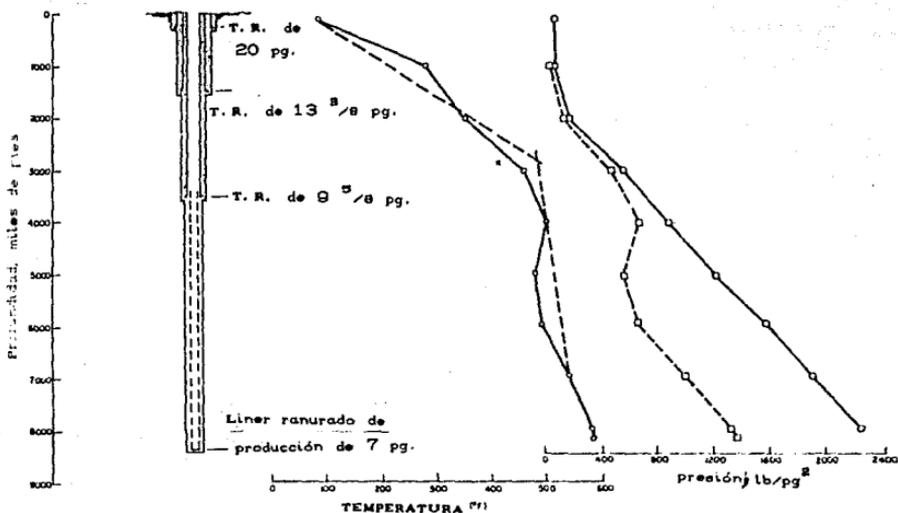


Fig. 9.2. Presión vs profundidad en un pozo Boca.

Las gráficas de presión y temperatura vs profundidad muestran que el yacimiento está depresionado, comparándolo con la presión hidrostática, entre 600 y 900 lb/pg² (la presión en el yacimiento es 1200 lb/pg² a 4500 pies sobre el nivel del mar). La depresión, no obstante la condición del agua dominante en el yacimiento resulta en severos problemas de pérdida de circulación, esta es la razón por la cual se empezó a usar fluido de perforación asistido con aire.

Afortunadamente, el agua producida es relativamente benigna químicamente. La tabla 3.1 y 3.2 (Union Oil y Public Service, 1978) muestra un análisis químico general del agua producida. El agua producida es la fuente primaria de agua para el equipo perforador y la única fuente de agua para el lodo de perforación. Los pozos productores por sí mismos han experimentado muchos problemas, sin embargo se tiene un ejemplo de incrustación por carbonato de calcio.

III.1.2 Métodos de perforación.

La perforación de los pozos se divide en dos etapas : I) Desde la superficie hasta la última tubería de revestimiento cementada y II) Desde la última tubería de revestimiento cementada hasta la profundidad total. En estas dos etapas de perforación se utilizaron dos técnicas diferentes para resolver los problemas de "circulación pérdida", estas técnicas fueron : en la sección I, se trabajó hacia eliminar las pérdidas de circulación, mientras que en la sección II (zona productora), la preocupación fue no dañar las zonas con pérdida de circulación.

III.1.3. Primera etapa de perforación.

En esta etapa se perfora desde la superficie hasta tocar el yacimiento y se coloca la última tubería de revestimiento cementada.

III.1.3.1 Programa de tuberías.

En la Fig. 3.3 mostramos un esquema de la terminación en el agujero. Los pozos son generalmente perforados inicialmente en riolitas o relleno de la caldera. Un agujero de 17 ¹/₂ pg es perforado con lodo desde los 200 hasta los 500 pies y después se amplía a 26 pg. Una vez colocada y cementada la tubería de revestimiento de 20 pg cerca de los 1500 pies, un agujero de 17 ¹/₂ pulg. se perfora. Se coloca y se cementa la tubería de revestimiento de 13 ³/₈ pg.

** TABLA 3.1 **

COMPOSICION QUIMICA PROMEDIO DEL FLUIDO PRODUCIDO

	Salmuera sin corrección por flash		Condensados	
	promedio	No. muestras	promedio	No. muestras
pH	7.2	26	4.5	2
Sólidos susp., mg/l	819	13	4.9	16
Sólidos tot. disueltos, mg/l	6093	24	29	21
SiO ₂ , mg/l	599	40	29	21
CO ₃ ²⁻	19	27	0	20
HCO ₃ ⁻	127	26	6.6	19
S ²⁻	2	15	8.6	1
SO ₄ ²⁻	64	23	1.8	17
Cl ⁻	3061	43	17	25
Na	1749	43	6	23
K	370	43	1.4	23
Ca	15	42	0.4	19
Mg	0.3	21	0.2	21
Ba	0.05	6	0.04	7
B	23	26	0.8	21
F	6	21	< 0.2	8

TABLA 3.1

**** TABLA 3.2 ****

PROMEDIO DE GAS QUIMICAMENTE NO CONDENSABLE
GASES NO CONDENSABLES EN FASE VAPOR
2.51 % EN PESO (29 MUESTRAS)
1.04 % EN VOLUMEN

	PROMEDIO EN PPM POR PESO	PROMEDIO EN PPM POR PESO	MUESTRAS
CO ₂	28,254	11,978	20
H ₂ S	204	125	31
N ₂	42	28	26
H ₂	1.6	14	31
CH ₄	1.4	1.6	21

TABLA 3.2

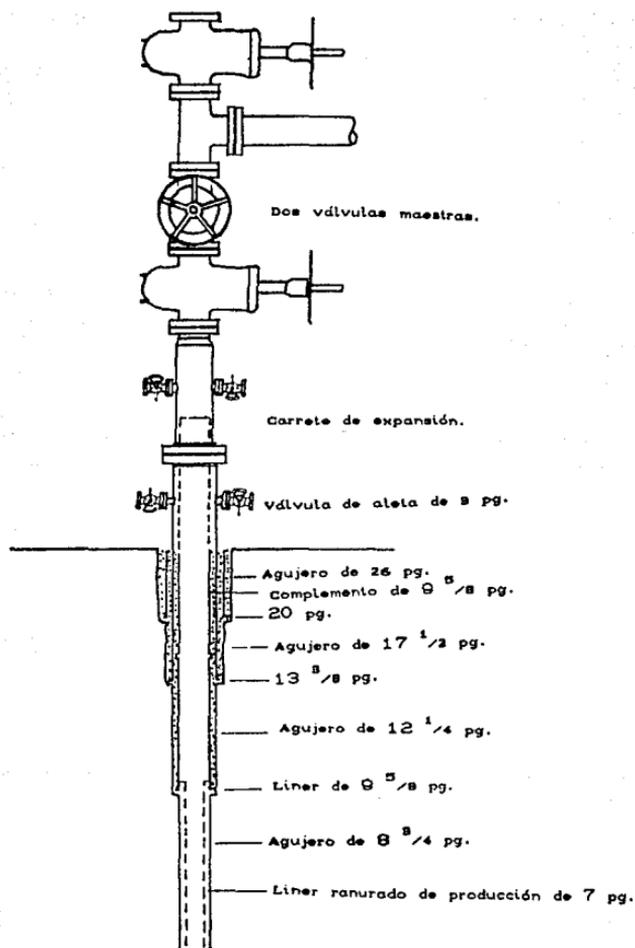


Fig. 3.3 Diagrama de la terminación en Baca.

Un agujero de 12 1/4 pg es entonces perforado hasta la parte superior del yacimiento (2500 a 4000 pies). Este programa básico de perforación para la primera etapa suena simple pero está asociado con muchos problemas.

III.1.3.2 Programa de lodos.

El programa de lodos utilizado durante la perforación fue un sistema Bentonita-cal o Bentonita-Ben-x en el agua producida. Un ejemplo de las propiedades del lodo se muestra en la tabla 3.3. La corrosión en la tubería de perforación es controlada con secuestrantes de oxígeno en esta parte del agujero. Las propiedades del lodo son controladas para mantener una limpieza adecuada en el agujero y un suficiente control en la pérdida de fluido para así evitar problemas en algunas de las zonas permeables superiores. Como muchos problemas que se encuentran en esta parte del agujero no se relacionan con el lodo (arcillas no inchadas, etc.), la limpieza del agujero y algo de control sobre la pérdida de fluido con un costo mínimo, es todo lo requerido. Debido a los problemas de pérdida de circulación, un lodo con bajo costo es deseable para mantener los costos totales bajos.

III.1.3.3 Pérdida de circulación.

La pérdida de circulación es el principal problema, consumidor de tiempo y costo, que se ha encontrado en Baca. En Baca, como en todas las áreas geotérmicas, una cementación eficiente en las tuberías de revestimiento es un prerrequisito para tener un pozo útil cuando se ha terminado la perforación del agujero. Amargas experiencias han enseñado que las tuberías de revestimiento mal cementadas no pueden sobrevivir los ciclos de esfuerzo térmico que un pozo geotérmico debe soportar y las tuberías de revestimiento mal cementadas no pueden sobrevivir siquiera un choque térmico. Sin embargo para nuestros propósitos se debe considerar imperativo que todas las pérdidas de circulación sean remediadas antes de intentar cementar la tubería de revestimiento en el pozo.

**** TABLA 3.3 ******PROPIEDADES DEL LODO**

Peso	8.5 - 9.0 lb/gal.
Viscosidad embudo	80.0 - 88.0 seg.
Viscosidad plástica	2.0 - 8.0 cp.
Punto de cedencia	1.0 - 10.0 lb/100 pies ²
Esfuerzo gel	10 seg. : 0 - 10 lb/100 pies ² 10 min : 4 - 25 lb/100 pies ²
Control de la pérdida de fluido	10 cm ³ API - sin control

TABLA 3.3

Normalmente los materiales contra pérdida de circulación usados en los primeros intentos son: mica, cascara de nuez, aserrín, etc., si la pérdida se presenta a lo largo de las fracturas (deseable en la zona productora), los materiales comunes para pérdida de circulación usualmente son infructuosos o parcialmente afortunados. Bajo estas circunstancias la cementación de intervalos con pérdida de circulación son el único remedio controlable, por mucho, aunque se ha experimentado con muchos otros remedios.

La cementación de zonas con pérdida de circulación es costosa, en parte a causa del costo por el cemento, sin embargo principalmente por el tiempo consumido en sacar la tubería a la superficie, bajar con la tubería de perforación libre, colocar taponés, esperar para que el cemento se endurezca y sacar la tubería otra vez. Para regresar con barrena y perforar el cemento, frecuentemente más de un tapón de cemento puede ser necesitado. Lo anterior usualmente es debido al tamaño y a la severidad en la zona con pérdida de circulación.

El cemento usado para estos taponés es usualmente una mezcla

1:1 de cemento tipo "G" o "H" y perlita con los retardadores apropiados.

III.1.3.4 Preventores de reventones.

La columna de preventores contra reventones se muestra en la Fig. 3.4.

III.1.4 Segunda etapa de perforación.

En esta etapa se perfora desde la última T.R. completada hasta la profundidad total.

Varios métodos han sido probados en Baca para perforar el intervalo productor.

El perforar directamente con lodo da como resultado serios problemas de pérdida de circulación y frecuentemente el pozo tiene que ser perforado sin regreso. Los problemas encontrados en esta perforación frecuentemente evitan al pozo alcanzar la localización deseada. Pero lo más importante es que todo el lodo y los recortes son perdidos en las fracturas productoras donde se cree que ellos disminuyen seriamente la producción en los pozos.

La perforación con aire fue probada, sin embargo la estabilidad del agujero y un flujo demasiado alto de agua usualmente evitó alcanzar con éxito el objetivo. La combinación de aire con el agua producida resultó en una rápida corrosión de la sarta de perforación y la tubería de revestimiento.

En Baca, la práctica común es perforar la zapata de la tubería revestidora de 9 5/8" pg con aire hasta que se presente la suficiente entrada de agua para requerir el cambio a un sistema de agua aerada. El pozo es entonces perforado hasta la profundidad total usando un sistema de agua aerada.

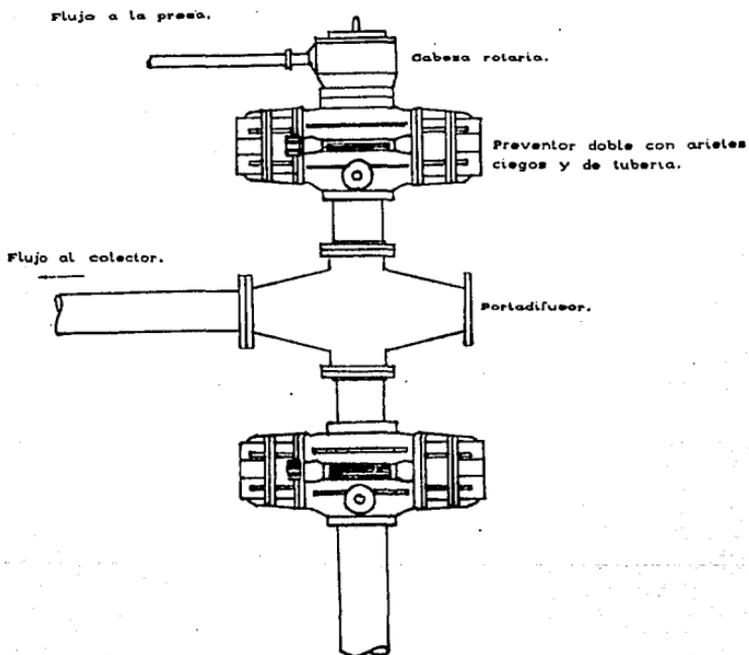


Fig. 8.4 Columna de preventores.

Los mayores problemas con el sistema de agua aerada son balancear la relación aire-agua e inhibir la corrosión en la tubería de perforación (que también afecta la integridad de la sarta de tuberías revestidoras).

III.1.4.1 Inhibidor de corrosión.

En las pruebas iniciales de perforación con agua aerada, la velocidad de corrosión fue inaceptablemente alta, aproximadamente de 24 lb/ft²/año. Además se encontró que combinando el control de pH con un inhibidor apropiado "Unisteam", se controló la mayoría de los problemas de corrosión. El ion OH⁻ es conocido por ser un buen inhibidor de la corrosión por oxígeno y se encontró que si el pH se mantiene entre 10.5 y 11.0, la corrosión puede ser controlada hasta un valor aceptable, 2 lb/ft²/año, o menor, cuando se usa en combinación con el Unisteam. Estos rangos de corrosión están basados en muestras (cupones) para corrosión colocados en la sarta de perforación. Los requerimientos químicos son función de la química del agua producida (cuando perforamos con un sistema aerado, se está perforando "despresurizadamente" y los fluidos de la formación están entrando al sistema de circulación, por lo tanto la composición química en el fluido de circulación rápidamente se convierte en la del agua producida.

En Baca, los fluidos producidos son relativamente benignos (ver tabla 3.1), sin embargo los intentos para extender este método hacia otras áreas con diferente composición química del agua no siempre han sido afortunados y frecuentemente se ha tenido que hacer cambios químicos mayores para obtener la inhibición. También en Baca, la composición del agua puede cambiar ligeramente de un pozo a otro y ocasionalmente se tienen altas velocidades de corrosión (4-6 lb/ft²/año) para periodos cortos de tiempo a causa de que no anticipamos estos cambios. El número de veces que un alto grado de corrosión ha sido localizado se ha reducido mediante el monitoreo continuo del pH, volumen de cáustico mezclado y el uso de bombas químicas para tratar continuamente el fluido de perforación con cáusticos para mantener el pH en el rango indicado.

El hidróxido de amonio fue agregado después que apareció corrosión en la parte superior de la tubería de perforación, aparecían corroídos desde 400 hasta 1000 pies por la parte exterior, aunque las muestras de anillos en el interior no muestren una excesiva corrosión. La adición de amoniaco en Baca ha prevenido la excesiva corrosión exterior en la parte superior de la tubería de perforación.

III.1.4.2 Balanceo del sistema aire-agua.

Balancear un sistema de perforación aire-agua es casi un arte cuyo éxito depende de la experiencia y dedicación de la gente en los controles principalmente el perforador y el operador de las compresoras. Ahí no hay relaciones aire-agua, profundidad de colocación de los jet sub o métodos para alcanzar la circulación fijos. Todo lo que podemos ofrecer es una revisión de que hicimos y porque lo hicimos y que usa el perforador para decidir las relaciones aire-agua a usar.

Se ha perforado exitosamente tanto con jet sub o sin ellos. Un jet sub es una boquilla de barrena montada en la tubería de perforación que permite salir una parte del aire y una cierta distancia arriba de la barrena para establecer más fácilmente la circulación. Los jet sub son usados aproximadamente a unos 500 pies debajo del nivel de fluido. El aire saliendo por el jet sub ayuda a sacar estos 500 pies de columna de agua y a establecer la circulación.

El modo normal de operación fue el usar la capacidad total de uno o dos compresores y ajustar la relación aire-agua con el incremento o decremento en la velocidad del flujo. Este es el método más fácil de operación para el perforador, porque el tiene los controles de las bombas en su estación en tanto los controles de aire están lejos en los compresores. Los compresores que se usaron producen desde 1100 hasta 1200 pies³ a la elevación de operación en Baca. Las relaciones aire-agua varían dramáticamente, sin embargo una relación de 60:1 es probablemente un buen punto de partida. El

perforador debe entonces ajustar esta relación arriba o abajo basándose en el comportamiento del pozo. En caso de tener problemas para mantener el pozo circulando, el puede incrementar la relación aire-agua (disminuyendo el gasto en las bombas) y si la circulación llega a ser demasiado violenta, puede disminuir la relación aire-agua (aumentando el gasto en las bombas).

Como se perforó básicamente bajo condiciones de descontrol la relación aire-agua continuamente cambia cuantitativamente. Cuando se inicia la circulación el agua es relativamente fría y no se encuentra produciendo. Por esto, una alta relación aire:agua es necesaria para vencer las condiciones del yacimiento bajobalancado (ver Fig. 3.37). Conforme perforamos profundamente y encontramos fracturas productoras, fluido caliente producido entra al pozo y parte de este fluido se convierte en vapor instantáneamente, esto usualmente incrementa la relación gas:liquido en el espacio anular. La relación gas:liquido debe ser decrementada para contrarrestar el incremento que ocurre en el espacio anular debido al fluido producido. Como estos cambios no son ni predecibles ni medibles prontamente, debemos confiar en la experiencia del personal para manejar los cambios necesarios en las relaciones aire:agua.

El modo normal de operación involucra el uso de un compresor (1100 a 1200 pies³), aunque ocasionalmente algunos compresores son requeridos (o alguno entre 1100 y 2400 pies³). La capacidad extra de gas es requerida para limpiar el agujero a causa de una zona incompetente o se requieren mayores relaciones gas:liquido. Deseamos mantener al menos 100 gal/min de liquido para la capacidad de acarreo, pero las relaciones gas:liquido necesitan exceder 0.11, entonces 2 compresores son requeridos. También ocasionalmente encontramos zonas incompetentes que requieren más capacidad de acarreo para mantener el agujero limpio hasta las zonas estabilizadas. La capacidad de acarreo extra puede ser obtenida mediante incrementos en el gasto de inyección tanto del aire como de liquido, usualmente duplicando ambos.

Inicialmente no puede parecer que relaciones aire:liquido tan

altas como 60:1 puedan ser requeridas basados en la presión en el fondo del agujero. Sin embargo como este sistema aire:agua no es tan eficiente como el convencional sistema aire:lodo. La baja viscosidad del agua producida admite que el aire se canalize, por lo tanto esto no es suficiente para remover el líquido como un sistema de lodo viscoso que atrapa el aire y lo acarrea junto con este más que ser atravezado por el aire.

III.1.5 Técnicas de terminación y cementación.

Los pozos son terminados con liners ranurados de 7 pg colgados desde las zapatas en las tuberías de revestimiento de 9 ⁵/₈ pg hasta el intervalo final (ver Fig. 3.3). Un empacador es entonces colocado en la tubería de revestimiento de 9 ⁵/₈ pg, y un complemento de 9 ⁵/₈ pg es acoplado en el liner de 9 ⁵/₈ pg y se cementa hasta la superficie. Sentimos que es necesario correr este complemento para proveer una sarta de tubería en la superficie que se conoce adecuadamente (estas no es desgastada por las juntas de la herramienta ni ha experimentado problemas de corrosión). Esta adecuada sarta de tubería en la superficie proporciona seguridad adicional contra fallas en las tuberías de revestimiento someras que pueden presentar reventones.

La terminación superficial consiste de un carrete de expansión, 2 válvulas de abertura completa, una "T", una válvula de muestreo, y 2 válvulas de aleta como se muestran en la Fig. 3.3.

Los procedimientos de cementación son relativamente sencillos. Como se analizó previamente, es necesario cementar completamente las sartas de tubería. La cementación actualmente es hecha con un espaciador seguido por un cemento de relleno con 1 "perlite":1 cemento "H" con 40 % de harina sílica y las cantidades apropiadas de retardadores, reductores de fricción y gel. El cemento de relleno es seguido por una lechada final de cemento "H" con 40 % de harina sílica. Cuando cementamos los complementos no usamos cemento de relleno. Es imperativo que cuando se cementan los complementos el cemento no contenga nada de agua libre. Cualquier agua libre atrapada

entre dos tuberías de revestimiento, causará la deformación en la tubería interna y este es un serio problema que se debe prevenir cuando se cementan los complementos, esto también debe de tenerse en mente donde la tubería de revestimiento de 9 ⁵/₈ pg se traslapa con la de 13 ²/₈ pg y donde la de 13 ³/₈ pg se traslapa con la tubería de revestimiento de 20 pg.

III.1.6 Registros.

El programa de registros consistió en correr el registro de doble inducción en el agujero de 17 ¹/₂ pg, una serie de registros en el agujero de 12 ¹/₄ pg consistiendo del registro para identificación de fracturas, densidad de formación compensada, el registro de neutrones compensado, registro de rayos gamma, un registro doble de inducción y el registro de temperatura. El agujero de 8 ³/₄ pg se evaluó con el registro de inducción, un registro de densidad de la formación neutrones-compensado y rayos gamma-compensado. El agujero de 17 ¹/₂ pg algunas veces hace difícil obtener un buen registro de doble inducción. Existen algunos problemas con los registros en agujeros de 12 ¹/₄ pg. El registro de temperatura es corrido primero para asegurar que podemos usar herramientas de baja temperatura, que hemos tenido disponibles para ello. Herramientas para alta temperatura deben ser usadas en agujeros de 8 ³/₄ pg esto limita las herramientas que podemos correr. También quisieramos correr registros para identificación de fracturas en este agujero, sin embargo estos no son disponibles en versiones de alta temperatura. Registros de alta temperatura estan disponibles pero no en Nuevo México. Se inyecta agua para enfriar el agujero mientras registramos. De tal modo que no tenemos ningún problema de temperatura, al menos que el agua no pase hasta el fondo. Si el agua sale caliente del agujero, las herramientas usualmente continuan funcionando, sin embargo el cable del registro se quema. Consecuentemente, siempre vamos registrando a través del agujero para que se tenga un registro si el cable se quema en el fondo. Los mayores problemas son usualmente similares a los registros en agujeros con temperatura normal, control de calidad y del personal que opera el equipo.

III.2 CASO GEYSERS.

III.2.1 Perforación geotérmica.

En los Geysers después que la T.R superficial, con diámetro de 17 ¹/₂ pg se perfora con lodo, se coloca y cementa la tubería revestidora con diámetro de 13 ³/₈ pg la mayoría de los perforadores perforan con lodo el agujero de 12 ¹/₄ pg a través de las formaciones calientes "Greywacke" encima de la zona del yacimiento geotérmico para anclar los liners con diámetro de 9 ⁵/₈ pg. Después todos los operadores perforan con aire la parte remanente del pozo hasta que atraviezan las fracturas que tienen comunicación directa con los principales yacimientos de vapor.

Todos los pozos están terminados con agujero descubierto abajo de los liners de 9 ⁵/₈ pg. y solo pueden ser terminados satisfactoriamente con perforación con aire debido a la relativamente baja presión de circulación en el fondo del pozo que se obtiene cuando se perfora en zonas fracturadas. Consecuentemente si las zonas productoras de vapor se encuentran al perforar con lodo resultarían en pérdidas de circulación y daños permanentes a la productividad del pozo debido a la depositación de los sólidos, que transporta el lodo, en las fracturas de las zonas productoras.

Además de la tubería, los preventores de reventones (ciegos y anulares), se instala un portadifusor en la cabeza del pozo; el portadifusor desvía los recortes y la mezcla de aire-vapor a través de una línea de descarga hacia el silenciador de aire. El silenciador de aire está diseñado para controlar la emisión de polvos y ruido. La cabeza rotatoria y el sello de hule evitan que los recortes y la mezcla de aire-vapor lleguen al piso de la plataforma de perforación (ver Fig. 3.5).

Durante la perforación con aire en las zonas de vapor la presión de inyección varía desde 150 hasta 700 (lb/pg²) dependiendo en los volúmenes de aire, la profundidad y las restricciones de las herramientas en el fondo del pozo.

Estas presiones pueden aumentar rapidamente resultando una necesidad de equipo adicional para transmitir los volúmenes de aire requerido a diferentes varios rangos de presión. La mayoría de los compresores industriales de aire manejan gastos volumetricos que varían desde 700 hasta 1500 (pies³/min) y tienen rangos de presión desde 250 hasta 350 (lb/pg²). Equipo adicional para ampliar la potencia es requerido cuando se enfrentan presiones de inyección mayores.

Sin embargo en "The Geysers" compresores diseñados para 4 etapas son capaces de inyectar hasta 1500 (pies³/min) de aire y presiones de inyección hasta 1200 (lb/pg²), en un alto porcentaje de los pozos perforados hasta hoy.

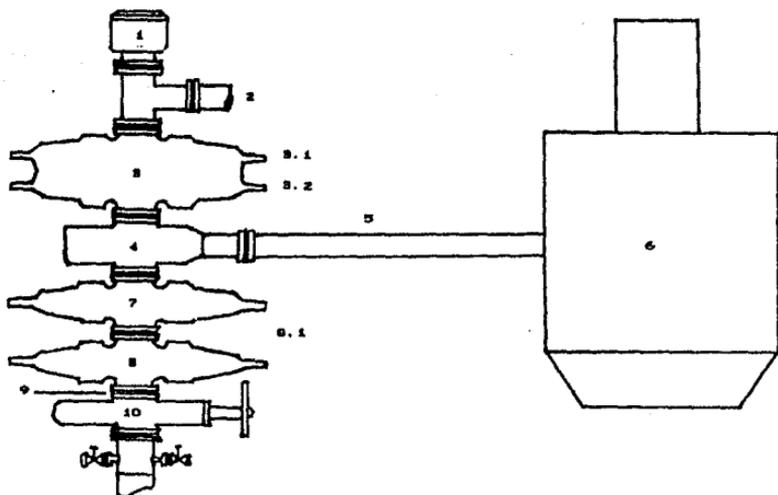
Los volúmenes de aire requeridos para perforar en agujeros de 8" /s pg con liner de 9" /s pg y T.R. superficial de 13" /s pg varía desde 2400 hasta 3600 (pies³/min).

III.2.2 Control de la corrosión.

A pesar de que la perforación con aire es el único método actualmente utilizado para terminar con éxito los pozos de vapor en "The Geysers", sin daño a la producción, se presentan otros problemas, tales como la erosión y la corrosión de la T.P debido a las altas velocidades anulares generadas cuando se alcanzan las zonas de vapor. Algunas estimaciones indican que las velocidades anulares exceden los 10,000 (pies/min) cuando son alcanzadas las zonas de vapor con alta productividad.

Rangos de corrosión menores de 2 (lb/ft²/año) pueden ser obtenidos si el sistema de lodos el pH se mantiene arriba de 11 y soluciones líquidas de sulfito son usadas para atrapar el oxígeno.

Otro problema en "The Geysers" perforar con aire es la emisión (a veces) de pequeñas cantidades de H₂S con el vapor y el aire.



- 1 Cabeza rotatoria
- 2 Línea de flujo hacia las presas
- 3 Compuerta hidrútica doble
- 3.1 Aríete
- 3.2 Aríete empacador de tubería
- 4 Portadifusor
- 5 Línea de descarga
- 6 Silenciador de aire
- 7 Compuerta hidrútica sencilla
- 8 Compuerta hidrútica de vapor
- 8.1 Aríete
- 9 Brida
- 10 Válvula de compuerta de 12 pg. WKM

Fig. 8.5 Diagrama de la terminación en " The Geysers ".

Actualmente hay disponibles equipos monitores de H_2S con sistemas de alarma sónica y visuales que indican y registran cuando son emitidos gases con el vapor y la mezcla de aire.

El H_2S es combatido con mezclas de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sosa cáustica ($NaOH$) que neutralizan la toxicidad del H_2S hasta niveles seguros. Hay otras formas de remover el H_2S que están siendo probadas en campos geotérmicos.

III.3 CASO MATSUKAWA.

Treinta años han pasado desde que el primer pozo exploratorio se comenzó a perforar en Matsukawa, Japón. Desde entonces, más de 100 pozos productores y de reinyección han sido perforados.

III.3.1 Historia y plan de perforación.

Matsukawa es una área geotérmica de vapor dominante por consiguiente un sistema de lodo convencional fue planeado para ser usado hasta que la última tubería de revestimiento se colocó a los 1100 m y entonces la zona productora fue planeada para ser perforada con aire.

Las operaciones de perforación avanzaron casi como se planearon con la tubería de revestimiento de 20 pulgadas colocada a los 750 m con un cementador de etapas múltiples. A los 1088.5 m ocurrió la primera pérdida de circulación y la tubería de producción fue coqueada y cementada, un sistema de perforación con aire fue utilizado. Se continuó perforando hasta los 1446.5 m. Tres núcleos fueron cortados durante la perforación con aire para su identificación geológica. Finalmente, el pozo fue desviado hacia el centro de la área objetivo utilizando lodo como fluido de perforación y se encontró la fractura productora.

Para mantener los fluidos de perforación en buenas condiciones bajo altas temperaturas y en agujeros descubiertos relativamente grandes las siguientes medidas fueron tomadas:

- * Dos torres de enfriamiento de fluidos y presas de 500 kl deben utilizarse para enfriar el lodo que regresa.
- * Sistemas para el control de sólidos (tembiorina, removedor de arcillas, desarenador, microciclone y centrifuga) deben ser empleados.
- * El contenido de bentonita debe mantenerse abajo del 4 %.
- * El pH debe mantenerse arriba de 10.
- * Dispersante de alta temperatura debe ser usado.
- * Un surfactante y diesel deben ser agregados para reducir el torque a la rotaria.

III.3.2 Perforación con aire.

Desde 1970 el sistema de perforación con aire fue introducido primero en Matsukawa y desde entonces, las secciones productoras son perforadas con aire para casi todos los pozos con las siguientes ventajas :

- * Menor interferencia con otros pozos productores.
- * Fácil identificación y medición de las zonas productoras de vapor.
- * La perforación puede continuar después de encontrar zonas productoras, sin el problema de recortes taponando las fracturas.
- * Incremento en la velocidad de penetración.

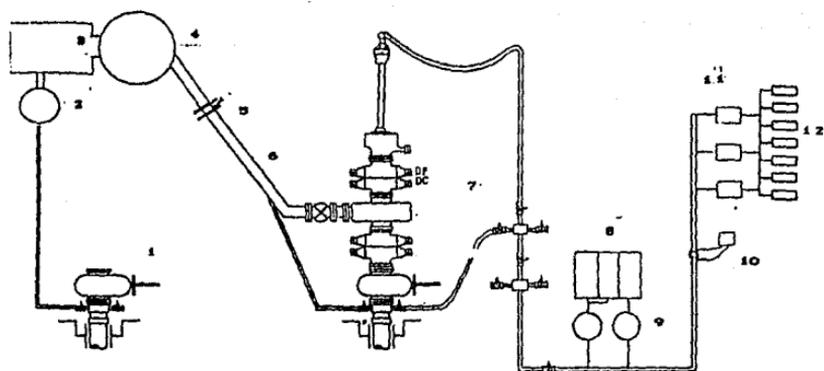
De otro modo, las siguientes desventajas se han experimentado :

- * Dificultad para corregir la trayectoria con los motores de fondo.
- * Dificultad para identificar la formación debido a la disminución en el tamaño de los recortes y generalmente un cuarzo puede ser reconocido.

Siete compresoras ($18.9 \text{ m}^3/\text{cm}^2$) y tres incrementadores de presión ($37.2 \text{ m}^3/\text{min}$, $105 \text{ kg}/\text{cm}^2$) son instalados en lugar de las bombas de lodo y sistemas para inyección química de agentes

espumantes e inhibidores de corrosión . La columna de preventores y el sistema de flujo en superficie es cambiado a un sistema de aire (fig. 3.6). Un conjunto de agujero empacado con dos terminaciones es usado para mantener en pista y trayectoria los registros hechos con disparos sencillos. Agentes espumantes son bombeados para limpiar el agujero ocasionalmente y se bombean inhibidores de corrosión continuamente.

En el pozo M-12 un total de 25 barrenas triconicas se utilizaron y una barrena de diamante para corte de núcleos para perforar 1496 m, y cortar cuatro núcleos . Comparando los registro de las barrenas, las usadas para la perforación con aire muestran la mejor velocidad de penetración (6 a 8 m/h) y mejor vida.



- 1 Cabezal
- 2 Bombas inyectoras
- 3 Tanques
- 4 Silenciador
- 5 Medidor de temp. y presión
- 6 Línea de descarga
- 7 Conjunto de preventores
- 8 Tanque de químicos
- 9 Medidor de flujo
- 10 Aumentadores de presión
- 11 Compresores

Fig. 8.6 Esquema del sistema de perforación con aire en Matakava.

BIBLIOGRAFIA

* Dondanville, Richard F., "Geologic Characteristic of the Valles Caldera Geothermal System, New Mexico"; Geothermal Energy :A Novelty_Becomes_Resource ; Transactions Geothermal Resources Council Annual Meeting 25-27, July, 1978, Hilo, Hawaii; Volume 2, Section 1.

* "Baca Project Geothermal Demonstration Power Plant", Department of Energy, Program Opportunity Notice EG-77-N-03-1717, 31 January, Union Oil and Public Service Company of California, 1978.

* "Geothermal Air Drilling", Workshop on Geothermal Drilling and Completion., May 24-26, GRC, 1982.

* Saito, S., "Recent Geothermal Drilling Activities and Technologies in Matsukawa, Kakkonda and Mori, Japan", Journal of the Japan Geothermal Energy Association, vol. 27, no. 4, p. 1-31, 1990.

* Fujii, K., Ishida, S., Ito, K. and Sano, H., Present Status of Deep Drilling Technology, Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, v. 55, no. 2, 1990.

CAPITULO IV

APLICACION DE LA PERFORACION

CON AIRE EN MEXICO

Hasta el momento, hemos tratado el tema de la perforación con aire, desde un punto de vista general, a continuación haremos algunas descripciones de las operaciones que se han realizado en algunos pozos en el país, así como los resultados que se han observado.

Se hace incapie que la experiencia que se tiene en la utilización de esta tecnología en nuestro país es muy escasa, debido a que no se cuenta con la tecnología apropiada para la utilización de esta técnica.

IV.1 Caso primavera

En el campo "La Primavera" se perforaron los pozos PR-4 y PR-5 utilizando como fluido de perforación espumas. Durante la perforación se encontraron grandes zonas de formación muy fracturada, en las cuales se tuvieron grandes pérdidas de circulación que hicieron la perforación muy lenta y riesgosa (Gallegos, 1982).

PRIMAVERA-4

La utilización de espuma como fluido de perforación tuvo buenos resultados hasta los 500 m, en donde apareció un acuífero grande, lo cual ocasionó el crecimiento de la columna de agua aumentando el espumante hasta el triple de lo usado normalmente, hasta que llegó el momento de que el compresor ya no pudo desalojar la columna de agua. Se hicieron varios intentos por taponar el acuífero, con obturantes y cementos sin ningún éxito. De igual manera se notó que cuando se rebaja cemento usando espumas, esta se degrada y no circula en la superficie, por lo que la perforación es un poco más peligrosa, este problema se agudiza conforme los taponos se rebajaban a mayor profundidad.

Debido a la presencia del acuífero y además al poco avance de la perforación se tuvo que suspender la perforación a la profundidad de 668 m.

PRIMAVERA-5

Se inicio la perforación con barrena de 12 ¹/₄ pg hasta la profundidad de 365 m. Debido a los problemas que se encontraron durante la ampliación del agujero de 12 ¹/₄ pg a 26 pg se tuvo que cementar la T.R. de 20 pg a 325 m. El sistema de perforación con espumas ocasionó varios atrapamientos de la barrena, debido a lo deleznable de la formación. De la misma manera, cuando el agujero iba creciendo de diámetro, la cantidad de espumas tenia que ser mayor por lo que fue necesario aumentar la cantidad de espumante, en ocasiones hasta el triple de lo usado normalmente.

Una vez cementada la T.R. de 20 pg se continuo la perforación hasta la profundidad de 447 m, siguiendo utilizando espuma como fluido de perforación, con los mismos problemas de atrapamiento de la barrena; por lo que cemento la T.R. de 13 ³/₈ pg a la profundidad de 473 m.

Posteriormente se cambio el fluido de perforación por lodo ya que el avance era muy lento.

IV.2 CASO AZUFRES

IV.2.1 Introducción

El pozo azufres No. 21 que se encuentra localizado en la sección "Modulo de Laguna Verde", a 180 m al norte de la falla de Maritara (ver Fig. 4.1), zona que superficialmente se encuentra muy fracturada, por lo que se presentan condiciones óptimas de permeabilidad.

Durante la perforación se midió la temperatura de entrada y salida del fluido de perforación, estas medidas se realizaron en las presas de lodo y posteriormente en la temblorina. Las temperaturas de entrada fluctuaron de 19 °C a 70 °C y las de salida de 20 °C a 72 °C a diferentes profundidades.

IV.2.2 Plan de perforación

Primera etapa: La primera etapa experimental de perforación con aire inicio en el pozo A-21, después de cementarse la tubería de revestimiento de 13 ⁹/₈ pg a los 300 metros.

Se revisó cuidadosamente todo el sistema de aire (compresores, válvulas, mangueras, etc.), así como el acondicionamiento de la unidad mezcladora de reactivos químicos, la cual tiene una capacidad de agregar 2 galones de espumante por cada 10 barriles de agua.

La perforación con aire se inició a los 283 m (profundidad a la que se encontraba la cima del cemento), aplicandole un peso a la barrera de 6 toneladas como máximo, suficiente para perforar el tardón de cemento así como la zapata. Al llegar hasta la formación se continuo perforando normalmente con un gasto de 3100 Pies³/min., hasta la profundidad de 340 m aproximadamente, donde se observó que el empaque del desviador de flujo estaba en malas condiciones debido a su mal alineamiento en relación con la rotaria y el centro del agujero. A medida que avanzaba la perforación, cada vez que se hacia alguna conexión había fugas de vapor y abundantes recortes sobre el piso, por lo que se sugirió suspender el envío de aire cada vez que se fuera a realizar alguna conexión, disminuyendo considerablemente con esto dicho problema, todo continuo normalmente hasta los 370 m donde se observó fuerte resistencia por un probable derrumbe, se procedió repasar y acondicionar el agujero. Se siguió hasta los 380 m donde al hacer algunas conexiones se observó asentamiento de recortes. Se revisaron las muestras de formación (kaolín), observandose que se presentaba en forma de arcilla altamente espesa, por lo que se aconsejó sacar lo más rápido posible como mínimo 3 lingadas de l.p. a la superficie quedando la barrera estacionada en la zapata de la l.R. de 13 ⁹/₈ pg (a los 300 m).

Inmediatamente después se suspendió la perforación, ya que continuar con este sistema resultaba peligroso al no presentar ninguna seguridad, debido al tipo de formación que se atravesaba (kaolinita hidratada), que podía, con toda seguridad, atrapar la l.p.

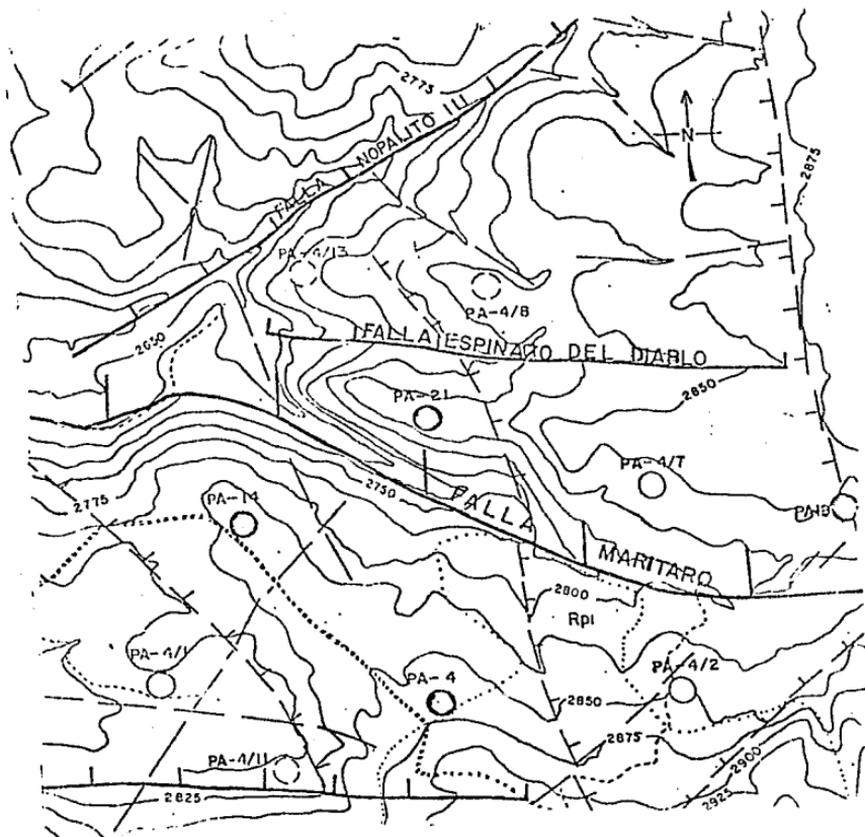


Fig. 4.1 Localización del pozo Azufre No. 21

se optó por proseguir la perforación con lodo (sistema convencional). La velocidad promedio de esta etapa fue de 8 m/hr. (7.5 mm/hr).

Segunda etapa: La segunda etapa de perforación con aire se inició después de los 1000 metros de profundidad (T.R. de 9 ⁵/₈ pg). La perforación continuó normalmente hasta los 1350 m donde tuvo que cambiarse el sistema de aire por el de agua aerada debido a que el aire formaba cavernas depositando los recortes en ellas, con el subsecuente problema de que al suspender el envío de aire para realizar alguna conexión. Los recortes depositados en dichas cavernas caían de nuevo hacia el fondo del agujero provocando asentamiento de recortes en el espacio anular, por lo que era peligroso seguir perforando con puro aire, ya que el agujero podía derrumbarse totalmente ocasionando un posible atrapamiento de la tubería y la herramienta.

Al cambiar a un nuevo sistema (agua aerada), la perforación continuó normalmente hasta los 1820 m (profundidad total del pozo), siendo su velocidad de penetración promedio de 3.86 m/hr., mientras que la velocidad de penetración con aire de los 1000 hasta los 1350 m fue de 9.17 m/hr. El esquema de la terminación del pozo Amores No. 11 se muestra en la Fig. 4.2.

Como puede apreciarse la velocidad de penetración con agua aerada se redujo en más del 50 % con respecto a la del aire. Por lo cual con esto se comprueba que la perforación con aire como fluido de perforación reduce considerablemente los costos por metro perforado.

La Fig. 4.3 muestra la velocidad de penetración real de los tres sistemas (lodo, aire y agua aerada), utilizados en la perforación del pozo A-21.

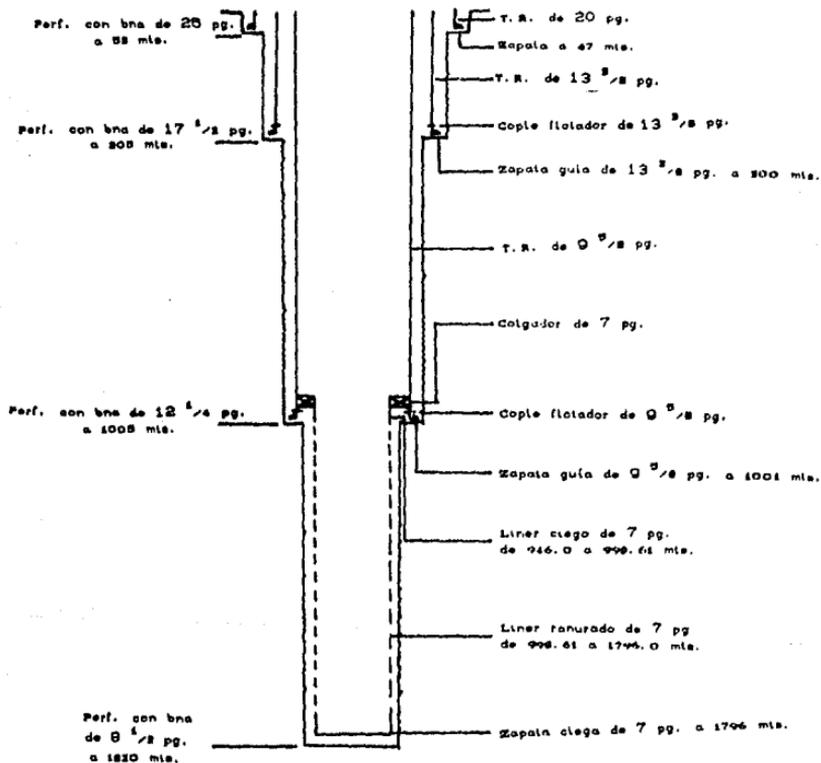


Fig 4.2 Esquema de la terminación del pozo azufre 21.

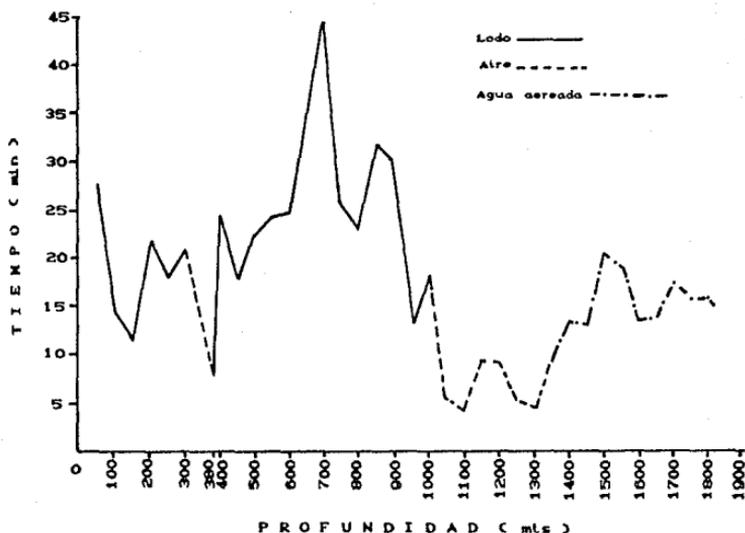


Fig. 4.3 Velocidad de penetración real de los tres sistemas utilizados

Mientras que la fig. 4.4 nos muestra la gráfica de la velocidad de penetración comparativa, dependiendo del tipo de fluido que se vaya a utilizar.

También se encontraron problemas al perforar zonas productoras de agua, lo que se pudo controlar con algunos trabajos empleando los agentes espumantes correspondientes. Pero al entrar en la zona productora se complicó el problema por dos razones: La primera fue que el yacimiento aportaba una mayor cantidad de agua caliente que la que se podía manejar con los espumantes y la segunda fue que las temperaturas del vapor producido, añadidas al efecto de erosión

causado por la alta velocidad de los recortes al ser arrastrados por el aire, dañaron fuertemente el hule desviador de flujo en la cabeza rotatoria en varias ocasiones (se emplearon 3 piezas para perforar 36 m con el pozo con flujo de vapor), presentando grandes riesgos para el personal y el equipo.

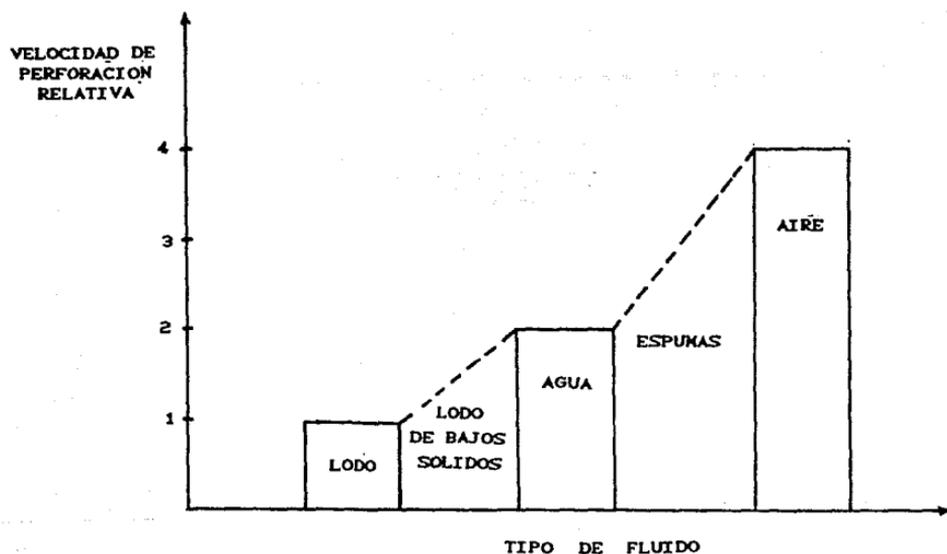


Fig. 4.4 Velocidad de penetración comparativa.

Creemos que un efecto colateral que intervino en la falla de los hules de la cabeza rotatoria, fue la presión de flujo del yacimiento en el espacio anular, la cual llegó al límite máximo recomendado por el fabricante, que es de 200 lb/pg^2 , lectura tomada en el cabezal del pozo.

De acuerdo a las pruebas llevadas a cabo, se llegó a las siguientes conclusiones:

Se comprobó que la velocidad de penetración es considerablemente mayor (4 veces), en relación con el sistema convencional (fluido), reduciendo con esto el costo por m perforado.

Se observó que el daño a la zona productora fue mínimo con respecto a los pozos vecinos, los cuales fueron perforados con el sistema convencional.

Con el empleo de aire como fluido de perforación, el costo de perforación se reduce aún más; además de que el equipo se conserva más limpio.

BIBLIOGRAFIA

* Resumen Geologico del pozo Azufres 21, Gerencia General de Estudios e Ingenieria Preliminar, Departamento de Geotermia, CFE, 1981.

* Gallegos V.J., "Estudio de las pérdidas de circulación y la forma en que se atacaron en el campo geotérmico de la primavera, Jalisco", Departamento de perforación, CFE, 1981.

CAPITULO V

DISCUSION DE TECNICAS

La elección y control de los fluidos de perforación puede determinar el éxito en la perforación de un pozo geotérmico. Usando un sistema de lodo convencional, pérdidas de circulación, daño a la formación y altos costos en el lodo pueden ocurrir. Las técnicas de perforación con aire disminuyen la presión del fluido en el fondo del agujero, puede inhibir el desarrollo de estos problemas y mejorar la producción de los yacimientos geotérmicos.

La "perforación con aire" se refiere al uso de aire en el sistema de circulación. El propósito de usar el método de perforación con aire es perforar formaciones de baja presión. Durante los últimos 21 años, las técnicas de perforación con aire han sido aplicadas en todo el mundo, y se ha perforado exitosamente para la obtención de energía geotérmica.

La clasificación general de las técnicas de perforación con aire es la siguiente:

- 1.- Perforación con "aire-polvo"
- 2.- Perforación con "niebla".
- 3.- Perforación con "fluidos aerados".
- 4.- Perforación con "espuma".

V.1 PERFORACION CON AIRE-POLVO.

La técnica de "aire-polvo" es usada cuando perforamos formaciones secas o donde cualquier entrada de agua es lo suficientemente ligera para ser absorbida por la corriente de aire. El nombre "polvo con aire" fue escogido por que los recortes regresan a la superficie como una nube de polvo. En este tipo de operación, es donde ha tenido mayor éxito la perforación con aire, tanto en lo que se refiere a velocidades de penetración, como a su gran economía. Esto se debe, principalmente, a que la presión de formación en el

fondo del agujero es ligeramente mayor a la que ejerce la columna de aire más los recortes suspendidos, por lo tanto, la barrena trabaja más eficientemente.

V.1.1 LIMPIEZA DEL AGUJERO.

El poder de acarreo en un sistema de perforación con aire-polvo es proporcional a la densidad de circulación y al cuadrado de su velocidad en el espacio anular. La densidad y por lo tanto las propiedades de suspensión en una corriente de aire es mucho menor que un sistema convencional de lodo. Por consiguiente, la velocidad anular es el principal factor para transportar los recortes hasta la superficie.

Los volúmenes de aire que generen velocidades anulares de 3000 pies/min son normalmente adecuados para perforar con "aire-polvo". Sin embargo, cuando las velocidades de penetración exceden los 60 pies/hora, o cuando los recortes son grandes o húmedos, mayores velocidades anulares pueden ser requeridas para limpiar efectivamente el agujero.

Conforme el pozo es más profundo, es necesario un mayor volumen de aire inyectado a mayor presión para mantener las velocidades anulares requeridas. Esto ocasiona principalmente altas pérdidas de presión por fricción en el fondo del agujero causadas por el incremento en la densidad del aire y la cantidad de recortes en el espacio anular. El equipo de perforación con aire debe tener capacidad adecuada en volumen y en presión para limpiar efectivamente el agujero. Actualmente se cuenta con tablas que proporcionan los volúmenes de aire necesarios para perforar conforme al diámetro de la barrena, distintos espacios anulares y diferentes velocidades de penetración.

V.1.2 EROSION.

Una alta velocidad anular puede causar erosión en las formaciones suaves del agujero. Si el uso de una técnica de

perforación con aire causa erosión en las paredes del pozo. La adición de agentes estabilizadores o cambio en la técnica de perforación con aire pueden ser requeridas para minimizar este problema.

La erosión en la sarta de perforación puede ser causada por las altas temperaturas y las velocidades anulares generadas cuando son encontradas zonas de vapor. Algunas personas estiman que la velocidad puede exceder los 10,000 pies/min en el espacio anular. La inyección de barreras de tipo químico puede inhibir este tipo de erosión.

V.1.3 CONTROL DE LA CORROSION.

La corrosión debe ser considerada seriamente antes de comenzar el uso de una técnica de perforación con aire (Bannerman y otros, 1973). Cuando perforamos a través de formaciones con contaminación Ácida (CO_2 H_2S), el problema puede ser mucho peor.

Mezclas de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sosa cáustica (NaOH) pueden ser usados para solubilizar y precipitar la contaminación con H_2S . Un inhibidor de incrustación orgánico fosfatado previene la depositación de incrustaciones de metal-tierra alcalina.

Una mezcla de aminas diseñadas para reducir la erosión y la corrosión de superficies metálicas en ambientes geotérmicos de alta temperatura ha incrementado la vida de la sarta de perforación. El inhibidor es premezclado con agua e inyectado al fondo del agujero con el aire, normalmente después de que se encuentre vapor. La capa de amina en la tubería crea una barrera protectora en las superficies de roca y metal con alta temperatura.

La técnica de perforación con polvo es un método probado de perforación efectiva en fracturas de vapor seco con baja presión sin dañar las formaciones. Compañías de servicio de aire, conocedoras con el equipo apropiado para perforación con aire, pueden ser contratadas para obtener los máximos beneficios que proveen las técnicas de perforación con aire.

Mientras se perfora con aire, la presión de inyección puede variar desde 150 hasta 700 lb/pg², dependiendo del volumen de vapor, tamaños del agujero, profundidad, restricciones de las herramientas en el fondo del agujero, tipo de técnica para perforación con aire, etc. La presión de circulación puede cambiar rápidamente, demandando que el equipo de aire ajuste los cambios de presión sin interrupción de la perforación.

V.2 PERFORACION CON NIEBLA.

El nombre "lodo-niebla" fue escogido porque lodo de perforación pretratado es inyectado con el aire y la combinación regresa a la superficie en forma de niebla. Esta técnica es utilizada cuando la cantidad que entra de agua es demasiado alta para utilizar la perforación con polvo, sin embargo no es suficiente para causar problemas en la limpieza del agujero.

Esencialmente, el equipo para una exitosa aplicación de la perforación con aire-polvo o lodo-niebla es el mismo. Las principales diferencias son un incremento en los volúmenes de aire requeridos y la inyección de un lodo de perforación pretratado.

V.2.1 LIMPIEZA DEL AGUJERO.

Cambiar a una técnica de perforación con niebla requiere un incremento de por lo menos 30 % en el volumen de aire. El volumen adicional es necesario para vencer las mayores pérdidas de presión friccionales causadas por recortes mojados adheridos a la sarta de perforación y al agujero, mayores velocidades de resbalamiento para mayores recortes mojados y el transporte de la más pesada columna de aire húmedo.

El lodo es inyectado en la corriente de aire para dispersar los recortes e inhibir su adherencia a la sarta de perforación y al agujero. La lubricación de la sarta de perforación y del agujero reduce los requerimientos en el volumen de aire y minimiza la formación de anillos de lodo.

Aunque las presiones de inyección desde 100 hasta 200 lb/pg² son normalmente suficientes para perforar con aire-polvo, presiones en exceso de 350 lb/pg² pueden ser encontradas mientras perforamos con lodo-niebla. Presiones hasta de 1250 lb/pg² pueden ser requeridas cuando grandes cantidades de fluido se presentan en el espacio anular.

La velocidad de invasión del fluido dictaminara la cantidad de aire y fluido que debe ser inyectado para limpiar eficientemente el agujero. Entradas del fluido de la formación mayores a 150 bl/hr han sido perforados exitosamente con lodo-niebla.

V.2.2 CONTROL DE LA CORROSION.

Las propiedades del fluido requerido para perforar con lodo-niebla son menores que un sistema de lodo convencional. Aunque es necesario tratamiento químico para minimizar la corrosión causada por el fluido y aire adicionales.

El control básico de la corrosión es proporcionado manteniendo el PH del sistema de lodo, arriba de 10.5 y tratando cualquier dureza o carbonatos con los químicos apropiados. Las incrustaciones de carbonato y sulfuro de hidrógeno son tratados en manera muy similar que en un sistema convencional de lodo.

Muestras de acero para corrosión "cupones" deben ser corridos en el equipo de fondo para monitorear el tipo y la velocidad de corrosión. La selección del mejor tratamiento químico o producto para controlar la corrosión se debe basar en el analisis de dichos cupones de acero.

Si se encuentra H₂S, la primer línea de protección es mantener el PH en o arriba de 11. Para la precipitación de sulfuros, una fuente de Zinc debiera ser agregada basandose en el nivel de contaminación y en el tipo de sistema de lodo.

Para reducir la corrosión por carbonatos, se usa cal para su tratamiento y se mantiene algún exceso para prevenir este tipo de corrosión.

La corrosión por oxígeno es la más difícil de combatir en un sistema de perforación con aire, porque el aire suministra grandes cantidades de oxígeno en el sistema de circulación. Existen muchos tipos de químicos que pueden ser usados para minimizar este tipo de corrosión.

La incrustación es un problema común con algunos tipos de fluidos. Usando un fluido alcalino, tratando los carbonatos y la dureza con los químicos apropiados reducirá grandemente la tendencia de la ocurrencia de incrustaciones.

Si el sistema para circulación de fluido es correctamente pretratado cualquier problema de corrosión puede ser mantenido en un nivel aceptable.

V.2.3 DETERMINACION DEL GASTO VOLUMETRICO DE AIRE.

La determinación del gasto de aire volumétrico requerido para mantener una adecuada circulación puede ser realizada con mediante un análisis desarrollado por R.R. Angel (Angel, 1958). El gasto volumétrico de aire para varios tamaños de agujero, tubería y velocidad de penetración pueden ser encontrados en su libro (ver Apéndice B).

Las curvas Angel proporcionan un buen punto de partida para empezar un programa de perforación con "aire-polvo". Sin embargo, hay algunas suposiciones que se consideran necesarias cuando usamos estas curvas de flujo. Angel supone que los recortes están moviéndose a la misma velocidad que el aire. También hace notar que esta es una suposición conservadora y el análisis nos indicó que las velocidades rangos de flujo pueden ser de 20 hasta 30 % menores.

La velocidad anular mínima de 3000 pie/min determinada, a través de la análisis, es adecuada en muchos casos para limpiar en una

aplicación de la perforación con "aire-polvo". El valor real puede ser mayor o menor dependiendo de cada situación específica en la perforación.

Las temperaturas en el fondo del agujero usadas para calcular estas cartas están suponiendo que en la superficie se tienen 80 °F, y se incrementan en 1 °F/100 pies de profundidad.

Finalmente las cartas Angel necesitan modificarse para ser aplicadas a los métodos de perforación con "niebla". La adición de fluido en la corriente de aire requiere que se incremente el gasto volumétrico de aire y la presión a la entrada del pozo, para mantener una conveniente limpieza del agujero para una velocidad de penetración determinada.

V.3 PERFORACION CON "FLUIDOS AEREADOS".

La mayoría de pozos geotérmicos tienen formaciones de agua dominante. La técnica de perforación con "fluidos aerados" provee el mejor medio de circulación para minimizar el daño a la formación, las pérdidas de fluido y los costos del pozo al perforar efectivamente este tipo de yacimientos.

Un sistema con fluidos de perforación aerados combina las ventajas asociadas con las técnicas de perforación con fluido convencional y la perforación con aire. La principal variante es que en este caso el aire deja de ser el fluido principal de perforación para convertirse en auxiliar; pero se sigue conservando el principio básico de esta tecnología, que es el de reducir lo más posible la densidad de estos fluidos, lo que es de mucha ayuda en los casos de pérdida de circulación, conservándose además, una velocidad de penetración mayor que si se empleara solamente lodo. Un sistema de presión de circulación balanceada puede efectivamente perforar en yacimientos geotérmicos de agua dominante con baja presión teniendo un completo regreso a la superficie.

Cuando perforamos en zonas productoras con un sistema convencional de lodo, la alta presión de circulación en el fluido y los recortes pueden ser forzados a la formación donde el sello de las fracturas puede ocurrir. En yacimientos geotérmicos, altas temperaturas pueden hornear este lodo de perforación atrapado causando aún más daño. Este sellamiento de las fracturas inhibe parte o todo el flujo de los fluidos desde la formación hacia la cara del agujero, resultando en una disminución de la producción máxima (Dareing y otros, 1981).

La intrusión de fluidos en la fractura cerca del perímetro de la cara del agujero es reducida o eliminada cuando la presión en el fluido de circulación cae debajo de la presión de la formación (Dareing y otros, 1981). El aire permite el control de esta presión diferencial entre el fluido de circulación en el fondo del agujero y la formación. El uso de un sistema de perforación con fluido aerado puede reducir el costo total del pozo por la disminución de las costosas pérdidas de fluidos de perforación, incrementando las velocidades de penetración, mejorando la eficiencia de la barrena e incrementando grandemente el límite de producción en los yacimientos geotérmicos.

Después de establecer una completa circulación, la composición de los volúmenes de inyección de aire y fluido son controlados correctamente para regular la presión de los fluidos en el fondo del pozo. Ahí se tienen las mínimas pérdidas de fluido de perforación y recortes hacia zonas productoras o con pérdida de circulación cuando la presión en el fondo del agujero aproximadamente esta por debajo de la presión de formación.

Cada sección de un pozo puede necesitar un cambio en la relación aire-lodo. La geometría del agujero, las propiedades del lodo, la eficiencia de la bomba, los problemas en el agujero, las temperatura, los gastos de circulación pérdida, el nivel de agua en el pozo, etc., son los parámetros necesarios para la determinación de la relación aire-lodo para una profundidad determinada. Para mejorar el sistema

de fluidos aerados, la relación aire-lodo se ajusta durante el proceso de perforación. La relación típica aire-lodo varía entre 20:1 y 30:1. Sin embargo ha sido controlada rutinariamente una relación estándar de aire-lodo hasta de 50:1 con excelentes resultados de perforación.

V.3.1 Técnicas de perforación con fluidos aerados.

Hay 2 métodos básicos para aerear una columna de fluido : 1) Aereación estándar y 2) Sarta parasita.

Aereación estándar : Cantidades apropiadamente proporcionadas de aire y fluido de perforación se combinan en el cabezal de la mesa rotaria. La presión de circulación en los fluidos aerados, gradualmente aumenta conforme este viaja hacia abajo en la sarta de perforación. Esto es debido al incremento neto en la combinación de presiones (por fricción, hidrostática y por expansión térmica). Este incremento neto en la presión de fluido circulando comprime el aire en pequeñas burbujas, en un sistema de dos fases. Al tiempo en que el fluido alcanza la barrena, el volumen de aire es comprimido en una proporción pequeña del volumen en el fluido. Después que el fluido aerado pasa a través de la barrena, el aire se expande debido a la caída de presión asociada. La combinación de las energías neumática (aire) e hidráulica (lodo) mejora la limpieza del agujero cuando se compara con lodo convencional o sistemas de agua.

Conforme el fluido aerado sube por el espacio anular, disminuye la presión hidrostática sobre la columna de fluido aerado. Esto permite al aire más expansión posterior dentro del pozo, incrementando la velocidad anular para un gasto de fluido determinado. Conforme el fluido convencional es desplazado fuera del espacio anular, la presión de circulación en el fondo y en la barrena disminuye con un aumento en la perforabilidad de la formación.

La ventaja principal de utilizar el método de aereación estándar es completar la aereación en todo el sistema para la circulación del fluido. Esta técnica es superior para disminuir la presión en el

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

fluido circulante y por consiguiente generar máximos beneficios de la técnica aireada.

Sarta parasita : Una sarta parasita es una tubería tubular que se instala y cementa fuera de la superficie de la tubería de revestimiento y queda soldada a la tubería de revestimiento cerca de la capata. La principal ventaja de una sarta parasita es que se puede inyectar aire abajo de la tubería hasta una profundidad dada y regresar por dentro de la tubería mientras se perfora con un sistema convencional de lodo (Dareing y otros, 1981).

El nivel de fluido estático debe ser conocido para posicionar la sarta parasita. En la mayoría de los pozos esta información es raramente conocida, antes de perforar zonas con pérdida. Una vez que la sarta parasita ha sido soldada y cementada es imposible cambiarla de lugar.

Instalar una sarta parasita puede resultar muy costoso. La perforación de un agujero mayor, el cemento extra, el tiempo de equipo, los costos de soldadura y el costo de la sarta parasita por si sola incrementan significativamente el costo total de un pozo.

V.3.2 Equipo de fluidos aireados.

Se requieren compresoras para perforar con aire las cuales deben tener capacidad adecuada en volumen y presión para todas las fases de la perforación con fluido aireado. Un medidor y registrador de orificio debe ser usado para medir el volumen de aire y la presión para determinar la relación de aire-lodo apropiada. Antes de empezar el proceso de aireación, el volumen de fluido en el sistema superficial debe ser disminuido, para manejar el fluido desplazado causado por la expansión del aire en el pozo.

V.3.3 Hidráulica.

En un sistema convencional de lodo, la disipación de la energía hidráulica en la barrena, mejora la perforación y limpieza del

agujero. Pequeños diámetros de inyector en la barrena generan una fuerte caída de presión que produce la energía hidráulica requerida.

En un sistema de circulación cerrado, las condiciones en el fondo del pozo son considerablemente diferentes. Un gradiente de presión diferencial favorable crece entre la formación y el fluido en el fondo del agujero incrementa la perforabilidad de la formación. Esta acción de pérdida de presión elimina la necesidad de pequeños inyector en la barrena. Remover estos pequeños inyector en la barrena proporciona el aire comprimido para operar en rangos bajos de presión para un mejor sistema de perforación con fluidos cerrados.

En un gasto de lodo dado, aumenta la eficiencia de la limpieza por la combinación de la energía neumática (aire) e hidráulica (lodo). Esto da como resultado perforaciones más profundas y una reducción en la repulverización de los recortes perforados.

Viscosidad march y esfuerzo gel.

Para mejorar el control sobre la presión de circulación en el fondo del pozo, la viscosidad "march" debe ser bastante alta para sostener una aereación estable en el espacio anular y bastante baja para facilitar la separación entre el aire y el lodo en el sistema superficial. Si la viscosidad "march" es demasiado baja, algo de aire puede salir del lodo en el espacio anular y formar bolsas, causando un flujo con cierto golpeteo. Un rango típico de viscosidad "march" es de 35 a 40 (seg/qt), mientras el esfuerzo de gel debe ser entre 1 y 5 (lbz/plg²).

Usualmente, el lodo no es agitado en las presas debajo del silenciador de aire. La correcta viscosidad y esfuerzo gel da al aire suficiente tiempo para desprenderse del lodo, antes de entrar a las bombas.

Antes de encontrar una zona con severa pérdida, una alta viscosidad "march" puede ser necesaria para tener una buena circulación. El incremento de la viscosidad ayuda a la separación del

aire en la columna de lodo y ayuda al proceso de aeración. Después de una completa circulación aerada puede obtenerse una reducción en la viscosidad "wanch" y una minimización en los problemas con espumas.

Densidad.

Una baja densidad de lodo reduce los requerimientos de aire para las relaciones de lodo, y disminuye la tendencia de la espuma en el lodo. Sin embargo, se desea que se reduzca también la densidad y se incremente el consumo regular de material aditivo para el lodo y poder cambiar el inhibidor de corrosión necesario y consumir un antiespumante químico. El incremento en el consumo de gastos de material de lodo es debido a la extensiva agua diluida requerida para bajar la densidad. La relación aire-lodo y la densidad puede ser arreglada para obtener la relación más económica de consumo en materiales del lodo.

V.3.4 Control de la corrosión.

Para que el control de la corrosión sea eficaz, es imperativo que el tipo y rango de corrosión sea monitoreado con análisis de corrosión (muestras de acero). Las muestras de acero para corrosión son usualmente instaladas en la punta de la herramienta localizada en el primer pie encima de los lastrabarreras de perforación y abajo del vástago auxiliar. La selección del tipo de tratamiento químico con productos de control de corrosión puede ser basado en la muestra de acero analizada.

Algunos químicos básicos de corrosión comúnmente usados por lodos aerados y probados por ser más efectivos son : Sosa Cáustica, Minia Filming Inhibidora de Corrosión, Inhibidor de Escama de Fosfato Orgánico, Inhibidor de Corrosión Organofosforo, Etc..

Para contaminación de gas Ácido (CO_2 y H_2S), el tratamiento es prácticamente el mismo que con el sistema convencional de lodo. Algún químico de corrosión adicional comúnmente usados son : Óxido de Zinc, CaI , Etc..

V.4 PERFORACION CON "ESPUMAS".

La técnica de perforación con espumas utiliza una emulsión estable lodo-aire. El fluido de circulación es formulado con aditivos de lodo, agentes espumantes, y aire comprimido. Esta técnica se usó cuando las técnicas de perforación aire-lodo, niebla o fluido aireado no pueden ser practicadas a causa de razones económicas, mecánicas o de otro tipo.

Esta técnica presenta menores requerimientos en volumen de aire, volumen de fluido y velocidades anulares. Sin embargo, los problemas del agujero pueden dictaminar la cantidad total de aire y las velocidades de inyección del fluido.

El bajo volumen de fluido requerido puede mejorar la habilidad para perforar agujeros de gran diámetro. El decremento en la presión de circulación permite perforar zonas de severas pérdidas con un mínimo de fluido perdido.

Los productos del lodo proporcionan estabilidad en el agujero, capacidad de acarreo, características espumantes y combaten la corrosión. Esto también disminuye la tendencia del aire a romper la espuma en el espacio anular. El aire aligera la presión de circulación en el fondo del agujero.

La mezcla de "espumas" puede ser circulada solamente una vez. Después que la mezcla alcanza la superficie esto no puede ser recirculado. La espuma debe ser transferida a una presa donde puede ser dispersada en la forma de líquido. Esto es una posibilidad de preocupación ambiental por la gran cantidad de espuma que se presenta en las presas superficiales.

Quando encontramos formaciones con flujo, mientras el fluido de la formación entra al pozo, la fuerza de la espuma se reduce, disminuyendo la habilidad en el sistema circulante para limpiar el agujero de recortes. Esto requiere incrementar la concentración de materiales en lodo para dar resistencia a la espuma, incrementando

los costos de perforación.

Esta técnica de perforación con aire es raramente usada en perforación geotérmica. Esta técnica no es recomendable hasta que todos los otros sistemas de perforación con aire hayan sido aplicados.

V.4.1 MEDICION DEL VOLUMEN DE AIRE.

Para utilizar apropiadamente cualquier técnica de perforación con aire, es importante medir y registrar el volumen de aire inyectado y la presión de circulación.

El método más comúnmente usado en la industria geotérmica es el método de medición por orificio. El medidor de flujo por orificio determina la caída de presión diferencial a través de una placa de orificio, colocada en la línea del aire, y de una línea de presión estática. Estos valores son registrados usando un registro estándar de 24 horas. El volumen de aire y la presión de circulación pueden ser calculadas con el uso de la norma "API standar 2500" y las presiones registradas.

Estos registros son valiosos para el operador geotérmico porque ellos pueden indicar áreas de problemas potenciales, tales como pérdidas de circulación, intrusión de fluido, tubería de perforación atrapada, etc.. Un operador de aire experimentado puede interpretar las cartas de aire e informar al operador de cualquier problema; esto puede reducir los costos de perforación.

V.5 VENTAJAS.

Las técnicas de perforación con aire ofrecen las siguientes ventajas, cuando se compara con el uso de sistemas convencionales de lodo (*M-I Air Drilling Handbook, 1990*).

VELOCIDAD DE PENETRACION (ROP).

La densidad de circulación en el fondo del agujero de un sistema de perforación con aire es bajo, comparado con un sistema típico de lodo. La presión disminuida que el fluido circulando ejerce en la pared del pozo incrementa el alivio de los esfuerzos residuales verticales y axiales en las formaciones. Esto resulta en una "depresurización" que incrementa la perforabilidad de la roca.

Conforme la presión del fluido circulando en el fondo del agujero disminuye y cae abajo de la presión en la formación, la roca tiende a "explotar" en el diente de la barrena. Esto resulta en una más rápida velocidad de penetración, dado que hay suficiente volumen del fluido circulando para limpiar el agujero de recortes.

El incremento en la velocidad de perforación puede ser de 2 a 5 veces comparado con un agujero perforado con lodo convencional. Esto puede reducir el número de días requeridos para terminar un pozo y reducir los costos de perforación.

EFICIENCIA DE LA BARRENA.

Las elevadas temperaturas de formación son comunes cuando perforamos un pozo geotérmico. Uno de los principales factores que afectan la eficiencia de la barrena es la vida de los cojinetes. Conforme las altas temperaturas de formación son encontradas, la vida de los cojinetes puede ser disminuida. Un sistema de perforación con aire suministra a la barrena una corriente fría de aire que fluye alrededor de los cojinetes, reduciendo su temperatura e incrementando la eficiencia de la barrena.

Un sistema de perforación con aire provee suficiente turbulencia al fluido para asegurar limpieza apropiada en el fondo del pozo. Los recortes abrasivos son acarreados lejos de la barrena hacia el espacio anular, más rápidamente que un sistema convencional de lodos. Esto disminuye la repulverización de los recortes perforados e incrementa la eficiencia de remoción en el equipo para el control de

sólidos en la superficie y mejora la eficiencia en la barrena.

Disminuyendo la temperatura de los cojinetes y reduciendo la repulverización de los recortes perforados se incrementa la longitud que puede ser perforada por una barrena. Esto puede resultar en menos barrenas y menos viajes requeridos para terminar un pozo y reducción en los costos por pozo (Lín, 1981).

DETECCION DE ZONAS DE BAJA PRESION.

La disminución en la presión de circulación en el fondo del agujero permite registrar zonas productoras con baja que pudieran ser ignoradas mientras perforamos con lodo. Esta información puede ser usada para protegerse contra la posibilidad de dañar estas zonas conforme seguimos perforando.

PERFORACION A TRAVES DE ZONAS CON PERDIDA.

Una vez que una zona productora o con "pérdida" es encontrada, es posible continuar perforando a través y más allá de esta formación con baja presión. El operador puede incrementar la producción para cada pozo, mediante perforación profunda para encontrar nuevas zonas productoras.

El sistema de aire circulando existente puede o no ser cambiado para mantener circulación completa. Un sistema de perforación con aire apropiadamente diseñado y dirigido permitira una rápida conversión de una técnica a otra sin ningun retraso excesivo.

COSTOS DEL MATERIAL PARA EL LODO.

La presión de fluido circulando en el fondo del agujero puede exceder a la presión de formación cuando perforamos en zonas de baja presión con un sistema de lodo convencional. Esto puede inducir fracturas, permitiendo que sea perdido fluido de perforación hacia una formación porosa. Mayores costos de perforación resultan a causa del incremento total de materiales para el lodo requeridos para

reemplazar el lodo perdido (Carson y Lin, 1982). La presión de circulación más baja en un sistema de perforación con aire usualmente permite perforar efectivamente a través de zonas con baja presión, minimizando las pérdidas de fluido de perforación y permitiendo su completo regreso a la superficie.

Por disminuir las pérdidas de circulación, el número de días perforando y los productos requeridos para el servicio del sistema de circulación, los costos de perforación y del lodo pueden ser reducidos mediante el uso de un sistema de perforación con aire.

MINIMIZAR EL DAÑO A LA FORMACION.

El uso de técnicas de perforación con aire puede minimizar el daño a la formación y mejorar la producción de pozos geotérmicos con baja presión, cuando los comparamos con un pozo perforado con lodo convencional. Si la presión del fluido circulando es mayor que la presión de la formación, ahí hay una pequeña oportunidad para que el fluido circulando pueda invadir y dañar la zona productora.

Algunos operadores de pozos geotérmicos han indicado que los pozos terminados con sistemas de fluido de perforación convencionales tienen pérdida de producción geotérmica, cuando los comparamos los pozos perforados con sistemas de perforación con aire en la misma área. Estos operadores sienten que las bajas presiones de circulación en el fondo disminuyen la invasión del agujero y el taponamiento en las fracturas con alta temperatura por el fluido de perforación y los recortes.

BIBLIOGRAFIA

* Angel, R.R., Volume Requirements for Air and Gas Drilling, Gulf Publishing Company, 1958.

* Bannerman, J.K., and Davis, N., and Wolke, R.M., "Geothermal Drilling Fluid Systems", Geothermal Resources Council Transaction, Volume 2, July 1978, pp. 27-29.

* Carson, C.C., and Lin, Y.T., "The Impact of Common Problems in Geothermal Drilling and Completion", Geothermal Resources Council Transactions, Volume 6, October 1982, pp. 195-198.

* Dearing, D.W., and Kelsey, J.R., "Balanced Pressure Techniques Applied To Geothermal Drilling", Geothermal Resources Council Transactions, Volume 5, October 1981, pp. 233-236.

* Lin, Y.T., "The Impact Of Bit Performance On Geothermal Well Cost", Geothermal Resources Council transactions, Volume 5, October 1981, pp. 253-256.

* M-I Air Drilling Handbook, Revised 1990.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

El presente trabajo es una recopilación bibliográfica de los procedimientos seguidos hasta la fecha y las técnicas de perforación con aire en pozos geotérmicos. A lo largo de este trabajo se ha hecho un análisis de cada técnica viéndola como una alternativa más para optimizar la perforación geotérmica por medio del empleo del aire en forma de espumas, lodos aireados y niebla.

Cada una de las técnicas de perforación con aire tiene un propósito y aplicación específica para la perforación de yacimientos geotérmicos. Estos métodos de perforación ofrecen muchas ventajas cuando los comparamos con un sistema convencional de lodo. Si los procedimientos apropiados son seguidos, se puede ahorrar dinero, tiempo y se obtendrá una mejor producción en los pozos geotérmicos.

El uso de sistemas de perforación con aire puede reducir el costo total del pozo mediante: 1) disminución de las costosas pérdidas de fluido de perforación, 2) El incremento en la velocidad de penetración, 3) mejora en la eficiencia de la barrena y 4) aumentando grandemente el límite de producción.

Cuando se perfora en zonas productoras con sistemas de lodo convencional, la alta presión de circulación del fluido y los recortes pueden ser forzados en la formación, donde el cierre de las fracturas puede ocurrir.

El método de perforación con fluido aireado en la formación productora puede no tener una amplia aplicación, sin embargo describe uno de varios métodos alternos para perforar pozos en yacimientos geotérmicos de baja presión.

La Presencia de agua, las formaciones blandas y los derrumbes en el agujero son algunos de los factores que ocasionan problemas tales como reducción en la eficiencia de la barrena.

Cuando se planea el uso de la perforación con aire, datos adecuados de la formación y los antecedentes constituyen el factor más importante a tener en cuenta.

La tecnología empleada esta todavía en desarrollo y por consiguiente el uso de estos medios de perforación alternos no ha sido sistematizado.

Se debe tomar en cuenta que la perforación con aire aplicada a los pozos geotérmicos será de una gran ayuda a la industria y solo se requiere familiarizarse un poco más con ella para aceptarla y crear experiencia.

El utilizar las técnicas de perforación desarrolladas en la industria petrolera puede dar buenos resultados, sin embargo las condiciones, como temperatura, corrosión, incrustación, etc., existentes en un yacimiento geotérmico son más severas. Es por ello que las técnicas de perforación con aire deben desarrollarse teniendo en cuenta las características de las formaciones para que resulten exitosas.

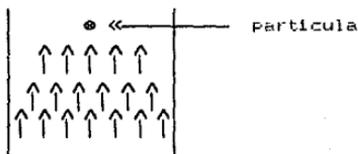
En lo que respecta a nuestro país, estas técnicas han sido poco utilizadas con lo cual se tiene poco desarrollo, se espera que en un futuro no lejano sea una fuerte opción para el desarrollo de la industria geotérmica.

APENDICES

A P E N D I C E A

DEDUCCION DE LA ECUACION PARA CALCULAR EL GASTO DE AIRE

Partiendo de que necesitamos una fuerza capaz de levantar los recortes de formación (partículas), tenemos:



se conoce que :

$$F = m a \quad \dots (1)$$

de la figura se tiene : ... (2)

$$F = \underset{(-)}{\text{(peso de la partícula)}} + \underset{(+)}{\text{(fza. de flotación)}} - \underset{(+)}{\text{(fza. de arrastre)}}$$

pero se tiene :

$$\text{peso de la partícula} = - M_p \frac{g}{g_c} \quad (\text{Ley de Newton}) \quad \dots (3)$$

$$\text{fuerza de flotación} = M_f \frac{g}{g_c} \quad \dots (4)$$

$$\text{fuerza de arrastre} = f \quad \dots (5)$$

$$f = T A_{tp}$$

Donde :

f = Fuerza de arrastre.

T = Esfuerzo al corte.

A_{tp} = Area transversal de la partícula.

Utilizando la definición del coeficiente de arrastre (C_D) :

$$C_D = \frac{T}{\rho_f \frac{V^2}{g_c}} = \frac{\frac{f}{A_{tp}}}{\rho_f \frac{V^2}{g_c}} \quad \dots (6)$$

Reacomodando :

$$f = \frac{C_D \rho_f v^2 A_{tp}}{2 g_c} \quad \dots (7)$$

$$F = 0 \quad \text{para } a = 0$$

Haciendo una equivalencia de fuerzas sobre una partícula tenemos :

$$0 = -M_p \frac{g}{g_c} + M_f \frac{g}{g_c} + \frac{C_D \rho_f v^2 A_{tp}}{2 g_c} \quad \dots (8)$$

multiplicando por g_c ambos miembros de la ecuación

$$0 = -M_p g + M_f g + \frac{C_D \rho_f v^2 A_{tp}}{2} \quad \dots (9)$$

despejando v^2

$$v^2 = \frac{2 (M_p g - M_f g)}{C_D \rho_f A_{tp}} \quad \dots (10)$$

Para una esfera tenemos que :

$$M_p = \rho_p V = \frac{4}{3} \rho_p \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3 = \rho_p \frac{4 D_p^3 \pi}{24}$$

$$M_p = \frac{\rho_p D_p^3 \pi}{6} \quad \dots (11)$$

$$M_f = \frac{\rho_f D_p^3 \pi}{6} \quad \dots (12)$$

sabemos que el Área de la Partícula es :

$$A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad \dots (13)$$

además se tiene que $A_{tp} = A_p$

sustituyendo las ecuaciones (11), (12) y (13) en la ecuación

(10) nos queda :

$$v^2 = \frac{2g \left[\frac{\rho_p D_p^3 \pi}{6} - \frac{\rho_f D_p^3 \pi}{6} \right]}{C_D \rho_f \pi \frac{D_p^2}{4}}$$

$$v^2 = \frac{2g \frac{D_p^3 \pi}{6} (\rho_p - \rho_f)}{C_D \rho_f \pi \frac{D_p^2}{4}}$$

$$v^2 = \frac{8g D_p (\rho_p - \rho_f)}{6 C_D \rho_f}$$

reduciendo nos queda :

$$v^2 = \frac{4g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 C_D \rho_f}$$

$$v = \left[\frac{4g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 C_D \rho_f} \right] \quad \dots (14)$$

donde :

v = Vel. de deslizamiento de la partícula, pies/seg.

D_p = Diámetro de la partícula, pies.

ρ_p = Densidad de la partícula, lb/pie³.

ρ_f = Densidad del fluido, lb/pie³.

C_D = Coeficiente de arrastre, adimensional.

g = Aceleración de la gravedad, pies/seg.²

ahora bien, si tenemos que :

$$G = \frac{G}{\rho_f} \quad \text{y} \quad v = \frac{G}{Aa}$$

sustituyendo nos queda :

$$v = \frac{\frac{G}{\rho_f}}{Aa} = \frac{G}{Aa \rho_f} \quad \dots (15)$$

ahora bien :

$$\text{si } \rho_p = \rho_f = \rho \quad \text{ya que } \rho_p \gg \rho_f$$

igualando las ecuaciones (14) y (15) nos queda :

$$v = \frac{G}{Aa \rho_f} = \left[\frac{4g D_p (\rho_p - \rho_f)}{3 C_D \rho_f} \right]^{1/2}$$

despejando G nos queda la ecuación

$$G = Aa \left[\frac{4g D_p \rho_p \rho_f^2}{3 C_D \rho_f} \right]^{1/2}$$

reduciendo terminos nos queda :

$$G = Aa \left[\frac{4g D_p \rho_p \rho_f}{3 C_D} \right]^{1/2}$$

si tenemos la siguiente ecuación:

$$P_f = \frac{S P^*}{53.3 T} \quad (\text{por la ley de los gases ideales})$$

nos queda finalmente la ecuación del gasto :

$$G = Aa \left[\frac{4g \ l_p \ \rho_p \ \rho_f}{3 \ l_D \ 53.3 \ T} \right]^{1/2}$$

P^* medido a condiciones estandar (1 atm., 68 ° F)

De lo anterior se deduce que la cantidad de masa de aire necesaria para levantar una partícula de formación es directamente proporcional a la presión.

A P E N D I C E B

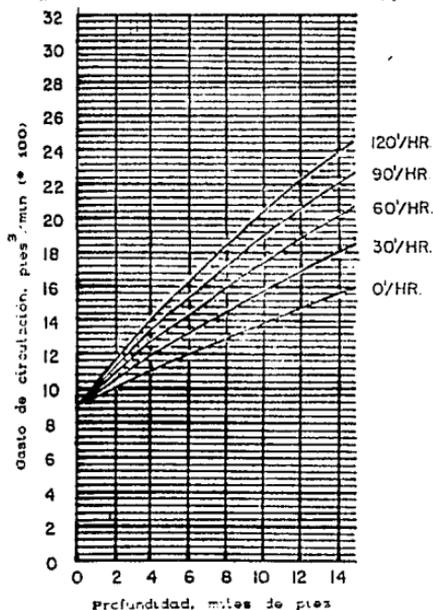
CALCULOS DEL VOLUMEN DE AIRE - GAS

A continuación se presentan los gastos de circulación que son requeridos para la perforación con aire y gas. Estos gastos son los mínimos necesarios para proveer las velocidades en el fondo del espacio anular que son equivalentes en capacidad de acarreo a una velocidad estandar de aire a 3000 pies/min. Estas velocidad de aire es requerida para mejorar los resultados en la perforación de formaciones secas.

Gravedad del gas 1.0

Tuberia de perforación
de 4 1/2 pg.

Agujero de 8 3/4 pg.



Cada curva proporciona los requerimientos de aire o gas en pies³/min contra la Profundidad para una velocidad particular de perforación. Se incluyen datos para densidades en el gas de 0.6, 0.8 y 1.0 (aire). Los gastos de circulación para gravedades específicas intermedias pueden ser encontradas con la interpretación de la carta.

Cada curva es una solución gráfica de la siguiente ecuación :

$$\frac{0.61 S (T_s + Gh) Q^2}{(Dh^2 - Dp^2)^2 V_e^2} = \sqrt{(P_s^2 + b Tav^2) e^{2ab/Tav - bTav^2}}$$

donde :

$$a = \frac{50 + 29.8 K D^2 h}{53.3 Q}$$

$$b = \frac{1.625 \times 10^{-6} Q^2}{(Dh - Dp)^{1.333} (Dh^2 - Dp^2)^2}$$

Dh = Diámetro del agujero, pies

Dp = Diámetro exterior de la tubería, pies

e = Base logaritmo exponencial, 2.71828

G = Gradiente de temperatura en el espacio anular, °R/pies

h = Profundidad, pies

Q = Velocidad de perforación, pies/hora

Ps = Presión del espacio anular en la superficie, lb/pie² abs

Q = Gasto de circulación requerido, pie³/min (60 °F y 14.7 psia)

S = gravedad específica del gas en relación al aire, adimensional

Ts = Temperatura superficial en el espacio anular, °R

Tav = Promedio de la temperatura en fondo del agujero para el espacio anular, °R

Ve = velocidad del aire con densidad estándar, pie/min

Esta ecuación incluye el efecto de los sólidos perforados en la velocidad y presión de fondo en el agujero. Esto fue derivado mediante la aplicación del factor de fricción de Weymouth para flujo vertical.