

8
2 ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DEL CONTROL DE SOLIDOS
MEDIANTE COMPUTADORA PERSONAL
EN LA PERFORACION GEOTERMICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A N :
**ALFONSO CASIMIRO CONTRERAS
MIGUEL ESTEVA JIMENEZ
MARTIN CARLOS VELAZQUEZ FRANCO**



CD. UNIVERSITARIA, D. F.

1991

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ANALISIS DEL CONTROL DE SOLIDOS MEDIANTE COMPUTADORA PERSONAL EN LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

I N D I C E

	PAGINA	
CAPITULO I	INTRODUCCION	1
CAPITULO II	GENERALIDADES	4
2.1	Energia Geotérmica	4
2.2	Origen de los Fluidos Geotérmicos	9
2.2.1	Clasificación de los Sistemas Geotérmicos	13
2.3	Panorama de la Energía Geotérmica en México y el Mundo	24
2.3.1	Panorama de la Energía Geotérmica en México	24
2.3.2	Ventajas y desventajas de la Energía Geotérmica	31
2.3.3	Panorama de la Energía Geotérmica en el Mundo	35
CAPITULO III	PERFORACION GEOTERMICA	41
3.1	Sistemas de Perforación	41
3.1.1	Perforación Rotaria Hidráulica	43
3.1.2	Turboperforación	49
3.2	Perforación de un Pozo Geotérmico	50
3.2.1	Aspectos Unicos en la Perforación de Pozos Geotérmicos	52
3.2.2	Construcción de un Pozo Geotérmico	53
3.3	Problemática de la Perforación Geotérmica	59
3.3.1	Pérdidas de Circulación	59
3.3.2	Inestabilidad del Fluido de Perforación	60
3.3.3	Estrechamiento y Derrumbes en las Paredes del Pozo	61
3.3.4	Atrapamiento de tubería	63

3.3.5 Pegaduras de Tubería	63
3.3.6 Pérdida del Diámetro de la Barrera	65
CAPITULO IV FLUIDOS DE PERFORACION	56
4.1 Importancia y Funciones	66
4.1.1 Funciones del Fluido de Perforación	66
4.2 Clasificación de los Fluidos de Perforación	72
4.2.1 Fluidos Neumáticos	72
4.2.2 Fluidos Base Agua	74
4.2.3 Fluidos Base Aceite	76
4.3 Reología	79
4.3.1 Clasificación del Tipo de Fluido	80
4.3.1.1 Fluidos Newtonianos	82
4.3.1.2 Fluidos no Newtonianos	83
4.3.2 Factores que Afectan la Reología	88
4.4 Criterio de Selección del Fluido de Perforación	89
CAPITULO V CONTROL DE SOLIDOS	96
5.1 Contaminación del Fluido de Perforación	96
5.1.1 Contaminación con Cemento	96
5.1.2 Contaminación con Yeso y Anhídrido	99
5.1.3 Contaminación con Sal	101
5.1.4 Contaminación por Incorporación de Sólidos	103
5.2 Sistema de Control de Sólidos	108
5.2.1 Análisis del Control de Sólidos	110
5.2.2 Evaluación y Selección de Cribas Vibratorias	122
5.2.3 Evaluación y Selección del Hidrociclón	140
5.2.4 Evaluación y Selección de la Bomba Centrífuga	145
5.2.5 Evaluación y Selección de la Centrífuga	152
5.2.6 Arreglos Comunes en la Eliminación de Sólidos	155
5.3 Implementación del Programa de Computo en Pc	157
DISCUSION DE RESULTADOS	168

NOMENCLATURA	171
APENDICES	173
CONCLUSIONES	183
BIBLIOGRAFIA	185

CAPITULO I

I N T R O D U C C I O N

La geotermia es una energía que siempre ha existido en todos los tiempos, sin embargo hasta principios del presente siglo empezó a dársele uso en forma comercial haciéndose notoria su existencia hace apenas dos décadas. En la actualidad con el incremento del costo de los combustibles se le ha dado una importancia relevante, representando una solución energética para diversos países, carentes de dicho combustible.

Actualmente existe un gran interés por desarrollar campos geotérmicos sobre todo en los países que circundan el océano pacífico, ya que en la mayoría existe una gran actividad volcánica, la cual está íntimamente ligada a la actividad geotérmica.

Sin embargo, el simple hecho de que un país o región pertenezca geográficamente a estas porciones de continentes, no garantiza el hallazgo, 'a priori' de un campo geotérmico. Por lo tanto, se debe de realizar una serie de estudios e investigaciones para poder localizarlos.

Para esto, una vez que se ha obtenido una visión general de la estructura del campo geotérmico por medio de estudios geológicos, geofísicos, y geoquímicos se deberán realizar perforaciones con fines exploratorios en las zonas más prometedoras del campo, a fin de certificar la existencia y la estructura interna del yacimiento en el subsuelo.

Los resultados obtenidos sumados a toda la información anterior, permitirán obtener el primer modelo conceptual del yacimiento, que irá mejorándose conforme se tenga un mayor conocimiento del mismo, en base a la perforación y explotación del campo.

Para realizar dichas perforaciones se requiere de la elaboración de un programa de perforación detallado, en el cual deberá de indicar la localización del pozo, la posible columna litológica a perforar y la profundidad total, para que de esta manera se seleccione el equipo con la adecuada capacidad para desarrollar las actividades que se puedan presentar durante la perforación.

Se deberán determinar los diámetros y tipos de barrenas a utilizar, diámetros y grados de tuberías de perforación así como cantidad de lastrabarreas, y las posibles zonas donde se tenga que revestir, para esto se determinan las dimensiones y características de las tuberías de revestimiento y accesorios a utilizar así como tipo de cemento y aditivos.

Se elaborará un programa de lodos de perforación el cual incluya el tipo y características del mismo.

Durante la construcción del pozo se presentan una serie de problemas propios del yacimiento que se tendrán que controlar durante la perforación, como son la temperatura, presión, contaminación e incorporación de sólidos en el lodo de perforación.

Estas dos últimas tienen gran influencia sobre el control de la temperatura, presión y costos del pozo. Ya que un deficiente control incrementaría las pegaduras de tubería, la pérdida de fluido, se reducen los ritmos de penetración, aumentan los costos de perforación, etc., e incluso se puede perder el pozo.

Como la perforación es muy costosa y presenta muchos riesgos, siempre se deberá mantener un adecuado control de los problemas presentados, esto traerá como consecuencia una mejor construcción y optimización de los costos del pozo.

El presente trabajo pretende mostrar la importancia que se debe tener para evitar y controlar algunos de estos problemas, como los efectos que se producen por un deficiente control de só -

lidos generados durante la perforación y la posible selección de un equipo de control de sólidos en superficie, así como los trabajos que se realizan durante la extracción de esta energía.

De los estudios realizados, México es uno de los países que cuenta con características geotérmicas en la mayor parte de su territorio, además de una gran cantidad de manifestaciones termales (volcanes de lodo, solfataras, manantiales hidrotermales, etc.), de tal manera se le debería ponerle más interés, a la exploración explotación, producción y diversificación de esta energía.

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1 ENERGIA GEOTERMICA

La temperatura tiene un papel importante en todas las teorías concernientes al origen y desarrollo de la estructura del interior y la superficie de la tierra.

La determinación de las temperaturas profundas actuales no pueden hacerse directamente, tienen que apoyarse en mediciones superficiales y con grandes limitaciones.

El potencial energético que puede ser extraído de un volumen rocoso puede ser calculado con la siguiente ecuación :

$$Q_a = C \rho V \Delta T \quad (1.1)$$

donde ;

Q_a = calor almacenado, (cal).

C = capacidad térmica, (cal/gr- $^{\circ}$ C).

ρ = densidad, (gr/cm 3).

ΔT = variación de temperatura, ($^{\circ}$ C).

V = volumen de roca (cm 3)

Como se tiene que la roca es porosa y contiene agua, es modificada de la siguiente manera la ecuación 1.1.

$$Q_a = (\theta \rho_w C_w + (1 - \theta) \rho_r C_r) V \Delta T \quad (1.2)$$

donde ;

θ = porosidad fraccional.

ρ_w = densidad del agua, (gr/cm 3).

ρ_r = densidad de la roca, (gr/cm³).

Ejemplo :

Determinar el potencial energetico que puede ser extraido de una roca ignea, de un volumen de 40 sillias cubicas que tiene una temperatura de 200 °C hasta llegar a 0 °C, con una densidad 2.7 gr/cm³ y una capacidad termica de 0.19 cal/ gr-°C.

$$Q_a = 0.19 \times 2.7 \times 10^6 \times 1.667 \times 10^{11} \times (200 - 0).$$

$$Q_a = 1.71 \times 10^{19} \text{ calorías.}$$

Es necesario conocer el gradiente de temperatura, para analizar el flujo de calor que se disipa en la superficie y establecer información acerca de la cantidad de energia geotérmica disponible en la region.

se tiene que :

$$Q_c = K A (\Delta T / \Delta Z) \quad (1.3)$$

donde;

Q_c = flujo de calor, (cal/seg).

K = conductividad térmica de la roca, (cal/seg-cm-°C).

A = Area transversal, (cm²).

$\Delta T / \Delta Z$ = gradiente de temperatura, (°C/cm).

De la información obtenida en la superficie, se establece que la temperatura se incrementa en promedio, en una razón de 30 °C por kilómetro, y que las variaciones de conductividad térmica de las rocas puede causar gradientes térmicos locales entre 10 °C y 50 °C por kilómetro.

$$\text{gradiente térmico} = Dt/Dz = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C/m.}$$

El calor fluye de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura. La conductividad depende de la composición de la roca; la presencia de sulfatos, óxidos o metales puros así como la humedad, aumentan la conductividad.

La conductividad térmica de algunas rocas se indican a continuación.

Conductividad Térmica a presión atmosférica.

Roca	(Cal/s cm °C)
Granito	5 a 7 E-3
Diabasa	5 E-3
Basalto	4 E-3
Gabro	5 E-3
Dunita	8 a 9 E-3

Debido a la baja conductividad térmica de la roca, la temperatura actual de la superficie debe de haber iniciado el flujo hace muchos millones de años, del centro a la superficie.

Muestras de rocas son llevadas al laboratorio para determinar su conductividad térmica, sin embargo los gradientes no necesariamente tendrán las mismas condiciones ambientales en el laboratorio que 'in situ'.

Los factores que afectan el gradiente de temperatura bajo la superficie terrestre, principalmente son los siguientes : (según H.S. Washington-1939).

- 1.-La variación de la conductividad térmica debida a la composición de las rocas.
- 2.-La proximidad de una cámara magmática.
- 3.-La circulación de agua subterránea.
- 4.-La humedad de las rocas.

- 5.-La producción o consumo de calor por reacciones químicas.
- 6.-Efectos de la presión y temperatura sobre la conductividad.
- 7.- Radiactividad.

La acción volcánica tiene gran influencia en las variaciones de la temperatura. Tomando en cuenta los elementos anteriormente considerados, resulta muy difícil aceptar la definición simplista del gradiente térmico de la tierra, constante, con una variación de 1 oC por cada 30 metros de profundidad, lo que equivaldría a que la temperatura en el centro de la tierra sería superior a los 200 000 oC.

Es probable que existan zonas del interior de la Tierra en que el gradiente aumenta, y otras en que disminuya, y en muchos de los casos, los gradientes térmicos en la corteza son de carácter local.

Con base a diversos análisis, se puede establecer de manera razonable que la temperatura en el centro de la tierra es del orden de 2000 oC. La temperatura de las lavas alcanzan valores de aproximadamente 1000 a 1300 °C.

En general el término geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra, independientemente de los factores que intervengan en sus manifestaciones superficiales.

Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por los fluidos que ascienden por las fracturas hasta zonas porosas y permeables más o menos profundas para constituir los yacimientos geotérmicos.

Sin embargo, es de uso común, que al hablarse de geotermia se refiera a la utilización de dicho calor interno, principalmente en forma de potencia y energía térmica, con el fin de satisfacer diversas necesidades del hombre, aunque a la fecha su principal utilización se encuentra en la producción de energía eléctrica.

Más específicamente, el término geotermia se aplica a la energía del agua caliente o vapor del subsuelo, y a los procesos que deben realizarse para su obtención, conducción, y utilización en la generación de electricidad.

La energía geotérmica está asociada a los procesos volcánicos y tectónicos terrestres, existen diversas teorías sobre su existencia, que posteriormente se explicarán.

Para que un yacimiento geotérmico sea económicamente explotable se requiere de los siguientes elementos básicos :

- 1.-Una fuente calorífica.
- 2.-El almacenamiento de un fluido bajo ciertas condiciones de presión y temperatura (estas suelen fluctuar entre 50 a 254 kg/cm² y entre 180 a 350 °C, respectivamente), que sirva como transmisor de calor.
- 3.-Una buena permeabilidad de las rocas .
- 4.-Existencia de fallas y/o fracturas.
- 5.-Una zona impermeable superficial o subsuperficial (que impida la disipación de la energía almacenada , y permita la presurización del acuífero).
- 6.-Una recarga hidrológica que alimente al yacimiento. (esta es una condición necesaria para poder considerar a la geotermia como una fuente renovable de energía).
- 7.- También deberá de estar situado a una profundidad adecuada, considerando actualmente como máxima profundidad económica a los 3000 metros.

Esta es en síntesis la energía geotérmica que actualmente se explota, lo que está al alcance del desarrollo tecnológico logrado hasta la actualidad. En un futuro se está pensando en utilizar la lava de los volcanes y el calor natural de la tierra a gran profundidad, para la cual se efectúan trabajos de investigación en diversos países del mundo.

2.2 ORIGEN DE LOS FLUIDOS GEOTERMICOS

La distribución de la temperatura a través de la tierra se debe al flujo térmico que emana de la energía calorífica almacenada en su interior y fluye hacia la superficie, aunándose cualquier otro tipo de energía producida localmente, como por ejemplo el calor producido por las rocas radiactivas, que sea demostrado es despreciable en comparación con el calor del interior, aunque pudiera llegar a tener importancia local en algunas zonas específicas.

Las corrientes de convección en el manto terrestre, junto con la actividad volcánica y la circulación hidrotermal dentro de la corteza, constituyen un mecanismo de transporte para formar depósitos hidrotermales relativamente cerca de la superficie. La zona cortical que se mueve en varias direcciones debido a corrientes convectivas en la astenósfera, ha formado placas oceánicas y continentales que chocan o se separan dando lugar a regiones de interacciones geológicamente activas en el cual ocurren la subducción de placas, las erupciones volcánicas y la construcción de montañas.

El proceso por el cual la energía térmica es transportada desde el interior de la tierra a la superficie, se inicia cuando el calor procedente de la cámara magmática asciende a través de fracturas existentes en las zonas impermeables (formadas por rocas de origen magmático), a la zona permeable en donde calienta los fluidos ahí presentes, que a su vez fluyen por dichas fracturas (pasando la capa sello), hasta llegar a la superficie, en donde se manifiestan en forma de geysers, volcanes de lodo, fumarolas, solfataras, manantiales hidrotermales, etc..

Estas manifestaciones termales superficiales generalmente no reflejan, en forma directa, la realidad respecto de las temperaturas de fondo y las de los flujos que se obtendrán mediante la perforación de los pozos.

Las temperaturas de dichas manifestaciones dependerá básicamente de la temperatura interna del yacimiento, de la mezcla que tengan las mismas con las aguas superficiales, de la conductividad térmica de la roca, y de la estructura geológica del yacimiento, particularmente del grado de fracturamiento.

La proporción de agua y vapor de las mezclas que salgan a la superficie, será función de la presión y temperatura del yacimiento, y una vez que haya perforaciones, de la profundidad y diámetro de los pozos.

Por lo que toca a la temperatura del yacimiento, esta dependerá fundamentalmente de su profundidad y cercanía a la fuente de calor (cámara magmática).

Muchas cámaras magmáticas pueden ser pequeñas y enfriarse en algunos años, y otras pueden cubrir varios km^3 , permanecer energizadas durante miles de años y dar lugar a sistemas geotérmicos importantes que en condiciones especiales, podrían llegar a constituir campos geotérmicos.

La explotación de la geotermia consiste en la utilización durante un periodo limitado, de un depósito finito, seguido a la vez de un periodo de duración variable, necesario para reabastecer el depósito. De hecho para poder seguir aprovechando este recurso, se deberá utilizar un fluido que realice de manera continua la transferencia del calor contenido en las rocas del yacimiento.

Por ello si un campo geotérmico se ve sometido a una sobre explotación, el recurso podría terminarse antes de tiempo, pero si se realiza una explotación racional (consumiendo menos fluido que los que se producen, ya sea de manera natural o artificial, en el campo), se puede considerar a la geotermia, de una manera integral, como un recurso renovable.

En la actualidad existe una técnica que consiste en la rein-

ycción de las aguas de desecho, que permiten la recarga hidrológica del yacimiento de manera artificial, y mantiene el ciclo de explotación, y aunque todavía no es utilizada en todos los campos geotérmicos del mundo (debido a los problemas tecnológicos que representa y en los cuales se está estudiando), esto ayuda a corroborar la teoría de que la geotermia si puede considerarse como una fuente renovable de energía.

En lo que respecta al origen del vapor endógeno, las hipótesis existentes se pueden resumir en tres :

1.-Desprendimiento de vapor de enormes depósitos de agua confinada a temperatura muy elevadas, que yacen en la profundidad de la tierra. Esta hipótesis presupone la existencia de acuíferos calientes cubiertos por capas impermeables.

2.- Liberación del agua contenida en el magma fluido, en proceso de solidificación. Esta hipótesis se basa en el gran contenido de gases que muestran diversas aguas termales y explotaciones geotérmicas, que permiten suponer que el vapor se origina en el magma al realizarse la cristalización de las rocas por enfriamiento.

Los gases contenidos en las zonas geotérmicas son muy variables, ya que en algunos campos, como el de Ahuachapán en El Salvador, son del orden de un 0.1% a un 0.2%, mientras que en otros, como el de Broadlands en Nueva Zelanda, llegan a un 7% del volumen del vapor separado de los flujos geotérmicos. Esta hipótesis se basa también en los resultados de muchos experimentos sobre la solubilidad del agua en los magmas granítico y en observaciones directas realizadas en diversos volcanes del mundo, como el de Hekla en Islandia, y el Parícutin en México. Esto ha permitido estimar que el magma al cristalizarse puede expeler del 1 al 8% de su peso en agua en forma de vapor.

3.-Vapor producido por infiltración de agua meteórica al

ponerse en contacto con rocas porosas a altas temperaturas, siendo esta la teoría más aceptada⁹ hasta el momento.

Es importante hacer mención que la mayoría de los especialistas concuerdan, en base a las evidencias, en que la mayor parte del vapor geotérmico se origina como consecuencia de la tercera hipótesis aquí mencionada, pudiendo complementarse con pequeñas cantidades de vapor producidas como consecuencia de la segunda hipótesis.

Esto es debido a que la composición típica de los fluidos obtenidos en los pozos geotérmicos implica que se trata, esencialmente, de agua meteórica antigua que ha tenido diversos grados de mezcla con fluidos -principalmente gases- que los especialistas citados sostienen son de origen indudablemente magmático.

La explotación de la energía geotérmica requiere el transporte de calor a la superficie, en cantidades suficientes, y de forma controlada, lo cual implica dos consideraciones:

- 1.-Que la energía geotérmica se debe de obtener mediante perforaciones con una adecuada tecnología.
- 2.-Que deba ser transportada por un fluido que realice la transferencia de calor.

2.2.1 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS GEOTERMICOS

Los sistemas geotermicos a lo largo del tiempo se han clasificado de diversas maneras a continuacion se presenta la sig. clasificacion :

2.2.1.1 VAPOR DOMINANTE (Alta Entalpia).

Es un sistema que tiene una entalpia del orden de 2200 kJ/kg, y temperaturas de 230 a 240 °C, generalmente de vapor seco, su desarrollo tecnologico es tal que permite generar electricidad comercialmente a gran escala.

2.2.1.2 LIQUIDO DOMINANTE (Alta Entalpia).

Sistemas de salmueras super calientes con entalpias de 1400 a 1800 kJ/kg y temperaturas mayores a los 180 oC, estos sistemas son mas abundantes que los anteriores. Actualmente se encuentran desarrollados para generar electricidad a gran escala.

2.2.1.3 LIQUIDO DOMINANTE (Baja Entalpia).

Su entalpia es del orden de 300 a 1400 kJ/kg y temperaturas de 80 a 180 oC. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 10 a 1. Se encuentran en casi todos los paises del mundo. Por otro lado los sistemas de baja energia tienen por el momento su principal utilización en proporcionar calor, también son capaces de producir electricidad por medio de un ciclo binario.

2.2.1.4 ROCA SECA CALIENTE.

Este sistema presenta entalpias del orden de entre 3000 y 5500 kJ/kg y temperaturas en el rango de 370 a 650 oC.

Es un sistema rocoso con alto contenido energetico pero con poca o ninguna cantidad de agua, el cual no es facil de extraer debido a la falta de tecnologia adecuada y por lo tanto de agua que en circunstancias normales es la que funciona como fluido transmisor de calor.

A esto se aña el hecho de que tampoco existen cauces naturales a travs de los cuales puedan circular dichos fluidos.

Debido a la baja conductividad trmica de las rocas se requieren reas muy grandes para la transferencia de calor, si se desean obtener cantidades importantes de energa. Lo cual no es mucho problema debido a que la cantidad de rocas secas y calientes dentro del subsuelo es muy grande. Banwell y Meidav estimaron en 1971 que la cantidad de regiones con gradientes trmicos varias veces superior al normal (y que no presentan manifestaciones termales), es del orden de un dcimo de la superficie de la tierra. De hecho muchos geólogos concuerdan en afirmar que los sistemas de roca seca caliente tienen una incidencia por lo menos 2 o 3 veces mayor que la de los sistemas hidrotermales.

La abundancia de estos recursos traen como consecuencia favorable la reducci3n de las lneas de transmisi3n, debido a la localizaci3n ms cercana a los consumidores, de las instalaciones geotrmicas, adem3s de que conforme se reduce la distancia de transmisi3n, aumenta tambi3n la eficiencia en la utilizaci3n, y las posibilidades de mandar el fluido geotrmico para fines dom3sticos o procesos industriales.

Sin embargo, uno de los problemas para la explotaci3n de este sistema se encuentra en que por lo general se localizan a niveles profundos de la corteza terrestre.

Para su explotaci3n, las teorías actuales plantean la creaci3n de cauces permeables adecuados que hagan posible la circulaci3n en el interior de la roca seca y caliente, de un fluido que transporte el calor y lo lleve a la superficie.

Para que esta transferencia de calor sea adecuada, se han planteado varios mtodos, como el de provocar una explosi3n subterránea, que provoque una serie de fracturas en la roca y permita un contacto directo entre el fluido transportador de calor y la

roca en toda la parte de esta que haya resultado mecánicamente afectada a consecuencia de la explosión.

Este método presenta los inconvenientes de necesitar de una gran potencia explosiva para poder fracturar la cantidad necesaria de rocas, lo cual puede resultar muy caro con los precios actuales de los explosivos.

Otro método que resulta menos ambicioso, pero que tampoco ha podido resolver el problema que representa la explotación de este tipo de sistema, consiste en establecer un contacto limitado entre el líquido transportador de calor y la roca caliente. Este método se basa en la conductividad térmica natural de la roca para lograr la transferencia de calor a la zona de captación que podría ser, por ejemplo, por medio de una fisura producida mediante una fractura hidráulica o una fractura térmica.

La fractura hidráulica se realiza mediante el bombeo a presión de agua desde la superficie, dentro de un pozo perforado expresamente para ello. Cuando este pozo tiene la suficiente presión, se empezarán a formar fracturas en alguna parte del mismo. Estas fracturas crecerán conforme aumenta la presión del bombeo, y seguirán creciendo mientras se logre mantener un bombeo mayor que las fugas debidas a la permeabilidad de las rocas.

Estudios hechos en el laboratorio científico de los Alamos por Marlow y Pracht en 1972, demostraron que los esfuerzos térmicos producidos por la contracción diferencial de las rocas debido a su enfriamiento por la inyección de agua, inducen fracturas adicionales, que se propagan por sí solas, lo que trae como consecuencia que el patrón de fracturas en rocas secas y calientes sea bastante más complicado que en las rocas frías.

En este último principio se basa el método de fractura térmica, que parece tener menos expectativas que el hidráulico, y el cual consiste básicamente en la inyección de agua fría en las

rocas calientes, a fin de provocar fracturas debido a la contracción térmica de las mismas.

Tanto en el caso de fracturas hidráulicas como en el de las térmicas, se tiene la ventaja de que una vez que se han creado estas, los esfuerzos necesarios para hacerlas crecer serán menores que aquellos que se necesitaron para crearlas, lo cual fué demostrado por Kutter y Fairhurst en 1971. De hecho la competitividad económica de ambos sistemas dependen sobresanera de la eficiencia con que se puedan fracturar las rocas, por lo que resulta muy importante mejorar a futuro las técnicas de fracturación y mantenimiento de permeabilidades.

En estudios experimentales hechos hasta el momento para tratar de obtener la energía de las rocas secas y calientes, se ha demostrado que técnicamente es factible hacerlo, además parece ser que es competitivo desde el punto de vista económico.

Sin embargo por el momento esta tecnología requiere de cuantificar la vida útil del sistema, que aunque se ha estimado entre 10 a 15 años, aún no se ha podido determinar perfectamente. Además el hecho de que la roca se fracture adicionalmente como consecuencia de la inyección de agua fría, (en el fracturamiento hidráulico), ha abierto esperanzas, ya que se estima que aumenta la vida útil del sistema.

Entre las ventajas de los sistemas de roca seca caliente se tienen : Abundancia en todo el orbe; pérdida de agua muy reducida durante su explotación; y mínima contaminación debido a que no se desecha el agua extraída del subsuelo, sino que se recircula, mientras que en los sistemas hidrotermales el desecho del agua geotérmica sí representa un problema.

Un ejemplo típico de lo que podría ser la mejor técnica para aprovechar este recurso, es la que se ha estado aplicando en un plano experimental, en la caldera de valles Nuevo México, EUA, con

la participación del Laboratorio Nacional de los Alamos.

La técnica consiste en perforar primeramente un pozo hasta una profundidad en la que se alcancen temperaturas del orden de los 250 a 300 °C ; una vez alcanzado este objetivo, se perfora un segundo pozo cercano a una profundidad semejante, y se intenta producir el fracturamiento hidráulico por medio del primer pozo, bombeando agua a elevadas presiones, con esto se pretende inducir un sistema de fracturamientos que llegue hasta el segundo pozo, pero a una temperatura mayor gracias a la cesión de calor de la roca por la que fluye entre uno y otro pozo.

Aunque en el primer intento realizado no se obtuvieron los resultados esperados (ya que, sólo pudo recuperarse en el segundo pozo una fracción del agua inyectada en el primero, y a temperaturas menores a los 150 °C), se encuentra en proceso un segundo experimento, que espera resolver estos sistemas, atribuidos a deficiencias técnicas superables, y no a la imposibilidad práctica de la teoría.

Por lo tanto, si se demuestra que este sistema puede ser económicamente competitivo con otros sistemas y con una tecnología adecuada, la mayoría de los países del mundo podrían disponer de un potencial enorme y prácticamente infinito de calor, el cual podría utilizarse para la producción de electricidad o un sinnúmero de aplicaciones.

Según estudios realizados, se sabe que el potencial aprovechable con la tecnología que se desarrolla en la actualidad para ello, es equiparable al menos con la actual producción de energía.

Por ello se prevé que en un futuro se podrán instalar por este medio 10^5 MW⁽⁴⁾.

2.2.1.5 SISTEMAS MAGMATICOS.

Sistema de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos ó a gran profundidad en zonas de debilidad cortical, la entalpia de este tipo de sistema fluctúan en un rango de 5500 a 7700 KJ/kg, y temperaturas mayores a los 650 °C.

El problema que se presenta para la explotación potencial de este tipo de recurso, estriba en que se necesita llegar hasta el magma, el cual en ocasiones puede encontrarse a una profundidad de varios miles de metros por debajo de los volcanes, lo cual con el estado actual de la tecnología no es todavía económicamente factible.

Otro gran problema que se presenta con esta fuente de energía es que si bien, su potencial es muy grande, y presenta muchas interrogantes en lo que respecta a sus repercusiones sobre el medio ambiente.

Sin embargo estos estudios están más que justificados, debido a la potencialidad de esta fuente de energía. Según calculos realizados por la conferencia de las Naciones Unidas,⁶ la energía que se encuentra en los volcanes es del mismo orden de magnitud que el total de las reservas mundiales conocidas de combustibles fósiles⁷.

Es prácticamente un hecho que no se podrá contar con este recurso hasta por lo menos entrado el próximo siglo, esto es debido más que nada a las dificultades técnicas que representa.

Una forma más de aprovechar esta energía, se encuentra en los campos de lava caliente que se encuentran en la superficie debido a erupciones, o a flor de labio en los volcanes, presentando la desventaja de que podrían tener aplicación en un lapso más corto aunque también su potencialidad es bastante menor que la de los sistemas magmáticos profundos.

En estudios hechos principalmente en los Estados Unidos se ha demostrado que la extracción de energía de estas masas es científicamente posible, y no existen problemas irresolubles que la pudieran hacer posible. Por lo que actualmente los estudios se avocan a tratar de demostrar la factibilidad de explotar económicamente estos recursos.

Aunque las temperaturas asociadas con la explotación de las masas de magmas son muy altas, estas no representan un problema serio, ya que el mayor problema lo constituyen los aspectos de corrosión.

Carson y Allen de los laboratorios Sandia y del Departamento de Energía de los Estados Unidos respectivamente, determinaron que el desarrollo de los sistemas para la explotación de las masas de magmas presentará varios problemas, siendo los más importantes :

- 1.-El desarrollo de técnicas para localizar los cuerpos de magmas y los sistemas hidrotermales, a su alrededor, de una manera confiable y precisa.
- 2.-El desarrollo de la habilidad necesaria para poder seleccionar los mejores puntos para la perforación en los recursos magmáticos.
- 3.-La determinación de los materiales adecuados tanto para los equipos de perforación, como para el sistema completo de explotación, de manera que puedan resistir medios ambientes tan hostiles como lo son aquellos con altas temperaturas y altamente corrosivos, por periodos lo suficientemente largos para resultar interesantes desde el punto de vista ingenieril y económico.
- 4.-El diseño de los sistemas adecuados para la extracción de energía a altas temperaturas, de estos recursos.

De todo lo anterior, puede concluirse que ninguna de las dos opciones magmáticas es factible, al menos a corto plazo, debido principalmente a lo costoso de su explotación comparada con las de otras fuentes de energía .

2.2.1.6 SISTEMAS GEOPRESURIZADOS.

Sistemas que contiene agua y metano disuelto a alta presión, con una entalpia de 900 a 1400 kJ/kg, y temperaturas entre los 100 y los 300 °C.

Es común encontrar estos sistemas en yacimientos sedimentarios con formaciones porosas y permeables², que contienen líquidos sometidos a presiones y temperaturas anormalmente elevadas en comparación con las condiciones habituales.

La información que se tiene de estas formaciones proviene básicamente de perforaciones realizadas en pozos petroleros en las costas de Louisiana y Texas, que han mostrado la existencia de depósitos subterráneos de agua caliente a profundidades de 4000 a 6000 metros, que se encuentran a presiones de hasta 700 kg/cm², con temperaturas del orden de 130 a 150 °C y saturada de gas natural, específicamente de metano, el cual por si solo es ya una importante fuente de energía³.

Los yacimientos geopresurizados del Golfo de México son enormes, alcanzan hasta 150 Km. de ancho y se extienden desde el delta del mississippi hasta el norte de México. Wilson estimó en 1975⁴ un potencial de 40,000 MW de energía a lo largo de la costa del Golfo de Texas, lo cual da una clara idea de la potencialidad de esta fuente.

Se calcula que en la actualidad se conocen más de 60 zonas geopresurizadas en el mundo, debiendo haber muchas más por descubrirse.

Debido a que los yacimientos Geopresurizados se caracterizan por tener tanto energía térmica, como energía hidráulica y gas natural en solución, originalmente se creyó que podría tener un gran potencial para la producción de electricidad, ya que la energía térmica y cinética contenida en el agua representa aproximada-

mente el 50% de la energía contenida en el sistema⁵, por lo que se pensaba que podría utilizarse dicha agua en la producción de electricidad.

Sin embargo, conforme las investigaciones fueron progresando se comprobó que las temperaturas de estos yacimientos son por lo general relativamente bajas (130-150 °C), pero a mayor profundidad que los yacimientos geotérmicos tradicionales, se han desechado prácticamente por el momento la idea de producir electricidad, avocándose los estudios a tratar de demostrar la factibilidad técnico económica de utilizar estos recursos en diversos procesos que requieren calor, como procesos industriales.

Por lo anterior, en la actualidad las principales investigaciones se han encaminado a tratar de obtener el metano disuelto en el agua .

El volumen de metano recuperable de estos sistemas depende fundamentalmente de los siguientes puntos :

- 1.-La presión y temperatura del yacimiento.
- 2.-Las características petrofísicas del yacimiento.
- 3.-Los mecanismos de conducción de la producción del yacimiento a la superficie.
- 4.-De las dimensiones del reservorio y de la salinidad del agua en el reservorio.

Para llevar acabo las investigaciones se están realizando en los Estados Unidos, pequeñas pruebas de aproximadamente una semana, utilizando para ellos pozos perforados durante la exploración petrolera , y que fueron abandonados por sus operadores.

El principal problema para la explotación comercial de los yacimiento geopresurizados, estriba en que no se tiene la suficiente información sobre la extensión y por lo tanto la capacidad unitaria de energía de estas zonas limitadas.

Por otra parte, se necesita determinar también el contenido y la duración de estos grandes depósitos de alta presión, establecer los aspectos técnicos y económicos para la eliminación de la salmuera.

Debido a todo ello no es posible calcular bien todavía la gama de aplicaciones de esta fuente de energía, ya que como puede verse, su explotación plantea problemas técnicos difíciles de resolver con el estado actual de la tecnología.

En la República Mexicana se han encontrado estos sistemas particularmente en el estado Tamaulipas.

2.2.1.7 SISTEMAS MARINOS.

Sistema de alta entalpía existente en el fondo marino . Estos reservorios geotérmicos submarinos se manifiestan en el fondo oceánico a través de numerosas fuentes termales, también conocidas como ventilas hidrotermales submarinas, chimeneas hidrotermales, chimeneas negras, y humeros negros. Siendo muy frecuente en el fondo del océano a lo largo de las dorsales submarinas donde tiene lugar la separación de grandes extensiones de la superficie de la tierra y se crea nueva corteza oceánica.

La situación de las chimeneas negras resulta bastante clara en base a la tectónica de placas. Esta teoría presupone la superficie terrestre formada por un conjunto de placas grandes y rígidas, que se mueven permanentemente una con respecto a otras.

Estas Placas están constituidas en su mayor parte por corteza subyacente a los océanos, con grandes pedazos de material más ligero (que son los continentes), inmersos en ellas .En los bordes de colisión entre las placas, es donde la corteza antigua se destruye, mientras que en los bordes donde las placas se separan, es donde se tiene lugar la formación de corteza nueva. estos últimos se encuentran casi en su totalidad bajo los océanos y son estruc -

turas lineales de unos 100 Km. de longitud, cortadas en zigzag por fallas de transformación de varios kilómetros.

Todo este complejo mecanismo de formación se debe a que el magma, que no es más que roca producida por la fusión parcial del manto, asciende en las dorsales, y su temperatura (que al llegar a la superficie es de unos 1200 °C) disminuye drásticamente hasta enfriarse, por lo que se solidifica formando corteza oceánica nueva.

A su vez y a medida que el enfriamiento progresa, la corteza se separa lentamente, dejando con ello espacio para nuevas intrusiones, y dado que el material caliente se expande, las zonas de intrusión son elevadas, lo cual se manifiesta en las dorsales o cordilleras mesoocénicas, cuya cimas se sitúan a profundidades de 2.5 a 3 km., y donde precisamente se puede observar el mayor número de evidencias de la dinámica interior de la tierra, ya que ahí, por ejemplo, se encuentran los epicentros de una gran cantidad de sismos, o muchos de los volcanes submarinos, que en algunos casos, como el de Islandia, se constituyen en islas al emerger.

Por otro lado, como el enfriamiento contrae los materiales esto provoca que el fondo del océano subsida a medida que se aleja de las dorsales. De hecho, las fosas marinas son lugares donde las placas se sumergen en el interior plástico del manto terrestre.

El primer campo de fuentes termales submarinas se descubrió en 1977, en la cordillera oriental del pacífico, próxima al Ecuador, en el área que se conoce como Cordillera de las Galápagos. Sin embargo, no fué sino hasta 2 años después (1979), que se descubrieron y filmaron por primera vez las chimeneas negras en esa misma zona.

Por lo que respecta a México, en sus mares territoriales específicamente en el Golfo de California y en la zona sur del

mismo se han encontrado algunos de estos sistemas hidrotermales activos.

Las soluciones que surgen de la fuentes termales contienen una gran cantidad de minerales. La explotación de todos estos minerales así como de esta energía representan un reto para la ciencia y tecnología moderna, que a futuro podría representar una fuente alterna más de energía.

2.3 Panorama de la Energía Geotérmica en México y el Mundo

Los campos geotérmicos se encuentran distribuidos alrededor del mundo y México cuenta en su territorio con una excelente cantidad de ellos.

2.3.1 Panorama de Energía Geotérmica en México.

La geotermia en México es una fuente de energía muy importante para el desarrollo del país, ya que cuenta con enormes recursos geotérmicos.

Se tienen detectados en 28 estados de la República Mexicana (a 1985), cerca de 1283 focos termales en sus distintas modalidades de manantiales de agua caliente, fumarolas, volcanes de lodo, solfataras, pozos de agua ó una combinación de ellos, las cuales después de un reconocimiento geológico en 18 estados, se redujeron a 515 zonas geotérmicas, por considerarse que varias de ellas tienen un origen común.

En la tabla 2.1 se muestra la relación de focos termales por estados de la República Mexicana.

Puede notarse que la mayor concentración de focos termales se encuentran en los estados de Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Sonora

y Michoacán respectivamente, mientras que las más importantes se localizan en los estados de Jalisco, Sonora, Michoacán, Chihuahua y Sinaloa.

Ello muestra, como era de esperarse, que existe una estrecha relación entre los focos termales y las zonas geotérmicas.

Además permite ratificar que la potencialidad geotérmica de México es muy grande, esto es sin contar que todavía falta por censar cerca de un 30% de la superficie del territorio.

Por otra parte, sería conveniente que, sin suspender los estudios en las zonas que todavía no se han censado, se le diera prioridad y mayor importancia a las zonas que hasta el momento ya han demostrado su potencialidad.

No hay que olvidar que existen algunos estados poco estudiados y que podrían tener un potencial insospechado, como sería el caso de Chiapas y Chihuahua, por lo que es incuestionable, que se debe continuar con los censos, para poder determinar de una manera precisa todas las manifestaciones termales del país.

Tabla 2.1) Relación de Focos Termales por Estado de la
República Mexicana. (1985)

E S T A D O	TIPO DE FOCO				TOTAL FOCOS	ZONAS GEOTERMICAS
	MANANTIAL	POZO	FUMAROLA	VOLCAN		
Aguascalientes.		47			47	7
B.C.N.	18	1	1	1	21	20
B.C.S.	7	3	4		14	9
Coahuila.	10	2			12	12
Colima.	4				4	4
Chiapas.	2		2		4	6
Chihuahua.	30	12			42	37
Durango.	17				17	17
Guanajuato.	38	147			185	31
Guerrero.	6				6	6
Hidalgo.	11	28			39	13
Jalisco.	217	88	13	6	324	104
México.	5	1			6	6
Michoacán.	62	13	7	2	84	48
Morelos.	7	13			20	7
Nayarit.	23				23	23
Nuevo León.	5				5	5
Oaxaca.	5				5	5
Puebla.	11		8		19	10
Queretaro.	6	167			173	9
San Luis Potosí.	7	66			73	19
Sinaloa	38	1			39	32
Sonora	44	36			80	53
Tabasco.	2				2	2
Tamaulipas.	2				2	2
Tlaxcala.	1				1	1
Veracruz.	9				9	9
Zacatecas	14	13			27	18
TOTALES	601	658	35	9	1238	515

Fuente: Geología de los Yacimientos Geotérmicos en México, Comisión Federal de Electricidad. (1985)

De la determinación de los focos térmales se ha podido observar que existen ciertas regiones que presentan características geológicas similares, por lo que se ha decidido dividir al país en provincias geotérmicas, que podrían facilitar la exploración. Estas provincias son las siguientes :

- 1.-Provincia geotérmica de la Faja Volcánica Mexicana.
- 2.-Provincia geotérmica de la Sierra Madre Oriental.
- 3.-Provincia geotérmica del Sistema de San Andrés, y Sierra de Sonora y Sinaloa.
- 4.-Provincia geotérmica de Baja California.
- 5.-Provincia geotérmica de la Sierra Madre Occidental.
- 6.-Provincia geotérmica de la Mesa Central.
- 7.-Provincia geotérmica de la Sierra Madre Sur.

En la Figura 2.1 se muestran las provincias geotérmicas de la República Mexicana, aunque la división de estas provincias todavía no es aceptada por la totalidad de los estudiosos del tema.

Los estudios e investigaciones encaminadas a la evaluación de los recursos geotérmicos, han definido en México dos grandes áreas. Una de ellas es la región de Mexicali, en la cual se localiza el campo de Cerro Prieto que es uno de los más grandes en el mundo.

En esta área se presenta el fenómeno de separación de placas terrestres que a lo largo del sistema de la Falla de San Andrés ha creado una zona de debilidad en la que la roca fundida se acerca a la superficie terrestre transmitiendo su calor a los acuíferos.

La otra región es de mayor extensión que la anterior y se conoce con el nombre de Eje Neovolcánico. Esta zona se encuentra localizada entre los meridianos 98 y 104 de longitud Oeste de Greenwich y los paralelos 18 y 25 de latitud Norte.

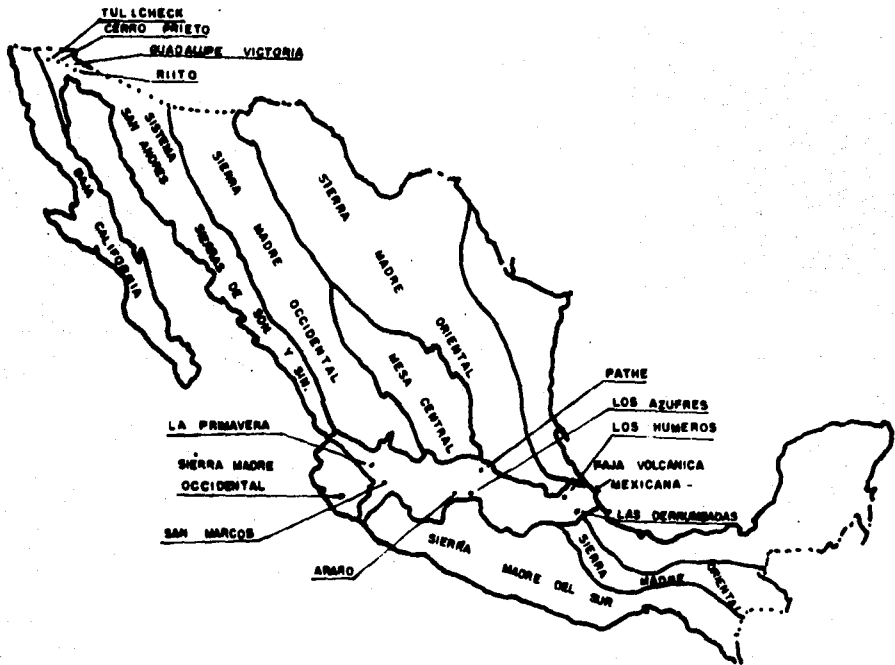


FIG. 2.1 PROVINCIAS GEOTERMICAS EN LA REPUBLICA MEXICANA

El eje Neovolcánico presenta condiciones geológico-estructurales favorables para la formación de zonas con temperaturas anómalas.

Actualmente, se encuentran en explotación el campo Cerro Prieto en Baja California Norte y el Campo los Azufres en Michoacán. Se cuenta con pozos profundos en los campos La Primavera, Jalisco, los Humeros, Fuebla (Fig. 2.1). Se tienen pozos de exploración en los campos de San Marcos en Jalisco, Tulicheck y Riito en Baja California Norte, Ixtlan y los Negritos en Michoacán.

La investigación geotérmica en México con el propósito de generación de energía, se lleva mediante un proceso que comprende las siguientes fases :

- 1) Estudio de reconocimiento
- 2) Estudio de prefectibilidad
- 3) Estudio de factibilidad
- 4) Desarrollo
- 5) Explotación.

Las tres primeras fases se refieren a la parte exploratoria del proyecto, mientras que las dos últimas fases se orientan a la producción sistemática del fluido endógeno, a su utilización industrial y a los problemas de gestión del campo.

La fase de reconocimiento implica una investigación de carácter regional, que consiste en :

- a) una recopilación de información geológica, geofísica y geoquímica ;
- b) un análisis Geostatístico de tal información, utilizando para ello imágenes de satélites ;
- c) una verificación de la información recopilada y de las interpretaciones realizadas con el método geostatístico ;
- d) un censo de las zonas geotérmicas indentificadas en el campo ;

e) un muestreo de manantiales termales y fríos, para su análisis químico ;

f) y, finalmente una evaluación de las posibilidades geotérmicas de cada zona, estableciendo sus prioridades para la siguiente fase de la exploración.

La segunda fase de la exploración, que comprende los estudios de prefactibilidad por medio de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas, tienen como objetivos :

- a) La localización de lugar(es) para la perforación exploratoria.
- b) Definir el modelo geotérmico preliminar del área seleccionada.

El modelo geotérmico de una área será definido cuando haya disponibilidad de información detallada referente a :

- 1) la presencia y origen de las anomalías térmicas ;
- 2) las características de las formaciones de cobertura o roca sello.
- 3) el modelo de circulación del agua.
- 4) el tipo de sistema y características del reservorio.

La tercera fase tiene como objetivo la evaluación del potencial geotérmico del área prospectada y en el diseño preliminar de los posibles sistemas de utilización de los recursos descubiertos.

Estos objetivos serán alcanzados a través de perforaciones exploratorias profundas, estudios de ingeniería de reservorios, estudios geocientíficos y finalmente, un análisis técnico-económico de los posibles esquemas de utilización.

Un estudio de factibilidad se considera completo, cuando el modelo geotérmico del área sea conocido en sus parámetros esenciales : sistema de reservorio roca-sello, circulación de los fluidos y sus características físico-químicas, distribución de la terma- lidad y finalmente, las características físicas de las zonas produc-

toras. Cuando se obtengan los datos señalados se definirán las características del reservorio descubierto, así como su potencial energético, los posibles esquemas de utilización y el programa de operaciones a realizarse en la siguiente fase.

Las fases de desarrollo y explotación, tienen como objetivo la indentificación de las alternativas posibles de la energía, selección de la mejor alternativa geotérmica de conversión, evaluación comercial de su factibilidad comercial, diseño y construcción de la planta así como la operación, y supervisión del campo.

En base al conocimiento que se tiene actualmente de los recursos, el potencial geotérmico del país puede clasificarse de la siguiente manera :

1) RESERVAS PRUBADAS.- Son aquellas en que los estudios y pruebas realizadas a los pozos, permiten determinar la instalación de una planta con una capacidad de potencia dada, con una vida útil mínima de 30 años.

2) RESERVAS PROBABLES.- Son aquellas zonas en la cual mediante estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos se ha podido cuantificar de una manera aproximada, la extensión, volumen y energía almacenada en el probable yacimiento.

3) RESERVAS POSIBLES.- Son aquellas que por manifestaciones termales en la superficie permiten inferir la posibilidad de un recurso geotérmico.

De acuerdo con los estudios más recientes, se sabe que la reservas geotérmicas (sistemas hidrotermales unicamente) de la Republica Mexicana son⁷ :

Probadas.....	1340 Mw
Probables.....	4600 Mw
Posibles.....	6000 Mw

Las reservas probadas corresponden básicamente a los campos actualmente en desarrollo : Cerro Prieto, Los Azufres y los Huecos, Las reservas probables corresponden a nuevos campos en los que se están realizando perforaciones exploratorias como La Primavera, Ceboruco, Araró, Ixtlán de los Hervores, Los Negritos o ampliaciones de los campos actualmente en desarrollo. Las reservas posibles, corresponden a una estimación en base a la cantidad de focos térmicos localizados en la República Mexicana.

El aprovechamiento de la energía geotérmica está vinculado principalmente con la generación de energía eléctrica. Sin embargo en forma paralela a esta actividad puede emplearse el resanante térmico para procesos industriales.

Tales como, la producción de alimentos y su transformación, obtención de minerales de las salmueras geotérmicas, calefacción en climas fríos, invernaderos cultivos de peces etc,...

2.3.2 Ventajas y Desventajas de la Energía Geotérmica.

De cierta manera en ingeniería, la ejecución de un proyecto para beneficio del hombre trae consigo problemas durante el desarrollo de éste que de una manera u otra se deban de prever y solucionar, a continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de un proyecto geotérmico.

2.3.2.1 Ventajas de la Energía Geotérmica.

a) Gran potencialidad a futuro.

Ya que independientemente de la gran posibilidad de existencia de más campos geotérmicos de los detectados hasta el momento, existe también la gran potencialidad de las rocas secas calientes, las masas de magmas y las zonas geopresurizadas.

b) Gran diversidad de usos.

La geotermia tiene una infinidad de usos diferentes a su utilización clásica, consistente en la producción de electricidad. Estos usos son tan numerosos que todavía no se han clasificado totalmente, independientemente de que es mucho lo que falta por investigarse al respecto.

c) Fuente Renovable de energía.

Este es un punto que se discute todavía mucho en la actualidad, ya que hasta el momento no se ha probado por completo la renovabilidad de esta fuente.

Se considera siempre y cuando la explotación del campo se realice de manera racional, esto es, la explotación no deberá de ser mayor que la recarga hidráulica del yacimiento (por causas naturales o por reinyección).

d) Ahorro económico y de combustibles fósiles.

Tal vez sea este uno de los puntos que le da mayor validez a la utilización de la energía geotérmica, ya que en cualquier proyecto uno de los parámetros más importantes es el económico. De ahí la gran importancia que tiene dicho parámetro en la justificación o no del uso de una planta geotermoelectrónica, en lugar de cualquier otra.

e) Bajo costo del KWH producido.

Esto es debido a que a lo largo del tiempo se ha ido confirmando que el costo del KWH producido en plantas geotérmicas está entre los más bajos, pudiendo ser el más bajo, dependiendo de los precios internacionales del petróleo.

f) Baja contaminación.

Actualmente se acepta que es poco contaminante, si se compara con las fuentes tradicionales como las termoeléctricas, carboceléctricas y nucleoceléctricas.

g) Alto factor de planta.

El factor de planta para este tipo de plantas oscila entre el 80 y 90%, esto se debe en gran medida a la ausencia de calderas que son las que ocasionan los problemas y se reflejan a su vez en un descenso en el factor de planta.

$$F.P. = NK/NC$$

donde:

F.P. = Factor de planta,

NK = Número de Kwh generados en un año,

N.C. = Número de Kwh que podrían generarse a plena carga.

Como puede verse entre más se aproxime el numerador al denominador, mayor será el factor de planta, de ahí que al no presentarse paros en la planta, el número de Kwh generados puede aproximarse bastante al número de Kwh que se podrían generar a plena carga, por lo que el factor de planta resulta bastante alto.

h) Operación relativamente más sencilla

La operación de las plantas geotérmicas es de las más sencillas, ya que por una parte no se manejan fluidos a altas presiones, ni combustibles, y no se utilizan calderas, que generalmente suelen ser las que causan mayores problemas.

i) No crea dependencia tecnológica.

Se considera que el país cuenta con un 70% de la tecnología existente para poder desarrollar sus proyectos y el Instituto de Investigaciones Electricas, Junto con Comisión Federal de Electricidad y otras instituciones educativas han trabajado y continúan en ello para no depender tecnológicamente del exterior.

j) Es creadora de una gran tecnología y de personal altamente calificado .

En el Área de geotermia, México es casi prácticamente autosu-

ficiente en tecnología, además de estarse desarrollando una tecnología propia y mejorándose la existente.

Por otro lado, el desarrollo de poco más de 30 años de la energía geotérmica en México, ha permitido la creación de un equipo de profesionales en la materia, del más alto nivel (por medio del IIE), lo que ha permitido que en la actualidad exporte esta asimilación tecnológica hacia los países de centroamérica.

k) Alta Confiabilidad.

La confiabilidad de las plantas geotérmoelectricas es alta, debido a que su manejo es sencillo y que no posee gran cantidad de elementos que puedan fallar o descomponerse fácilmente, como las calderas o los condensadores con tubos.

- 1) Se pueden tener ingresos antes de haber terminado el proyecto.

Esto es debido a que se pueden instalar pequeñas plantas generadoras a boca de pozo (de 5 a 10 MW), permitiendo satisfacer la demanda de energía y por lo tanto de obtener ingresos antes de terminar el proyecto.

m) Utilizable en forma de potencia o calor.

La utilización de la energía geotérmica es muy versátil, ya que la energía de alta entalpía se puede utilizar para producir potencia o electricidad, y la de baja entalpía para generar calor, Esto no quiere decir que la energía de alta entalpía no se pueda utilizar para producir calor, sino que dado los precios actuales de los energéticos, la manera más costeable de utilizarla es para la producción de electricidad.

2.3.2.2 Desventajas de la Energía Geotérmica.

a) Alto costo del KW. instalado.

Esta es tal vez la mayor desventaja de la geotermia, con res-

pecto a otras fuentes, ya que su costo por Kw. instalado está entre los más caros, tanto como el nuclear, y más que el hidroeléctrico.

b) Inversiones en exploraciones muy costosas.

Esta es otra desventaja de la geotermia con respecto a otras fuentes de energía, esto es debido a la gran complejidad de las exploraciones así como, las grandes extensiones de los campos son las que incrementan en gran medida los costos, aunque se tiene tecnología propia que actualmente ha reducido estos costos hasta en un 25%.

c) No puede deducirse desde el inicio la capacidad a instalar.

Esto se debe a que se requiere de un cierto tiempo para determinar la capacidad del yacimiento. Por lo tanto, en caso de encontrarse un campo geotérmico, la capacidad a instalar se tendrá que ir probando poco a poco, lo cual requerirá de algunos años.

d) Explotación en Zonas específicas.

Esta es una desventaja, ya que se depende de su ubicación natural para poder realizar su explotación.

2.3.3 Panorama de Energía Geotérmica en el mundo.

La energía geotérmica se encuentra ampliamente distribuida en todo el mundo, figura (2.2).

Como puede apreciarse de la misma, existe una estrecha correlación entre las zonas de debilidad cortical, que son los lugares donde se juntan o separan las placas continentales, y las zonas con alto potencial geotérmico. Esta relación era lógica de esperarse, debido a que las cámaras volcánicas son las principales fuentes de calor.

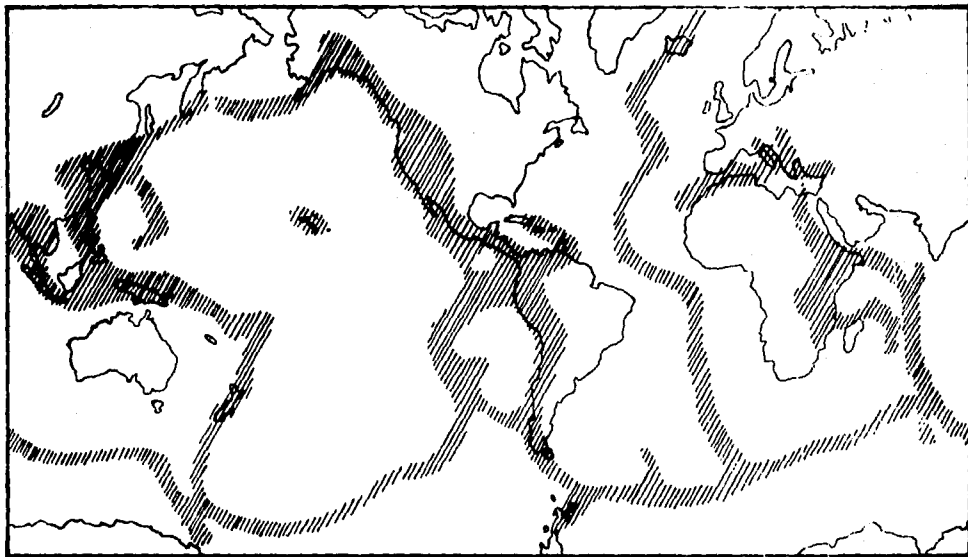


FIG. 2.2 REGIONES GEOTERMICAS EN EL MUNDO 

Como se observa en la figura 2.2, las regiones con posibilidades geotérmicas abarcan zonas inmensas de la superficie de la tierra, y si a esto se suma la posibilidad de que a futuro se puedan aprovechar las zonas geotérmicas existentes debajo de los océanos, podrá verse que la potencialidad de esta fuente de energía es enorme, y mucho mayor que las necesidades totales actuales de energía.

Actualmente la utilización de los recursos geotérmicos en el mundo puede dividirse en dos grupos. En el primero de ellos denominado usos eléctricos, como su nombre lo indica los recursos geotérmicos se destinan a la generación de electricidad, mientras que en el segundo denominado usos no eléctricos, se engloba una enorme cantidad de actividades como el secado de productos agrícolas, enlatado de alimentos, calefacción, refrigeración, extracción de sales etc.

2.3.3.1 Usos Electricos en el Mundo.

En el año de 1971 se habían instalado en el mundo 903 MWe con energía geotérmica⁶. El 99% de esta capacidad estaba acaparada por únicamente cuatro países : Italia, Nueva Zelanda, Estados Unidos y Japón. En el año de 1982 se encontraban distribuidas en 14 países 115 plantas geotermoelectricas con una capacidad de 2697 MWe. En el año de 1985 como puede verse en la tabla 2.2, se tenían instaladas en el mundo 188 unidades geotermoelectricas con una capacidad de 4763 MWe.

El principal productor de energía eléctrica empleando fluidos geotérmicos es Estados Unidos con 36 unidades Geotermoelectricas y una capacidad instalada de 2022 MWe y le sigue Filipinas con 21 unidades y 824 MWe.

Tabla 2.2. Capacidad Instalada Con Energía Geotérmica en el Mundo.
hasta 1985.

PAIS	No de Unidades	Capacidad Instalada (MWe)
Estados Unidos	56	2022
Filipinas	21	894
México	16	645
Italia	43	519
Japón	9	215
Nueva Zelanda	10	167
El Salvador	3	95
Kenia	3	45
Islandia	5	39
Nicaragua	1	35
Indonesia	3	32
Turquía	2	21
China	12	14
Rusia	1	11
Francia	1	4
Portugal	1	3
Grecia	1	2
TOTAL	188	4763

Fuente : La Energía Geotérmica en México y el Mundo.
V.M. Arellano(Instituto de Investigaciones Electricas Cuernavaca,
Morelos).

2.3.3.2 Usos no electricos en el Mundo.

Los sistemas geotérmicos de baja entalpia con temperaturas menores de 180 °C son los que generalmente se destinan a usos no eléctricos (Tabla 2.3). De los 44 países que se tiene conocimiento que cuentan con este tipo de recurso, únicamente son 12 los que estan aprovechando de manera significativa.

La utilización de los recursos geotérmicos de baja entalpia en el mundo es de aproximadamente 7,200 MWt. En la tabla 2.4 se muestran los principales países que emplean este tipo de recurso geotérmico.

Como puede observarse de las Tablas 2.3 y 2.4 el uso potencial de la energia geotérmica es muy grande, ya que puede emplearse tanto en centros industriales, como en la agricultura, cria de animales e invernaderos, etc.,.

Tabla 2.3 Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos necesaria para distintas aplicaciones.

°C	
200-	
180-	Evaporación de soluciones altamente concentradas Refrigeración por absorción de amoníaco. Alúmina mediante el proceso Bayer.
160-	Secado de harina de pescado. Secado de madera. Alúmina mediante el proceso Bayer.
140-	Enlatado de Alimentos. Evaporación en la refinación de la Azúcar. Extracción de sales por evaporación. Agua dulce por destilación.
120-	Concentración de solución salina mediante evaporación. Secado y curado de planchas de Hormigón ligero.
100-	Secado de materiales orgánicos, algas, hortalizas, etc., Secado de pescado. Operaciones intensas de descongelamiento.
80-	Calentamiento (edificios e invernaderos). Refrigeración (límite de temperatura inferior) Zootecnia.
60-	Invernaderos Mediante una combinación de cal. Amb. y de foco Cultivo de setas. Balneología.
40-	Calentamiento del Suelo. Piscinas, Biodegradación, fermentaciones. Agua caliente para la industria minera en climas fríos.
20-	Criaderos de peces, piscicultura.

Fuentes: Geothermal Energy, Review of Research and Development, Earth sciences No 12, adaptado por Linbal (Paris, O.N.U. 1975).

Tabla 2.4 Usos no Eléctricos de los Fluidos Geotérmicos.

PAIS	Calefacción (Mwt)	Agricultura y otros(Mwt)	Industria (Mwt)	Total (Mwt)
Austria		4		4
Australia		11		11
China		393		393
Checoslovaquia		24		24
Estados Unidos	220	119		339
Francia	300			300
Hungría	300	860		1160
Italia	50	218	20	288
Islandia	620	257	50	927
Japón	10	2611	65	2986
México		28		28
Nueva Zelanda		215		215
Rumanía		251		251
Rusia	120	282		402
Otros				186
TOTAL				7214

Fuente: La Energía Geotérmica en México y el Mundo.
 V.M. Arellano (I.I.E. Apartado Postal 473, Cuernavaca Morelos)

CAPITULO III

PERFORACION GEOTERMICA

3.1 Sistemas de Perforación

Las técnicas usadas para la perforación geotérmica son bastante similares a las usadas en la perforación de pozos petroleros, sin embargo, éstas han tenido que ser adaptadas y modificadas para las condiciones encontradas en un pozo geotérmico como son los elevados gradientes de temperatura y un intenso fracturamiento de las formaciones. Ello ha propiciado el desarrollo de una tecnología propia la cual presenta algunas diferencias como son las siguientes :

1.- Torre de enfriamiento.

Su función consiste en bajar la temperatura (10 a 20 °C) de los fluidos de perforación debido a que al retornar a la superficie después de haber circulado a través del pozo traen una temperatura muy elevada.

Esta es la principal diferencia entre los equipos petroleros y los equipos geotérmicos.

2.- Fluido de perforación.

Este fluido debe de tener un tratamiento químico especial para soportar las altas temperaturas, encontradas en el fondo del pozo.

3.- Tubería de revestimiento.

La construcción de estas tuberías deberán ser de aleaciones especiales para poder resistir las condiciones que se presentarán en los pozos.

Deberán tener capacidad mecánica para soportar colapsos,

esfuerzos de tensión y compresión que se originan por los efectos térmicos principalmente.

Las aleaciones usadas deberán ser resistentes a diferentes tipos de corrosión y a efectos de fragilización por hidrógeno.

4.- Cementos.

Se deberá usar cementos a base de aditivos especiales que sean capaces de soportar los efectos destructivos que puedan causar los fluidos y las temperaturas del yacimiento geotérmico.

El tipo de cemento y aditivos se deberán seleccionar de acuerdo a las características litológicas y a las temperaturas del intervalo a cementar.

5.-Registros eléctricos.

Deberán ser especiales para trabajar a temperaturas elevadas y en ambientes corrosivos.

3.1.1 Perforación Rotatoria Hidraulica.

Este método consiste en perforar el agujero por medio de una barrena rotatoria. La barrena se coloca al final de la sarta de perforación. En el sistema convencional rotatorio, se bombea fluido (lodo, aire, espuma) a través de la tubería, el cual sale por las toberas de la barrena retirando los recortes por medio de circulación continua de éste, a medida que la barrena penetra las formaciones. El lodo fluye entonces hacia la superficie a través del espacio anular formado por la tubería de perforación y el agujero, llevando los recortes en suspensión. En la superficie el fluido es canalizado a la presa de asentamiento para eliminar al máximo los recortes y posteriormente, en otra presa tratarlo químicamente.

El equipo empleado para realizar estas operaciones es el llamado aparato de perforación rotatoria (Fig. 3.1), el cual se compone de cinco sistemas principales que realizan actividades propias pero que tienen un sólo objetivo. Estos sistemas son los siguientes:

3.1.1.1 Sistema de Levantamiento.

Su función principal es la de soportar al sistema rotatorio en la perforación del pozo.

Son dispositivos que se utilizan para el manejo de las cargas dentro y fuera del pozo, se componen principalmente de la torre que se apoya sobre una subestructura que proporciona una área de trabajo para cada una de las diversas operaciones.

La estructura de soporte es de acero, la cual está montada sobre el lugar donde se va a perforar, está soportará los elementos del equipo usados por el sistema de rotación para la perforación del agujero.

El equipo de levantamiento es el equipo especializado que levanta, abate y suspende la sarta de perforación (tubería de perforación, lastrarrenas, barrena.) en el agujero del pozo.

Los tamaños de este sistema de perforación son determinados por el peso para el cual están diseñados a levantar.

El equipo de perforación geotérmica prácticamente es similar a los usados para la perforación convencional de pozos de aceite o gas. Su principal distinción de estos equipos es la elevación de la subestructura debajo de la mesa rotaria o piso de perforación. La altura de la subestructura es necesaria para permitir la instalación del equipo de prevención de brotes, el cual es requerido por las elevadas temperaturas esperadas.

3.1.1.2 Sistema de Rotación.

Son dispositivos electromecánicos cuya función principal es proporcionar el movimiento de rotación a la sarta de perforación para perforar el pozo. El sistema rotatorio consiste de dos componentes principales:

1.- Mesa Rotatoria.

Da el movimiento de rotación a la sarta de perforación, la suspende dentro del pozo cuando se conecta o quitan secciones de tubería de perforación. La rotaria convierte la energía eléctrica o mecánica de las plantas de los equipos de poder a tracción en la sarta de perforación. Se localiza sobre el equipo de piso y maneja mecanismos para la perforación rotatoria desde la superficie.

La rotaria transmite la torsión a la sarta a través de una tubería especial llamada kelly, la cual tiene una sección transversal normalmente cuadrada o hexagonal con lo cual puede ser fácilmente enroscada y apretada. El Kelly está conectado a la sarta de perforación en su parte inferior.

2.- Sarta de Perforación.

Su función básica consiste en bajar y levantar la barrena; transmitirle peso y torsión (movimiento de rotación) a la barrena y conducir el fluido a presión hacia la barrena.

La sarta de perforación se compone de tubería de perforación, lastrabarrenas y barrena.

a) Tubería de Perforación. En una simple configuración, la tubería de perforación corre desde la superficie hasta la barrena. La tubería transmite torsión, fuerzas tensoras (tensión de los elementos superiores y compresión de los elementos inferiores, puesto que algunas de las cargas de la tubería de perforación es soportada por el equipo y otras por la formación) y fluidos. La tubería de perforación viene en secciones que usualmente son de 30 pies de longitud. Cada vez que la barrena perfora 30 pies, la sarta de perforación es suspendida desde la superficie para conectarle un nuevo tramo de tubería y reiniciar la perforación. Cuando la velocidad de penetración decae debido a los cambios de formación y a barrenas gastadas o rotas, toda la tubería de perforación es sacada del agujero para que la barrena pueda ser cambiada.

b) Lastrabarrenas o Collares de perforación. Son tuberías tubulares pesadas de paredes gruesas, similares a la tubería de perforación. Estas frecuentemente se colocan en la sarta de perforación justo arriba de la barrena para proporcionarle un peso adicional.

c) Barrena. Es el componente del sistema que despedaza la roca para penetrar la formación que está siendo explorada.

3.1.1.3 Sistema de Circulación

Permite que el fluido de perforación circule dentro del pozo

y en superficie, mediante un circuito cerrado .

Su función principal es la de apoyar al sistema rotatorio en la perforación del pozo, proporcionando el equipo apropiado, materiales y áreas de trabajo necesarias para preparar, acondicionar y revisar el fluido de perforación.

El sistema de circulación se compone de cuatro componentes principales:

1.- Fluido de Perforación.

Es una mezcla especial de líquidos que circulan a través del pozo, el cual ayuda a la barrena a perforar el pozo y contribuye a controlar las condiciones dentro del mismo. El fluido de perforación es comúnmente referido al " lodo ".

2.- Área de preparación.

Es el área donde el fluido es preparado inicialmente, conservando o alterando sus propiedades fisicoquímicas dependiendo de las condiciones existentes en el pozo.

3.- Equipo de circulación.

Es un equipo especial constituido por bombas duplex o triplex que mueve físicamente al fluido de perforación desde el área de preparación, dentro y fuera del pozo hasta el área de acondicionamiento, regresando éste al área de preparación para su recirculación.

4.- Área de acondicionamiento.

Es el área donde el fluido de perforación es limpiado después de circular a través del pozo.

Esta Área de acondicionamiento incluye:

a) Criba vibratoria. La criba es usualmente montada al final de la primera presa de lodos. El fluido de perforación viene directamente de la criba vibratoria desde el agujero. Su función

principal es eliminar los recortes grandes que provienen de la formación perforada contenidos en el fluido de perforación. Esto se hace por el movimiento del fluido de perforación sobre el colador vibratorio que separa los recortes indeseados. Estos recortes son nocivos y perjudiciales para el sistema de circulación, pues podrían originar una serie de problemas si éstos no son eliminados.

c) Desarenador. El desarenador consiste de cierto número de cilindros en forma de conos que remueven pequeñas partículas de sólidos (40 a 74 micrones) que pasan a través de la criba vibratoria. El fluido de perforación es forzado a través del cilindro de baja presión, con el cual las partículas pesadas existentes son eliminadas y desechadas a través del fondo por medio de una fuerza centrífuga.

d) Desarcillador. El desarcillador es similar al desarenador en operación y función excepto que el desarcillador puede eliminar partículas de la formación muy pequeñas y finas (25 a 40 micrones) contenidas en el fluido de perforación. El uso efectivo del desarcillador y desarenador, reduce significativamente el desgaste de la bomba del lodo. Reduce la cantidad de sólidos de perforación en el lodo que afectarían al sistema completo e igualmente, disminuyen los aditivos químicos que son necesarios, resultando en un incremento en la velocidad de penetración.

e) Presas de lodo. Están provistas de agitadores mecánicos y de un sistema de enfriamiento.

3.1.1.4 Sistema de Potencia.

Son motores que generan la potencia necesaria para la operación de todos los componentes, su función principal es apoyar a los demás sistemas mediante el suministro de la energía requerida para las operaciones de perforación.

Sus principales componentes son los siguientes :

1.- Fuente de poder primaria. Esta provista usualmente por grandes motores de combustión interna llamados motores principales.

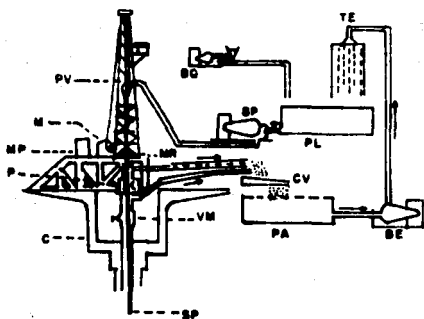
2.- Transmisión de potencia del motor principal hacia las áreas de trabajo por medios mecánicos y/o eléctricos, dependiendo del tipo de motor usado.

3.1.1.5 Sistema de prevención.

Sirven por medio de dispositivos mecánicos para controlar los fluidos y fuerzas expulsivas de los pozos perforados cuando estos llegan ocasionalmente a manifestarse en la superficie. Un brote usualmente se presenta como un " reventón " o descontrol el cual es una intromisión de algún fluido de la formación subsuperficial a cualquier presión alta dentro del pozo.

Sus principales componentes son el preventor de brotes y las líneas de control e inyección.

En caso de un brote durante la perforación primero tenemos la válvula de compuerta (Fig.3.1) la cual puede ser cerrada casi instantáneamente por medio de compresión de aire. Las compuertas son semicirculares con aprisionadores de goma que pueden cerrar completamente alrededor de la sarta de perforación, lastrabarreras o casing, y de esta manera sellar apropiadamente el espacio anular circundante. Sobre la válvula de compuerta está actuando hidráulicamente un preventor de compuerta, el cual es lo suficientemente flexible para cerrar hermeticamente alrededor de la sarta de perforación o casing, cuando pueda ser requerido.



NOMENCLATURA

PV	POLEA VIAJERA
M	MALACATE
MP	MOTOR
C	CONTRAPOZO
VM	VALVULA DE COMPUERTA
P	PREVENTOR
MR	MESA ROTARIA
CV	CRIVA VIBRATORIA
TE	TORRE DE ENFRIAMIENTO
PL	PRESA Lodos
PA	PRESA ACENTAMIENTO
BG	BOMBA PRODUCTOS QUIMICOS
BP	BOMBA PRINCIPAL
BE	BOMBA CIRCUITO ENFRIAMIENTO
SP	SARTA DE PERFORACION

FIG. 3.1 EQUIPO DE PERFORACION ROTARIA DE UN POZO GEOTERMICO

3.1.2 Turbo - Perforación.

La turbo-perforación es una tecnología más sofisticada de la perforación rotaria, ya que para perforar utiliza la energía hidráulica del fluido de perforación para transformarla en energía mecánica de rotación mediante una turbina (juego de estatores y rotores). Esta energía mecánica es transmitida a la barrena por medio de una flecha unida a ésta, en forma independiente de la tubería de perforación.

El turbo-perforador consta principalmente de dos secciones. La primera sección consta además de los pasos de turbina, de baleros radiales, baleros axiales, flecha, funda, embragues de fricción, camisa ahulada, camisa de cromo y anillos de ajuste. La segunda sección consta de las mismas piezas, que se tienen en la primera sección excepto los baleros axiales, ya que al ajustarla con la primera sección, el anillo de ajuste intermedio y los baleros de ésta, sirven para las dos secciones.

A continuación se muestran las condiciones de trabajo de un turbo-perforador, de 9" de diámetro, para emplearse en pozos de 11 pulgadas de diámetro.

Gasto	Potencia	Revoluciones	Momentos	Caída de Presión
gal/min	H.P.	R.P.M.	Kg.m.	Kg/cm ²
475	115	415	198	41.5
550	182	485	270	56.5
635	472	555	372	74.0
710	385	622	445	93.0

Probablemente, la mayor parte de los argumentos válidos para su empleo es que pueden ser alcanzadas altas velocidades de rotación, proporcionando excelente potencia a la barrena. La rotación de la barrena probablemente, dependerá en gran medida de la naturaleza de la formación existente perforada, junto con otros factores.

3.2 Perforación de un Pozo Geotérmico.

De acuerdo a los objetivos que se persiguen en la perforación de los pozos geotérmicos, estos pueden clasificarse en tres tipos:

1.- Pozos exploratorios.

Estos son los que verifican la existencia de formaciones potencialmente explotables, proporcionando información acerca de los fluidos que contiene el yacimiento. Además de ayudarnos a reconstruir las series litológicas de las formaciones atravesadas por el pozo, así como determinar su permeabilidad y porosidad.

Nos ayudan a obtener datos geológicos para el establecimiento del programa de perforación e información de las temperaturas encontradas en la formación.

2.- Pozos de producción.

Su propósito es el de explotar los fluidos geotérmicos del yacimiento, lo cual deberá de realizarse de una manera apropiada para obtener un óptimo rendimiento y asegurar al pozo un máximo tiempo de vida (aproximadamente 15 años).

3.- Pozos de Reinyección.

El objetivo primordial de estos pozos, es de mantener la presión y temperatura del yacimiento mediante la inyección de los fluidos geotérmicos de desecho, los cuales funcionarán como una fuente de recarga para los acuíferos; esto aumentará la extracción del calor almacenado en la formación, presentando una ventaja, en evitar la contaminación del medio ambiente circundante. La perforación de éste tipo de pozos es similar a la de los pozos de producción.

Al efectuar la perforación de un pozo, se deben considerar aspectos importantes y primordiales para lograr llegar a buen término la fase de perforación.

a) Tubería de revestimiento o ademe.

Uno de los aspectos más importantes en perforación es proporcionar las tuberías de revestimiento adecuadas a las profundidades programadas.

Las tuberías para pozos geotérmicos son de mayor diámetro que las usadas para un pozo petrolero de las mismas características. Esto es con el fin de disminuir el espacio anular entre la tubería y la pared de la formación, obtener un volumen mayor de fluidos, disminuir las pérdidas de presión y vibraciones en las tuberías aumentando así la vida útil del pozo.

Una vez que una sección del agujero ha sido perforado, necesariamente debe ser estabilizado contra derrumbes y otros posibles problemas. Esto se logra cubriendo el agujero con una tubería de revestimiento (ademe).

Todas las tuberías están hechas de acero de alta calidad usualmente estándar, debiendo ser usadas tuberías a prueba de ácidos donde las aguas termales son altamente corrosivas. Las tuberías se deben colocar firme y rigidamente por medio de cemento hacia la roca circundante. La profundidad para la cual cada tubería es colocada o instalada dentro del pozo depende de la naturaleza del estrato geológico que penetra la barrena.

b) Cementación.

Al ser introducidas y colocadas las tuberías de ademe a la formación tienen que ser cementadas para protegerlas y estabilizarlas, protegiendo además la formación y los acuíferos.

El punto más importante al realizar la cementación de un pozo geotérmico consiste en lograr que la mezcla de cemento pueda subir de manera uniforme y continua desde la base de la tubería hasta la superficie.

La cementación se efectúa mediante la inyección de una

lechada de cemento en la parte superior del ademe por medio de un tapón, el cual fuerza la lechada a fluir alrededor del fondo o zapata de la tubería de revestimiento y a levantarse por el espacio anular hasta que este alcance la superficie. El cemento portland ordinario es inadecuado para temperaturas arriba de 150° C, requiriéndose de cementos especiales conteniendo harina de sílice, perlita, puzolanas activadas y otros aditivos. Dependiendo de cada caso, se recomienda la perlita para tuberías de producción y las mezclas con puzolana en las superficiales y conductoras.

El uso de cementos adecuados y una buena cementación reducirán sustancialmente problemas mecánicos y problemas de corrosión.

Una cementación defectuosa puede ocasionar subsecuentes dificultades tales como colapsamiento de tuberías. Las tuberías de revestimiento deben mantenerse concéntricamente durante el proceso de cementación por medio de centradores para dar uniformidad a las secciones anulares.

Durante la cementación deberán evitarse presiones de circulación elevadas que puedan inducir a pérdidas de circulación de la lechada cementante.

3.2.1 Aspectos Únicos en la perforación de Pozos Geotérmicos.

Los pozos geotérmicos típicamente tienen un costo de aproximadamente, de dos a cuatro veces al de un pozo petrolero o de gas perforado para una misma profundidad (en la actualidad el costo promedio es de casi dos millones de dólares), variando también los costos de una área geotérmica a otra. Algunas razones por las cuales es mayor el costo en pozos geotérmicos son las siguientes:

1.- Temperatura.

Los pozos de aceite y gas raramente exceden 120°C , mientras que los pozos geotérmicos son provechosos sólo cuando la temperatura excede los 180°C . Por lo tanto, las altas temperaturas afectan los componentes químicos de los fluidos de perforación, así como las cementaciones, tuberías de perforación y revestimiento.

2.- Formación.

Las fuentes geotérmicas son generalmente encontradas en áreas geológicas de rocas ígneas y/o metamórficas, las cuales son normalmente formaciones de rocas muy duras. Mientras que los yacimientos de aceite y gas frecuentemente son localizados en rocas sedimentarias y esto muestra típicamente menor eficiencia en las condiciones mecánicas de las barrenas.

3.- Fluidos.

La alta salinidad natural de los fluidos geotérmicos tienden incrementar la corrosión sobre las tuberías y accesorios de éstos, propiciando el desgaste rápido. El contenido de sólidos disueltos en el fluido de producción puede causar excesivos problemas de incrustación durante la fase de producción.

4.- Presión.

Los yacimientos geotérmicos son típicamente de baja presión lo que significa que la presión "In-situ" en la formación es algunas veces menor que la presión hidrostática. Lo que puede ocasionar una pérdida de circulación.

3.2.2 Construcción de un Pozo Geotérmico.

La topografía con frecuencia limita en número los posibles lugares para establecer el sitio de perforación, típicamente la preparación del lugar se considera aproximadamente el 5% del costo total del pozo.

En la selección del sitio de perforación se deberán tomar en cuenta las características mecánicas del terreno para evitar problemas durante la perforación (hundimientos, deslaves, etc). Si la permeabilidad del terreno es grande, se debe inyectar una lechada de cemento para consolidarlo.

Como ilustración de la construcción de un pozo, se presenta el ejemplo de un pozo en el campo geotérmico de Cerro Prieto en la etapa CP II.

3.2.2.1 PRIMERA ETAPA : Preparación para la perforación

En el lugar 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 sitio donde quedará el agujero.

Antes de iniciar la perforación se hace un contrapozo, (Fosa rectangular que mide 3.0 m. de largo, 2.0 m. de ancho, y 1.50 m. de profundidad que se refuerza con cemento de 20 cm. de espesor), para facilitar la instalación y la operación del equipo de control del pozo, (preventores, carretes, etc.).

Después de terminado el contrapozo, se construyen las presas, se prepara el fluido de perforación y posteriormente se hacen dos agujeros auxiliares de diámetro pequeño estos son el agujero de rata, que tiene una profundidad de 13 m. y es utilizado para guardar la flecha de perforación y el agujero de ratón que tiene una profundidad de 9 m. este se utiliza para contener la tubería durante conexiones rápidas. Ya elaborado estos agujeros se inicia a perforar en seco el pozo, con un diámetro de 40 pulgadas y de 4 a 10 metros de profundidad.

Se introduce el primer tramo de tubería con diámetro de 30 pg., este es cementado por gravedad, en la parte superior de la ty

bería se le fija una línea de flujo de manera que actúe como difusor de flujo de lodo y se puede tener un sistema de circulación cerrado.

El objetivo principal es evitar la erosión o la inundación del pozo en la base del equipo, además proporciona un conducto para elevar el fluido de perforación a la superficie a medida que se va perforando el pozo.

3.2.2.2 SEGUNDA ETAPA : Tubería Conductora.

Su objetivo es proteger al pozo de fallas que se presenten cerca de la superficie, como filtraciones de agua de los mantos superficiales y soportar las formaciones no consolidadas.

Se inicia la perforación del agujero con un sistema de fluido de perforación, empleando una barrena de 12 1/4 de pg hasta una profundidad de 50 m; posteriormente se mete un ampliador de 20 pg con barrena piloto de 12 1/4 de pg hasta la misma profundidad. A continuación se introduce un ampliador de 26 pg con una barrena piloto de 20 pg (Figs. 3.2 A y B). Una vez terminada la ampliación se introduce un ademe de 20 pg grado H-40 de 94 lb/ft y se efectúa la cementación a través de la línea de perforación (Fig. 3.2 C).

Terminado el tiempo de fraguado se le hace la prueba hidráulica, que consiste en aplicar una presión de 100 lb/pg^2 durante 30 minutos. (se hace después de cada cementación con el fin de detectar algún defecto en la cementación).

3.2.2.3 TERCERA ETAPA : Tubería Superficial.

Una vez cementada la tubería conductora se corta el excedente en la superficie para proceder a instalar el sistema de prevención de brotes. Después se continúa la perforación rompiendo el cemento

con una barrena de 17 1/2 de pg, continuando con 12 1/4 de pg hasta la profundidad de 1000 m. Posteriormente, se reperfora con un ampliador de 17 1/2 y barrena piloto de 12 1/4 hasta la profundidad mencionada (Figs. 3.2 D y E). A continuación se corre la tubería de revestimiento de 13 3/8 de pg y una vez instalada se procede a cementarla hasta la superficie (Fig. 3.2 F).

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.

La tubería superficial tiene por objetivo evitar atrapamientos de la tubería de perforación y en ella se colocan los equipos para controlar el pozo durante la perforación y posteriormente las válvulas y conexiones que controlan el flujo del pozo durante su vida productiva.

3.2.2.4 CUARTA ETAPA : Tubería Intermedia.

Se procede a cortar y eliminar la tubería de 20 pg, instalándose el sistema de prevención de brotes sobre la tubería de 13 3/8 de pg.

Se procede a perforar los accesorios para la cementación con una barrena de 12 1/4 de pg hasta la profundidad de 2000 m (Figs. 3.2 B y H).

Antes de cementar se corren registros de temperatura y presión, se introduce la tubería de revestimiento (ademe) con diámetro de 9 5/8 pg, entonces se realiza la operación de cementación en dos etapas dependiendo de las condiciones de la formación (Figs 3.2 I y J).

Esta tubería conducirá el fluido geotérmico desde la tubería de producción hasta la superficie. Aísla zonas arenosas o de arcilla hidratable, además aísla acuíferos profundos que ocasionan

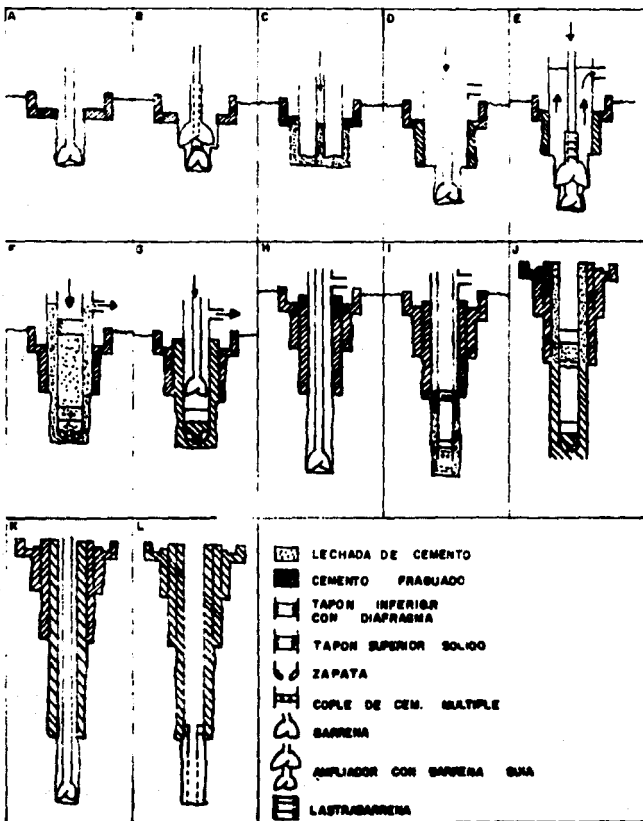


FIG. 3.2 PROCESO DE CONSTRUCCION DE UN POZO GEOTERMICO

corrosión en la tubería de producción.

3.2.2.5 QUINTA ETAPA : Tubería Productora.

La última etapa de perforación se continua con barrena de 8 1/2 de pg (Fig. 3.2 K) hasta la zona productora (2000-3000m de profundidad); es la etapa más delicada ya que se atraviesan zonas de altas temperaturas, con el fin de encontrar una permeabilidad apropiada que soporte económicamente la explotación del yacimiento geotérmico.

Posteriormente, se coloca un colgador del cual quedara suspendido el liner de 7 pg desde 80 m arriba de la zapata de 9 5/8 de pg hasta el fondo del pozo; por último se cementa el espacio anular de traslape entre la tubería de revestimiento de 9 5/8 de pg y el liner de 7 pg.

El liner se encuentra asegurado arriba de la zapata en la tubería anterior y tiene perforaciones frente a la zona productora, con el propósito de permitir el flujo de vapor y/o salmuera geotérmicos desde dicha zona hasta la tubería intermedia, aislando la zona productora y evitando flujos de otras formaciones (Fig. 3.2 L).

Otro de los propósitos de la tubería corta ranurada es para actuar como una coladera para retener el regreso de grandes piezas de roca, las cuales pueden encontrarse en el pozo y para soportar las formaciones no consolidadas.

Finalmente la colocación de tuberías de revestimiento queda mostrado en la Figura 3.3.

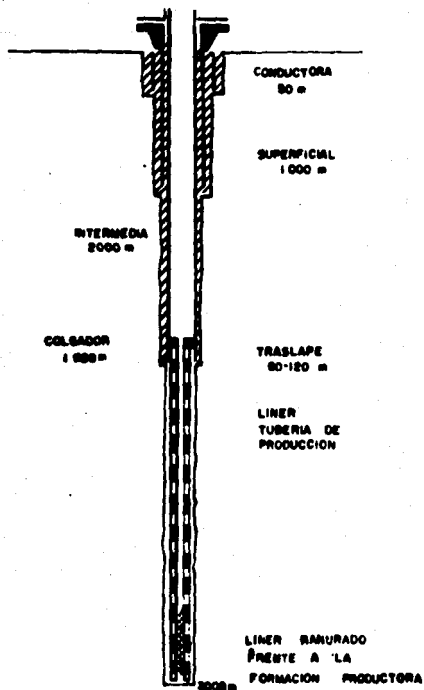


FIG. 33 TUBERIAS DE REVESTIMIENTO DE UN POZO GEOTERMICO

3.2.2.6 SEXTA ETAPA : Inducción y Desarrollo.

Terminada las operaciones de perforación se retira el equipo de perforación, se coloca la válvula maestra y se instalan los equipos necesarios para registrar presión, temperatura y dilatación de tubería en la superficie. ver Figura 3.4 ; posteriormente el pozo atraviesa una serie de etapas que nos permiten conocer sus características de producción y estas son :

a) OBSERVACION.

En esta etapa se corren registros de temperatura y presión a lo largo del pozo mientras este se calienta lentamente hasta alcanzar la temperatura del yacimiento. En esta se indentifican los estratos calientes y frios del pozo.

b) INDUCCION.

En aquellos pozos que no llegan a fluir por si solo se requerira de algún método para provocar el flujo, entre los utilizados en geotermia podemos señalar los siguientes : pistoneo, cubateo, presurización de gases, inyección de aire y empleo de agentes tensoactivos.

c) CALENTAMIENTO Y DEBARROLLO.

El objetivo de esta etapa es calentar gradualmente el pozo, permitiendo que fluya a través de estranguladores con diámetro de 1,2,4, hasta 10 pg. (flujo total). Es importante iniciar esta etapa lo mas pronto posible después de terminar la perforación para evitar problemas de corrosión en las tuberías.

d) EVALUACION.

En esta etapa se realizan mediciones del fluido descargado por el pozo a diferentes presiones de cabzal 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.

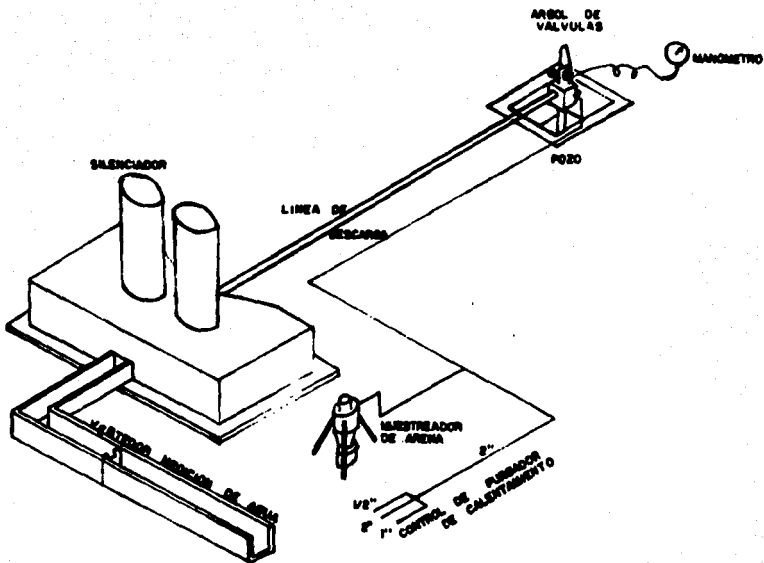


FIG. 3.4 INSTALACION SUFICIAL PARA CALENTAMIENTO, DESARROLLO Y MEDICION DE UN POZO GEOTERMICO

3.3 Problemática de la perforación geotérmica

Durante la perforación de un pozo geotérmico pueden surgir diferentes problemas que tienen una repercusión grande en la economía y tiempo utilizados en la perforación del pozo.

Los problemas que se presentan con mayor frecuencia son los siguientes:

3.3.1 Pérdidas de circulación.

Uno de los objetivos principales de los fluidos de perforación, es la formación de un enjarre de partículas de sólidos sobre la pared del pozo para prevenir pérdida de fluido hacia la formación. Si la permeabilidad de la roca es relativamente baja, comúnmente los fluidos de perforación pueden ejecutar esta función bastante bien. Sin embargo, si una área de alta permeabilidad semejante a un área fracturada es encontrada y la presión del fluido del pozo es más grande que la presión del yacimiento; el lodo es capaz de fluir dentro de las fracturas en lugar de circular y regresar a la superficie, ocurriendo así la pérdida de circulación. En muchos yacimientos geotérmicos, la pérdida de circulación constituye uno de los factores de mayor costo en la perforación.

En la perforación convencional, las zonas de pérdida son taponadas por adición de partículas (de materiales como pulpa de papel, semillas de algodón, cáscara de nuez, fibras de madera etc.) al fluido de perforación y bombeando estos materiales al fondo del pozo y dentro de las fracturas para tapar y cerrar estas. Frecuentemente, las partículas de materiales usadas no dan buenos resultados en aplicaciones geotérmicas. Esto es debido a dos factores, el primero es que los sistemas fracturados térmicos son más grandes que los encontrados comúnmente en yacimientos de aceite y gas; y el otro, que las partículas así mismas tienden a disolverse o perder su integridad estructural ante las altas tem -

peráturas. Si estas zonas de pérdida no son taponadas durante la perforación, estas causarán serios problemas durante las operaciones de terminación.

Se ha tenido éxito al taponar zonas de pérdida con cementos de silicato de sodio que da alguna ayuda en este problema, aunque estas operaciones representen el 20% a 30% de los costos totales de operación en el pozo.

En casos severos de pérdidas es recomendable utilizar polímeros inorgánicos para obturarlas.

Las causas más frecuentes de este tipo de problemas son las siguientes:

- 1.- Causas naturales. Son aquellas que no tienen control humano como la presencia de cavernas o fracturas de la formación.
- 2.- Causas inducidas. Son aquellas que son provocadas por la intervención del hombre, como bajar la tubería de perforación o revestimiento en forma muy rápida, con lo cual se genera un represionamiento que puede fracturar las formaciones.

Otras causas que pueden incrementar la presión sobre las paredes del pozo son, el aumento inadecuado de la densidad del fluido de perforación e iniciar el bombeo del fluido de perforación con una presión alta.

3.3.2 Inestabilidad del fluido de perforación.

Las dificultades relacionadas con los fluidos de perforación forman el más frecuente problema de la perforación.

Los fluidos de perforación estarán sujetos a altas temperaturas por lo que se pueden degradar. Esta degradación se

puede manifestar por medio de la gelación del lodo, cuando éste no sea tratado químicamente en las presas; todo esto causará dificultad en el fluido para circular, lo que inducirá a una canalización y un posible daño a la formación.

La formación se encuentra en ocasiones a temperaturas de 400° C y el lodo, al ponerse en contacto con los fluidos geotérmicos, se calienta lo cual provoca que se pierdan sus propiedades físicas en el pozo.

El problema de la floculación del lodo es debido al aumento de la gelatinosidad y viscosidad causada por deshidratación del fluido de perforación, lo cual hace que pierda fluidez en el fondo del pozo e impida que bajen las tuberías de revestimiento.

La floculación igualmente impide la toma de registros de temperatura y geofísicos con sondas relativamente livianas que son bajadas al pozo.

3.3.3 Estrechamientos y derrumbes en las paredes del pozo.

Durante la perforación frecuentemente ocurren derrumbes y/o desmoronamientos de rocas así como estrechamiento del agujero, lo cual se nota por la elevación de la presión en las bombas, la expulsión a la superficie de una gran cantidad de arena y recortes bastante gruesos de la formación y al aumento considerable del esfuerzo necesario para alzar la sarta desde el fondo del pozo.

Una de las causas de este problema es la alteración del estado tenso en la roca durante la perforación. Esto es, si las tensiones en las paredes y en la zona adyacente al pozo resultan superiores a la resistencia de la roca frágil y elástica, esta se desprejara y desmoronará en el pozo. Si la roca es plástica-Frágil o posee alta plasticidad, comenzará a deformarse plásticamente abultando las paredes del pozo. También los procesos tectónicos (fracturamiento de las rocas, fisuración) reducen la resistencia

de la roca a la desgregación y de esa manera, contribuyen al desmoronamiento, derrumbes y estrechamiento de los pozos.

Indudablemente que otra de las causas de la reducción de resistencia y estabilidad de las rocas puede ser el hinchamiento de las fracciones arcillosas, ya que penetra en ellas el filtrado del fluido perforación. La velocidad y magnitud del hinchamiento dependen de la composición mineralógica de la formación y de la composición química del filtrado.

Aún más los desmoronamientos y derrumbes pueden ser resultado de la reducción brusca de presión del fluido de perforación sobre las paredes del pozo, así como cuando se tiene la humectación periódica y el estrechamiento de las paredes a consecuencia de una variación considerable del nivel del líquido en el pozo.

Al perforar rocas fisuradas y fracturadas, el pozo se estrecha frecuentemente a consecuencia de la adherencia a las paredes de detritos humectados con el fluido de perforación de las rocas desmoronadas y fracturadas. En los intervalos constituidos por rocas permeables, la causa del estrechamiento es la formación en las paredes de un enjarre grueso.

Dentro de los estratos no compactados frecuentemente existen derrumbes de arena, los cuales impiden el avance normal de la perforación, pero cuando esto ocurre a una profundidad mayor de 200 m (650 pies aprox.), se corre el riesgo de que se quede atrapada la barrena por dicho derrumbe.

Los enjarres de lodo gruesos enfrente de estratos arenosos, también son puntos de resistencia en el momento de correr la tubería de ademe.

3.3.4 Atrapamiento de tuberías.

Como resultado del desmoronamiento y el derrumbe de las paredes del pozo, este tiende a presentar un agrandamiento en su diámetro, dificultando bastante el transporte de la roca perforada a la superficie, causando con ello una disminución de la velocidad del flujo ascendente y su fuerza de sustentación.

Al derrumbarse la formación y estrecharse el pozo, puede crecer de manera brusca la magnitud de la fuerza necesaria para el desplazamiento de la sarta de perforación. A veces su desplazamiento se hace imposible, ya que las tensiones que surgen al mismo tiempo superan la resistencia del material de las varillas.

Debido al peligro de roturas de la sarta de perforación es necesario disminuir la carga sobre la barrena y eso conduce a la reducción de la velocidad de perforación, lo cual repercute en un incremento del tiempo de perforación.

Por eso, para la prevención de problemas se deben usar fluidos de perforación que no humedezcan la roca o, en caso extremo, líquidos con un porcentaje de agua muy pequeño y una composición tal de su filtrado que no provoque una reducción notable y rápida de la solidez y estabilidad de la formación. Por ejemplo, es conveniente usar soluciones calcáreo-bituminosas, así como algunas emulsiones invertidas y suspensiones a base de hidrogeles, ya que el medio de dispersión de las mismas prácticamente no se filtra y no humedece la roca.

3.3.5 Pegaduras de tuberías.

Las arcillas limpias en ocasiones son hidratables porque se ha observado que después de haber perforado y acondicionado el agujero para correr la tubería de revestimiento, ésta a veces no baja libremente y no se toma la decisión de sacar la tubería a

tiempo, sino que se sigue forzando a seguir bajando, llegando el momento en que no baja a la profundidad programada y al momento de sacarla, esta pegada por la arcilla hidratable, debido a que ésta provocó una disminución del diámetro en una zona o en todo lo largo del agujero.

A veces para iniciar el movimiento de la sarta a fin de subirla a la superficie hay que aplicar un esfuerzo semejante al esfuerzo límite admitido por la resistencia de los tubos, o incluso superior a éste, tales fenómenos se denominan pegaduras. A veces en el intento de eliminar la pegadura, se aplica un esfuerzo alto y la sarta se rompe, cuando esto llega a suceder se debe proceder a recuperar la fracción de tubería atrapada en el fondo por medio de una operación de pesca.

Una causa del problema anterior puede ser la excesiva presión de la columna del fluido de perforación y a la desviación misma del pozo pues casi siempre están fuera del límite permisible. Si la sarta de perforación permanece en reposo en el pozo, ésta descansa contra la pared bajo la acción del componente de la fuerza de gravedad, al mismo tiempo los enjarres filtrantes en los intervalos formados por rocas permeables, se compactarán bajo el peso de la sarta pues la permeabilidad y humedad de estos disminuye por el efecto de la temperatura.

A consecuencia de la fuerte compactación del enjarre en la zona de contacto, se dificulta la penetración del filtrado del fluido de perforación en esa zona. Por eso, la presión que ejerce la columna de líquido sobre la sarta, resulta mucho mayor que la presión de capa que es transmitida a esta última, a través de la zona compacta del enjarre. De este modo, surge una fuerza que oprime aun más la sarta contra las paredes del pozo y que depende de la magnitud del aumento de presiones y el área de contacto de los tubos con el enjarre filtrante y compacto, así como el tiempo que la sarta permanece en reposo.

3.3.6 Pérdida del diámetro de la barrena.

En formaciones abrasivas, las barrenas sufren un desgaste lateral más rápido que en el frente causando así que los agujeros que son perforados tomen una forma cónica obligando a reparar el agujero con una barrena nueva y con la consiguiente pérdida de tiempo. El desgaste mencionado origina que la arena se meta por la unión, en la zona de baleros, ocasionando el desgaste de los mismos.

Por otra parte, las altas temperaturas en el fondo y el aumento de la fricción provocan que los cojinetes experimenten temperaturas mucho más altas que la del cuerpo de la barrena. Se ha observado que cuando las temperaturas de la formación están cerca de 240°C , el cuerpo del rol de fricción experimenta temperaturas hasta de 540°C , esta excede el rango de $260 - 316^{\circ}\text{C}$, en el cual se presenta un ablandamiento importante en el acero. Normalmente, este fenómeno resultante de las superficies de los cojinetes, reduce la vida útil de la barrena en 20 a 25%. De este modo, los costos del pozo son aumentados sensiblemente por la necesidad, de un número mucho mayor de los viajes requeridos para su cambio y la reducción de la velocidad de penetración al estar perforando. Es importante considerar que la mayoría de los yacimientos existen en formaciones duras y semiduras, en donde la penetración es lenta y el desgaste del equipo es alto.

CAPITULO IV

FLUIDOS DE PERFORACION

4.1 Importancia y funciones.

Durante el inicio de la perforación rotaria, las funciones de los fluidos utilizados en la perforación, se concretaron básicamente a transportar los cortes producidos por la barrena hasta la superficie. A medida que ha transcurrido el tiempo, se han detectado yacimientos más profundos, por tal motivo, el fluido para perforar tiene que reunir un mayor número de condiciones para conservar sus propiedades y poder cumplir con un número mayor de funciones. Cuando dicho fluido no reúne las propiedades necesarias siempre se tendrán problemas en la perforación, un 70% del éxito de los objetivos cuando se programa un pozo, están a cargo del sistema circulatorio (el fluido de perforación, las bombas y un programa hidráulico optimizado); por las razones expuestas anteriormente, se debe de tener un amplio conocimiento del fluido de perforación, debido a la gran necesidad de interpretar un alto número de fallas y riesgos que están relacionados con los fluidos de perforación.

4.1.1 Funciones del Fluido de Perforación.

Para lograr un completo éxito de un programa de perforación implica mantener la eficiencia, seguridad y economía en la construcción del pozo; para ello el fluido de perforación debe de cumplir con ciertas funciones, a continuación se enlistan en orden de importancia 8 de las principales funciones :

1.- Levantar los recortes y transportarlos a la superficie.

Esta fue la primera función de los fluidos de perforación (lodos), en la actualidad sigue siendo la más importante de todas.

Uno de los principales aspectos en la perforación, es la de obtener un valor óptimo en el 'ritmo de penetración'. Para alcanzarlo, es importante el acarreo y transporte adecuado de los recortes, de acuerdo con el tipo de barrena, peso, velocidad de rotación y programa hidráulico.

El fluido de perforación deberá proporcionar un flujo adecuado para crear una turbulencia, a través de la barrena, que levante y transporte instantáneamente los recortes perforados; de otra forma, la velocidad de penetración será reducida, a causa del remolimiento de estos recortes por la barrena.

El levantamiento de los recortes dependen principalmente de las características reológicas del lodo y de su velocidad. El valor del punto de cedencia deberá controlarse, para obtener el óptimo desplazamiento de los recortes a la superficie.

2.- Enfriar y lubricar la barrena.

Durante la perforación se produce considerable calor debido al contacto de la barrena con la formación. El calor producido se transmite al fluido de perforación, el cual por circulación, es llevado a la superficie en donde es disipado. El fluido de perforación también contribuye a lubricar la barrena y reducir la fricción de ésta y de la sarta de perforación con la formación. La mayoría de los fluidos de perforación contienen diferentes aditivos (bentonita, polímeros, etc.) que ayudan a reducir la fricción al enfriar y lubricar la barrena y sarta de perforación.

3.- Transmisión de potencia hidráulica a la barrena

El fluido de perforación es el medio a por el cual se transmite la potencia hidráulica a la barrena.

Un fluido cuya viscosidad en la barrena se aproxima a la del agua, disminuirá las pérdidas de presión por fricción y aumentará la potencia hidráulica disponible a la barrena. Esto se debe a que mientras más baja viscosidad tenga un fluido, menos pérdida por fricción en las paredes del pozo tendrá, ya que le será más fácil el movimiento y, por lo tanto, aumentará el rendimiento de la potencia hidráulica disponible.

4.- Controlar las presiones de la formación.

Durante la construcción del pozo la densidad del fluido de perforación debe de adecuarse para controlar cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo, además de dar un cierto margen de seguridad mientras se efectúa un viaje de tubería. Sin embargo, la densidad no debe de ser tan alta ya que se pueden crear excesivas presiones diferenciales, las cuales disminuirían la velocidad de penetración y podría causar una pérdida de circulación, así como una posible pegadura de tubería.

5.- Mantener la estabilidad en la paredes del pozo.

Estabilizar las paredes del pozo mientras se perfora a través de formaciones inestables, es una función de gran importancia. Las causas de la inestabilidad en las formaciones pueden ser numerosas y son diferentes en cada área.

Estas causas deben quedar bien definidas, para así poder formular un fluido de perforación con los requerimientos físicos y químicos que permitan evitar el problema. Para asegurar la estabilidad del agujero, el enjarre, la densidad, el flujo y la actividad química del lodo deberán ser ajustados.

6.- Facilitar la toma de registros eléctricos, presión y temp.

El lodo debe de suministrar un medio apropiado para evaluar las formaciones a través de los registros eléctricos.

Para tomar los registros eléctricos se requiere que el fluido de perforación sea un medio conductor eléctrico, que permita obtener las propiedades eléctricas de los diferentes fluidos de la formación.

La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida del fluido de perforación se ha desplazado al interior de la formación, o bien si el fluido altera las propiedades químicas o físicas del agujero.

7.- Sustentación de la sarta de perforación y de revestimiento.

A medida que los yacimientos se van buscando cada vez más profundos, el equipo se ve sometido a cargas muy grandes con el fin de llevar a cabo las operaciones: Una de las formas de aligerar las cargas en el equipo de perforación es por medio del efecto de flotación, que experimentan las tuberías cuando se ven sumergidas en lodo, dicho efecto será mayor cuando sea más elevada la densidad. Esta técnica de reducción de peso se debe aplicar con un criterio muy amplio y teniendo un completo conocimiento de las estructuras geológicas que vamos a perforar, para evitar pérdidas de lodo, pegaduras de tubería por presión diferencial.

Para la determinación de la sustentación de la sarta de perforación por el fluido, se seguirá la siguiente secuela, considerando la tensión que obra en una determinada sección de tubería, como base de estudio.

Sea :

$h(\text{pie})$ = sección de tubería.

$w(\text{lb}/\text{pie})$ = peso unitario de la tubería.

El peso o fuerza de tensión que obra siempre y cuando la tubería se encuentre libre o colgada sin fluido de perforación es :
 $P(\text{lb})$ = peso o fuerza de tensión.

$$P(\text{lb}) = w(\text{lb/pie}) * h(\text{pie}). \quad (4.1.1)$$

Cuando la tubería se sumerge en un fluido de perforación, esta comienza a perder peso debido al empuje ascendente que actúa en ella, por lo cual la fuerza de tensión será :

$$T(\text{lb}) = w(\text{lb/pie}) * h(\text{pie}) - E. \quad (4.1.2)$$

E = Empuje ascendente provocado por el lodo bajo la sección considerada.

El valor de (P) puede determinarse conociendo el área de la sección de dicha tubería y la densidad relativa del acero (agua=1) que es 7.83(adimensional), del cual se deduce :

$$P(\text{lb}) = A(\text{pies}^2) * h(\text{pies}) * 62.4(\text{lb/pies}^3) * 7.83 \quad (4.1.3)$$

$A(\text{pies}^2)$ = área de la sección transversal de la tubería

$h(\text{pies})$ = altura de la sección de tubería

$62.4(\text{lb/pie}^3)$ = densidad del agua

El valor de (E) puede ser determinado de la misma forma. En este caso se considera la densidad relativa del lodo(Gm) (agua=1).

$$E = A * h * 62.4 * Gm \quad (4.1.4)$$

$$T = P - E \quad (4.1.5)$$

$$T = A * h * 62.4 * 7.83 - A * h * 62.4 * Gm. \quad (4.1.6)$$

$$T = A * h * 62.4 (7.83 - Gm).$$

$$T = A * h * 62.4 * 7.83 (1 - Gm/7.83). \quad (4.1.7)$$

$$\text{Como } P = w * h = A * h * 62.4 * 7.83 \quad (4.1.8)$$

Entonces se tiene :

$$T = w * h (1 - Gm/7.83). \quad (4.1.9)$$

Donde : $(1 - Gm/7.83).$

Se le llama el 'factor de flotación', que afecta a la tubería al estar en contacto con el fluido de perforación. La ecuación (4.9), expresa que para determinar la tensión neta que actúa en una sección cualesquiera dentro del pozo, es necesario multiplicar el peso de la tubería por el correspondiente factor de flotación.

En el caso de no tomar en cuenta el medio en que está sumergida la tubería, por considerar que es en el aire en donde se encuentra la tubería, el factor de flotación será igual a 1.

8.-Suspensión de los recortes cuando se interrumpe la circulación.

La suspensión de los recortes se efectúa principalmente cuando la circulación del fluido es detenida por un tiempo determinado durante un viaje de tubería, o por cualquier otra causa. Los recortes que no han sido removidos deben quedar suspendidos, ya que de lo contrario, caerá al fondo causando problemas al meter nuevamente la tubería de perforación e intentar reanudar la perforación esto reducirá la velocidad de penetración al producir un atascamiento de la barrena con los recortes asentados.

La velocidad de asentamiento de una partícula a través del fluido de perforación, depende de su densidad, así como de la viscosidad y gelatinosidad o tixotropía del lodo de perforación.

La gelatinosidad previene el asentamiento al reducir el grado de caída de las partículas; sin embargo, altas gelatinosidades requieren de altas presiones de bombeo para iniciar la circulación. Debido a esto se deberá programar, antes de hacer cualquier operación, las propiedades del lodo que convengan para un cierto objetivo. En algunas ocasiones, se puede dejar de perforar y circular antes de sacar la tubería de perforación, a fin de limpiar el agujero de cortes y presumir el asentamiento de éstos durante el viaje de la tubería.

4.2. - Clasificación de los Fluidos de Perforación.

Un fluido de perforación es una substancia circulante (líquido o gas), que se utiliza en la perforación rotaria, para ejecutar de una manera óptima las funciones requeridas, durante las operaciones de perforación.

Los fluidos de perforación se han clasificado de diversas maneras, en la Tabla 4.1 se muestra la siguiente clasificación de acuerdo a su composición.

4.2.1 Fluidos Neumáticos.

Estos fluidos permiten altas velocidades de penetración debido a que reducen la presión hidrostática, y minimizan los problemas de pérdida de circulación.

Como ya fue mencionado su ventaja es el alto ritmo de penetración pero también presentan serias desventajas tales como :

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

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

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

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

1.- Aire Seco.

Su aplicación queda restringida en agujeros inestables, formaciones productoras de agua y por factores económicos. Su capacidad de acarreo depende de su velocidad anular, con este tipo de fluido se obtienen altos valores en la velocidad de penetración, sin embargo, con la presencia de gasetano puede crear una mezcla crítica explosiva que llegue a detonar, en el agujero, lo cual es una amenaza para la perforación.

2.-Niebla.

Este tipo de fluido se obtiene de la combinación de aire seco con pequeñas cantidades de agua y surfactantes espumosos inyectados a altas velocidades en una corriente de aire. La niebla se puede usar para perforar áreas donde se encuentren pequeñas cantidades de agua de formación. Como con el aire seco, la capacidad de acarreo de la niebla depende únicamente de la velocidad anular. El peligro de una explosión subterránea es también un obstáculo para la perforación con niebla.

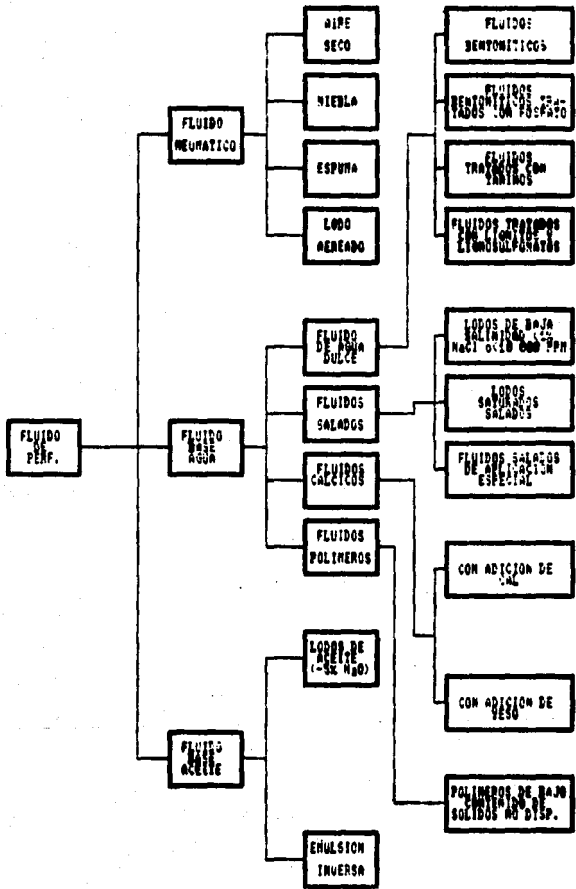
3.-Espuma.

Los lodos de espuma se elaboran inyectando agua y surfactantes espumosos, en una corriente de aire, creando una espuma viscosa. La capacidad de acarreo de estos fluidos depende en mayor grado de la viscosidad del fluido que de la velocidad anular. Las espumas se utilizan cuando existen flujos débiles de las formaciones atravesadas. En comparación con el aire, la espuma ejerce una presión mayor, que actúa sobre los fluidos de la formación.

4.-Lodos Aerados.

Los lodos aerados se elaboran inyectando aire y una mezcla gelatinosa. Estos fluidos son usados para perforar formaciones de baja presión, donde el equipo superficial y de profundidad impiden el uso de aire o espuma, y en ocasiones en zonas de pérdida de circulación.

Clasificación de los Fluidos de Perforación (Tabla 4.1).



4.2.2 Fluidos Base Agua.

Los fluidos base agua son los más utilizados en la perforación geotérmica en la actualidad, esto es debido a los buenos resultados que se han obtenido en el campo, así como también a su bajo costo de mantenimiento comparado con los fluidos base aceite y neumáticos.

Estos incluyen una amplia variedad de composiciones químicas como se muestra a continuación :

1.-Fluidos de agua dulce.

a)Fluidos Bentoníticos.

Son fluidos de perforación simples tratados con bentonita que se puede utilizar en la perforación de pozos someros en áreas no problemáticas. La bentonita mejora la capacidad de acarreo y previene los problemas que se presentarían perforando con agua solamente. Se preparan mezclando bentonita y agua, aproximadamente un saco de bentonita por metro cúbico de agua, aunque siempre depende de la calidad de la arcilla, y es durante la perforación cuando cierto porcentaje se incorpora de las formaciones arcillosas aumentando el volumen de fluido. Las adiciones continuas de agua dispersan las partículas arcillosas manteniendo la viscosidad requerida.

b) Fluidos bentoníticos tratados con fosfato.

Los fosfatos son productos inorgánicos (dispersantes) usados para reducir la viscosidad de los lodos bentoníticos que han sido contaminados con sólidos de la formación o cemento. Los fosfatos no controlan el filtrado y son inestables a temperaturas mayores de 150 °F. De cualquier manera los fosfatos son los dispersantes químicos más eficientes pues sólo se necesita una pequeña cantidad para controlar las propiedades de flujo.

En las partes superiores del pozo o en pozos someros en lugar

de tratamientos costosos a base de lignitos y surfactantes se pueden utilizar fosfatos, siempre y cuando no existan problemas de altas temperaturas de fondo.

c) Fluidos tratados con taninos.

Generalmente se utilizan a mayor profundidad cuando la temperatura del pozo ya no permite seguir trabajando con el fosfato que se está usando o por que las condiciones del pozo requieran un cambio de tratamiento. Un problema común en la mayor parte de los fluidos tratados con este o cualquier otro reactivo es la presencia de un alto contenido de sólidos. Los fluidos con taninos se han usado en pozos donde la mayor parte de las formaciones son arcillosas, obteniéndose buenos resultados a profundidades someras.

d) Fluidos tratados con lignitos y línosulfonatos.

Los lodos tratados con lignosulfonatos son el último avance a partir de un lodo tratado con taninos. A medida que la concentración de sólidos aumenta, se hace necesario añadir mayores cantidades de lignosulfonatos para controlar el valor de cedencia y la consistencia gel del lodo. Los lodos con lignosulfonatos son también los más resistentes a la contaminación por calcio o por un aumento en el contenido de cloruros. Los lodos con lignitos y línosulfonatos se pueden usar para preparar lodos de densidad elevada y son estables a temperaturas hasta de 400 °F. El por que de la combinación de estos dos reactivos químicos, se debe a que los lignitos son efectivos para controlar el filtrado, mientras que los línosulfonatos son adelgazantes muy efectivos.

2.- Fluidos Salados.

Dependiendo de la cantidad de sal (NaCl) en el lodo los fluidos salados se pueden dividir en :

a) Lodos de baja salinidad (1% de NaCl ó < 10 000 ppm).

Estos lodos exhiben altas velocidades de filtración y enjambres gruesos. Para su control se utilizan reactivos orgánicos. su pH, generalmente es mayor de 8.0. Con el uso de valores de pH

mayores de 9.5, se controla la fermentación de los agentes reductores de filtrado. La suspensión es difícil debido a la floculación de las arcillas, donde para mejorar esta propiedad se utiliza atapulgita o bien bentonita que deberá ser prehidratada en agua dulce. La salinidad puede ser producto del agua de mar, sal añadida (NaCl) en la superficie o sal disuelta, proveniente de estratos de sal (domos salinos o formaciones evaporíticas). Este tipo de lodos se usa para perforar domos salinos y algunas veces cuando se encuentran flujos de agua salada, así como formaciones o secciones de anhidrita, yeso y de lutitas problemáticas.

b) Lodos Salados Saturados.

Estos lodos se utilizan para perforar domos salinos, donde existen problemas de agrandamiento del agujero con otros lodos.

Es necesario controlar el filtrado antes de llegar al domo salino, por medio de agentes de control de filtración (reducirlo si es posible hasta 1 cc según la norma API RP13B). El control de sus propiedades consiste en añadir agua salada para reducir la viscosidad; de atapulgita para aumentar su poder de sustentación; y de agentes reductores para controlar el filtrado.

c) Fluidos Salados de Aplicación Especial.

Algunos de estos lodos se elaboran a partir de polímeros, los cuales aumentarán la viscosidad del agua salada. Su aplicación principal es en operaciones de reparación de pozos o en la perforación costafuera y en áreas de lutita donde no se necesitan lodos de alta densidad. Otros sistemas son similares a los lodos convencionales pero incluyen aditivos para la estabilización de la lutita.

3.- Fluidos Cálcidos.

Los lodos cálcidos son aplicables en la perforación de capas de poco espesor de anhidrita y también en aquellas zonas donde las lutitas deleznableles y los flujos de agua salada son comunes. Estos

lodos difieren de los otros lodos base agua, en que las arcillas sódicas (bentonita) se convierten en cálcicas a través de la adición de cal y yeso.

a) Con adición de Cal.

Los lodos de cal se preparan mediante la adición de sosa cáustica, adelgazantes orgánicos y cal hidratada, a un lodo bentonítico. Estos lodos resisten contaminaciones hasta de 50 000 ppm. de sal (30 000 cloruros); sin embargo, tienden a solidificarse o a desarrollar alta gelatinosidad a altas temperaturas.

b) Con Adición de yeso.

Los lodos con adición de yeso se han usado en la perforación de formaciones de anhidrita y yeso, especialmente aquellos con intercalaciones de sal y lutita. Se elaboran a partir de lodos naturales mediante la adición de yeso (sulfato de calcio) y lignosulfonatos.

4.- Fluido polimérico de bajo contenido de sólidos no disperso.

Los lodos de bajo contenido de sólidos no dispersos son el resultado de recientes avances tecnológicos entre la industria química de los polímeros y la tecnología de perforación. El objetivo de este tipo de lodos es que en lugar de dispersar los sólidos en el lodo, los recubre y los flocula para facilitar su desplazamiento y así mejorar la estabilidad y características del fluido de perforación.

Diversos tipos de lodo con polímeros de bajo contenido de sólidos no dispersos, se han elaborado usando varios polímeros con o sin bentonita y evitando el uso de dispersantes.

Estos lodos se elaboran mediante la adición de bentonita con polímeros floclulantes, para usar menos bentonita, o sea una concepción menor de sólidos en su elaboración. También se preparan utilizando polímeros reductores, poco recubridores y floclulantes, para su aplicación en formaciones arcillosas. Un buen lodo de este

tipo permitira obtener altas velocidades de perforación debido a sus propiedades tixotrópicas y filtrantes. Son también los lodos base agua mas estables a la temperatura, debido a su bajo contenido de sólidos.

4.2.3 Fluidos base aceite.

Existen los lodos base aceite que no son de uso tan común como los lodos base agua, su principal uso es durante la perforación de zonas con lutitas deleznales que se hinchan con el agua. Las desventajas que presentan es que son más costosos, además de que pueden ocasionar la contaminación con aceite de los acuíferos a --travesados durante la perforación. Su uso poco común en la geotermia se debe principalmente a que casi siempre se perforan zonas con pérdidas de circulación; y siendo este lodo muy costoso (por los materiales y tratamientos químicos) al perderse en dichas formaciones ocasionaria una pérdida considerable de dinero.

1.- Lodos de aceite (menos de 5% de agua).

Los lodos de aceite son usados principalmente para evitar las contaminaciones de agua de las formaciones productoras y para muestreo de formación en estado nativo. Son también inertes a las contaminaciones tales como de H_2S , secciones de sal y anhidrita. Los lodos de aceite se elaboran comunente con crudo previamente desgasificado (aceite estabilizado).

2.- Lodo de Emulsión Inversa.

Las emulsiones son una dispersión de un liquido inmisible en otro liquido inmisible ejemplo aceite en agua o agua en aceite el primer ejemplo se refiere cuando la fase continua es agua y la fase dispersa es el aceite.

Las emulsiones de agua en aceite, contienen el agua como fase dispersa y el aceite (usualmente diesel) como fase continua. Va --lores hasta de 40% de agua se puede dispersar y emulsificar en

aceite. Las emulsiones inversas tienen las características de los lodos base aceite, ya que el aceite es la fase continua y el filtrado es únicamente aceite. Estos fluidos son estables a altas temperaturas, son inertes a la contaminación química y pueden ser densificados después de ser ajustado la relación aceite-agua. El uso de los lodos de aceite y de emulsión inversa, requiere medidas de seguridad para protección del medio ambiente.

4.3 Reología

En el año de 1929, se adoptó la palabra reología para designar un nuevo campo en el cual se estudiarían las propiedades que determinan el comportamiento mecánico y la tecnología de flujo de la mayoría de los materiales.

Reología (del griego: rheon-fluir), es el estudio del flujo y deformación de la materia, particularmente el fluido plástico de los sólidos y el flujo de los líquidos no newtonianos.

Se dice que un cuerpo es deformado cuando la aplicación de un sistema de fuerzas adecuado cambia la forma o el tamaño del mismo. Se dice que un cuerpo fluye si su grado de deformación cambia continuamente.

Los objetivos básicos de la reología (ecuaciones constitutivas) son las siguientes :

1.- Desarrollar las técnicas que permitan establecer las relaciones de comportamiento de un material.

2.- Establecer las relaciones entre esfuerzo y deformación, que sean capaces de determinar el comportamiento de materiales complejos.

4.3.1. Clasificación del Tipo de Fluido.

De acuerdo al estudio de la reología se han clasificado de la siguiente manera los tipos de fluidos (Tabla 4.2).

Para caracterizar estos tipos de fluidos de acuerdo a la reología se deberá de comprender los siguientes conceptos :

a) Esfuerzo de cortante y velocidad de corte.

Los fluidos se distinguen por su comportamiento de flujo. El comportamiento de flujo de un fluido se expresa en terminos de un fuerza externa aplicada, cuyo resultado es velocidad de corte a ese fluido. La velocidad de corte se define como un gradiente de velocidad a través de las capas adyacentes cuando el flujo es laminar. El fluido tiende a resistirse, si en su interior las capas se mueven a diferente velocidades, esta resistividad de la fuerza ejercida entre capas dan origen a un escurrimiento o resbalamiento que recibe el nombre de esfuerzo cortante.

b) Viscosidad del fluido.

La viscosidad es la medida de la resistencia interna de los líquidos o de los gases al flujo. Si se tienen dos superficies paralelas en el seno de un líquido, separadas una distancia d (Fig. 4.1) por el mismo líquido y, a una de ellas de Área A , se le aplica una fuerza tangencial F para producir una velocidad relativa de la superficie respecto a la otra. Se tiene que la magnitud de esa fuerza es directamente proporcional al Área considerada y a la velocidad relativa de las superficies, e inversamente proporcional a la distancia entre estas superficies, esto es :

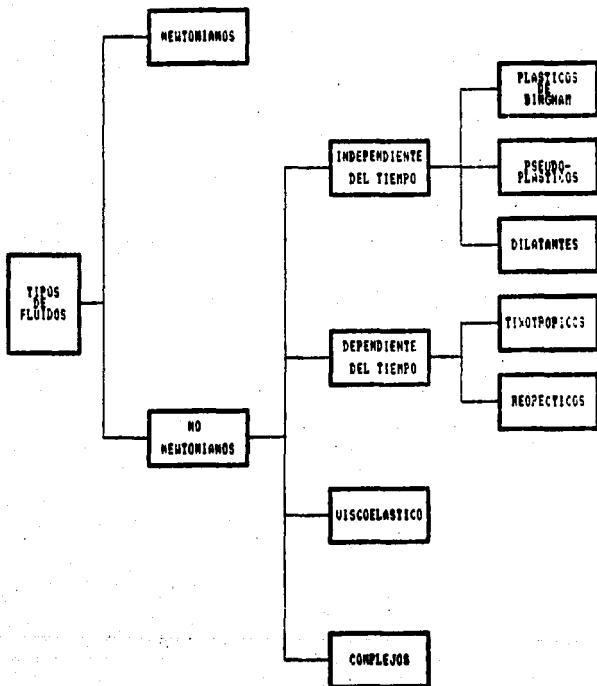
$$F = (A \times V / d) \times \mu \quad (4.3.1)$$

En donde el coeficiente de proporcionalidad (μ) es la viscosidad. El agua tiene una viscosidad de 0.895 cps a 25° C.

La viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temper-

Clasificación del Tipos de Fluidos

Tabla (4.2)



natura, excepto en altas temperaturas.. Un aumento de presión produce un aumento en la viscosidad, aunque este efecto es más notable a presiones considerablemente altas.

La viscosidad de los lodos afecta la velocidad de perforación. En una misma formación y manteniendo todas las demás variables iguales, la velocidad de perforación disminuye a medida que aumenta la viscosidad. En la Figura 4.2 se muestra una curva promedio del efecto de la viscosidad sobre la velocidad de perforación obtenida con datos de laboratorio, según Eckel (API Drilling and Production Practices, 1954), De acuerdo con esta curva la mayor reducción en la velocidad de perforación se obtiene en el rango de viscosidad de 0 a 15 cps y, desafortunadamente, la mayor parte de los lodos que contienen bentonita poseen viscosidades aparentes mayores de 15 cps.

Este efecto de la viscosidad sobre la velocidad de perforación se debe posiblemente, a una o varias de las siguientes causas:

- 1) al aumentar la viscosidad del lodo disminuye la eficiencia hidráulica de las bombas de lodo ;
- 2) Incrementa las pérdidas por fricción en el circuito del lodo, lo cual significa, por lo general, una reducción en el volumen de lodo circulado y menor eficiencia del lodo para eliminar los cortes y evitar que la barrena los re-triture nuevamente;
- 3) Los lodos con muy altas viscosidades proporcionan un colchón viscoso que disminuye la fuerza de impacto de los dientes de la barrena sobre la formación.

Si en la ecuación (4.3.1) se despeja m y se arreglan los términos, tenemos la siguiente ecuación muy útil para el estudio reológico de los líquidos.

$$m = (F/A) / (V/D) \quad (4.3.2)$$

en donde :

Esfuerzo de corte (σ) = (F/A) = fuerza de corte/ Área.

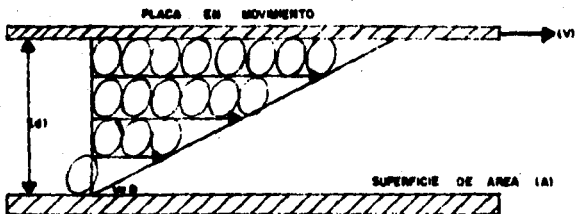


FIG. 4.1 GRADIENTE DE VELOCIDAD ENTRE DOS PLACAS PARALELAS

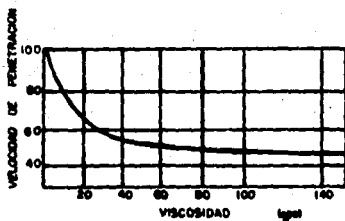


FIG. 4.2 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PENETRACION CON RESPECTO A LA VISCOSIDAD

Velocidad de corte(δ) = (V/d) = velocidad/ distancia.

El estudio de la viscosidad como se indica en la formula (4.3.2), es decir como la relación del esfuerzo de corte con la velocidad de corte en un líquido, tiene aplicación práctica en los viscosímetros de tipo rotacional. Determinando la variación del esfuerzo de corte a diferentes velocidades de corte, se pueden conocer las propiedades reológicas de los lodos de perforación y de cualquier otro líquido.

4.3.1.1 Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos cuyo comportamiento de flujo esta establecido por la "ley de resistencia de viscosidad de Newton ". Esta ley establece que a una temperatura y presión dada, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Esta constante de proporcionalidad es la viscosidad verdadera de los fluidos Newtonianos(Fig. 4.3), matemáticamente se expresa como :

$$\text{esfuerzo de corte } (\sigma) = \text{viscosidad } (\mu) * \text{velocidad de corte } (\delta).$$

La figura muestra la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para fluidos Newtonianos.

La unidad de viscosidad en el sistema es el 'poise ' y se define como la viscosidad de un líquido hipotético tal que una fuerza tangencial de una dina hace que dos superficies paralelas en el seno del líquido, de un centimetro cuadrado de área y a un centimetro de distancia una de otra se muevan a una velocidad relativa de un centimetro por segundo. En la práctica, se emplea más la centésima parte del poise o "centipoise".

$$\text{Poise} = \frac{(\text{dina/cm}^2)}{(\text{cm/seg/cm})} = \frac{\text{gr}}{\text{cm-seg}}$$

4.3.1.2 Fluidos no Newtonianos.

Estos fluidos no manifiestan una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte además no pueden representarse por la ecuación de la viscosidad las cuales se comportan de acuerdo a la 'Reología' de cada uno y por lo tanto son clasificados como no-newtonianos (Fig. 4.4).

4.3.1.2.1 Independientes del Tiempo.

Son aquellos fluidos cuyo valor de corte y esfuerzo de corte no cambian con el tiempo. La Figura 4.4 muestra la relación entre velocidad de corte y esfuerzo de corte de tres tipos de fluido de tiempo independiente, no-newtonianos.

a) Fluidos plásticos de Bingham.

El comportamiento de un fluido plástico de Bingham es que la relación velocidad de corte-esfuerzo cortante, es representado por una línea recta; ésta no pasa por el origen y por lo tanto intersepta el eje de los esfuerzos en un punto diferente al origen. La implementación física de este comportamiento es que el fluido Bingham requiere un valor finito del esfuerzo de corte para iniciar el flujo de fluido.

El valor mínimo del esfuerzo de corte se denomina 'punto de cedencia' (yield point), en el campo el valor del punto de cedencia da una indicación de las fuerzas de atracción entre los sólidos y por lo tanto de la desviación del comportamiento no-Newtoniano del lodo. Se usa más que la viscosidad plástica para indicar el espesamiento del lodo y está muy relacionado con la gelatinosidad; de tal manera que en lodos densos, el nivel adecuado del punto de cedencia es el mínimo para soportar la barita, mientras que en lodos de alta densidad, el valor requerido es únicamente para proporcionar una limpieza adecuada del agujero.

La inclinación o pendiente de la línea que parte del valor

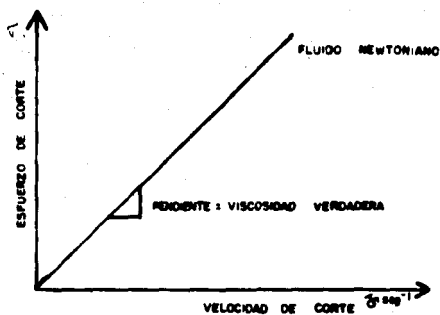


FIG. 4.3 RELACION DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y EL ESFUERZO DE CORTE DE UN FLUIDO NEWTONIANO

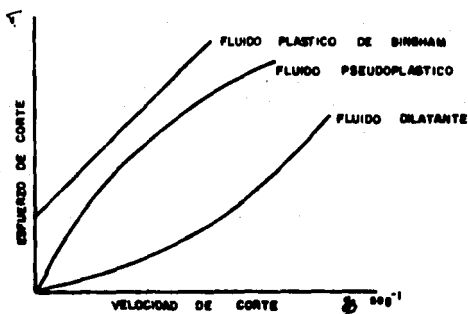


FIG. 4.4 RELACION DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y EL ESFUERZO DE CORTE DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS

del punto de cedencia, se llama viscosidad plástica (PV), y es una medida del espesamiento del lodo que depende del contenido de sólidos, su tamaño y de la temperatura. Es difícil predecir la viscosidad plástica de un lodo de alta densidad, ya que el tamaño de los sólidos es un factor muy importante. Este parámetro es muy útil en el control de la viscosidad de lodo de alta densidad.

Matemáticamente esta relación para el fluido Bingham se puede expresar de la siguiente forma :

Esfuerzo de corte (σ) = (YP) + (PV) + (δ) velocidad de corte.

en donde :

(YP) = punto de cedencia ($lb_f/100 ft^2$).

(PV) = viscosidad plástica (cps).

ejemplos de fluidos plásticos de bingham son : la grasa, mieles, etc..

b) Fluidos Pseudoplásticos y dilatantes.

Este tipo de fluido se caracterizan de acuerdo a la relación de velocidad de corte y esfuerzo de corte mostrada en la Figura (4.4). Ambas curvas, dibujadas en una gráfica logarítmica (log - log) proporcionan líneas rectas (Figura 4.5). El comportamiento de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes, se pueden expresar matemáticamente de la ecuación empírica conocida como ley de potencias de la siguiente forma :

Esfuerzo de corte (σ) = k * velocidad de corte(δ)ⁿ.

Esta ecuación describe el esfuerzo de corte en función de 2 constantes k y n, donde :

k = la medida de la viscosidad del fluido, la cual es uniforme para un fluido dado y se determina por la intercepción de la escala logarítmica mostrada en la Figura (4.5).

n = una medida del grado de desviación del comportamiento de un

flujo newtoniano, el cual es uniforme para un flujo dado y se determina por la pendiente de la recta (Fig 4.5).

Si el valor de n es igual a 1 el fluido es newtoniano. Si n es mayor que 1, el fluido es dilatante y si n es menor que 1, el fluido es pseudoplástico.

Son fluidos pseudoplásticos algunas soluciones poliméricas y fluidos de base agua; y de fluidos dilatantes, el almidón o mica suspensión de agua.

La ecuación de la ley de potencia, se ha modificado para incluir el efecto mínimo del esfuerzo de corte requerido para iniciar el flujo.

4.3.1.2.2 Fluidos Dependientes del Tiempo.

Los fluidos dependientes del tiempo no newtonianos, exhiben un comportamiento en el flujo de manera no lineal dependiendo del tiempo de reposo con un valor constante del esfuerzo cortante.

Estos fluidos son clasificados de la siguiente manera :

a) Fluidos tixotrópicos.

Los fluidos tixotrópicos tienen una estructura interna que aumenta su resistencia al esfuerzo cortante (gelatinosidad) mientras se encuentra en reposo. Cuando estos fluidos son sometidos a valores constantes de velocidad de corte, la estructura gelatinosa se rompe rápidamente y la curva esfuerzo cortante-velocidad de corte, se asemeja a la curva de los fluidos pseudoplásticos o bingham. Las ecuaciones para los fluidos Bingham y la ley de potencias pueden ser utilizadas para describir el comportamiento del fluido tixotrópico una vez que los efectos de la estructura gel ha desaparecido.

Esta propiedad de la tixotropía es el resultado de las fuer -

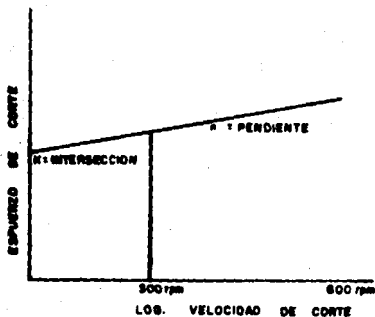


FIG. 4.5 RELACION DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y EL ESFUERZO DE CORTE EN ESCALA LOG-LOG PARA FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS Y DILATANTES

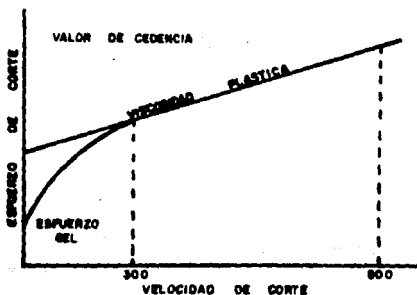


FIG. 4.6 RELACION ENTRE EL ESFUERZO DE CORTE Y LA VELOCIDAD DE CORTE EN UN FLUIDO NO NEWTONIANO CON PROPIEDADES TIXOTROPICAS

zas de interacción de los sólidos a bajas velocidades de corte, que provocan la gelación del lodo y ejercen gran influencia en la viscosidad. Las arcillas son los sólidos eléctricamente más activos, cuyas partículas se pueden reunir para formar una matriz o estructura gel, la cual requiere de una fuerza finita para iniciar el flujo, conforme esta se incrementa, el efecto de dichas interacciones se hace menos importante.

El punto de cedencia de un fluido tixotrópico puede aproximarse por extrapolación de la porción de la línea recta velocidad de corte-esfuerzo cortante y la curva al punto de intersección con el eje del esfuerzo cortante. Esta aproximación no es el verdadero punto de cedencia, se refiere al valor de cedencia y también se expresa en unidades de $lb_1/100 \text{ pies}^2$, como en el caso de fluidos plásticos de Bingham, la viscosidad plástica de un fluido tixotrópico se define como la pendiente de la porción recta de la curva velocidad de corte-esfuerzo cortante.

La Figura 4.6 muestra la curva de un fluido tixotrópico con estructura gel.

La curva velocidad de corte-esfuerzo cortante de un fluido tixotrópico puede también dibujarse como una línea recta, en una hoja logarítmica, con objeto de determinar los valores de (n) y de (k) , usando la ecuación de la ley de potencia.

La tixotropía se puede definir como el fenómeno exhibido por algunos geles que se hacen fluidos con el movimiento, siendo este cambio reversible.

Ejemplo de fluidos tixotrópicos son los lodos de perforación, mayonesa, suspensiones de arenas finas y pinturas. Contrario a los fluidos tixotrópicos, se encuentran los fluidos Reopécticos.

b) Fluidos Reopécticos.

Este tipo de fluidos, al contrario de los fluidos tixotrópi -

cos, tienden a aumentar los esfuerzos estructurados (arriba de un límite) bajo un valor de velocidad de corte. Una característica de estos es el incremento del esfuerzo cortante con respecto al tiempo, a una velocidad de corte constante (Fig. 4.7).

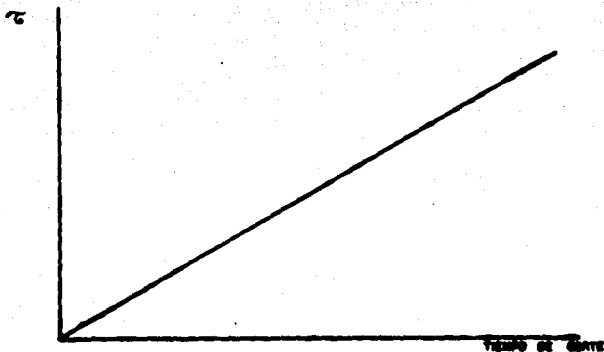


FIG.47 COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO CORTANTE CON RESPECTO A EL TIEMPO DE CORTE, CUANDO LA VELOCIDAD DE CORTE ES CONSTANTE

4.3.1.2.3 Fluidos Viscoelásticos.

Son aquellos cuyas propiedades viscosas muestran ciertos grados de elasticidad. Por ejemplo, los polímeros viscoelásticos usados en los fluidos de perforación, tienden a producir elongaciones cuando están sujetos a alto valores de velocidad de corte y a regresar a su condición inicial, cuando dichos valores descienden a su nivel normal. Este comportamiento viscoelástico causa un adelgazamiento del lodo cuando este pasa a través de la barrena, reduciendo las pérdidas de presión por fricción. En el espacio anular, con bajos valores de velocidad de corte, el lodo vuelve a adquirir sus cualidades anteriores, mejorando su capacidad de acarreo. Esta característica viscoelástica, comúnmente se designa como la habilidad de reducir el esfuerzo cortante del lodo de perforación.

4.3.1.2.4 Fluidos Complejos.

Son fluidos que muestran en su comportamiento más de un tipo de los demás fluidos, es decir fluidos que bajo condiciones variables de valor de velocidad de corte, temperatura, presión y tiempo muestran propiedades tixotrópicas, viscoelásticas y también de los fluidos plásticos de Bingham y pseudoplásticos.

4.3.2 Factores que Afectan la Reología.

Actualmente, no existen instrumentos para medir en el campo las propiedades reológicas del lodo dentro del pozo, a las condiciones de temperatura, presión y tiempo de trabajo, debiéndose de estar atento a esos efectos que puedan ser de consideración:

a) Temperatura.

La reología de un fluido depende de su temperatura, si un lodo de lignosulfonato es probado en un viscosímetro Fann 35 VA a 90 °F y más tarde, a 120°, los resultados son completamente diferentes. Generalmente, cuando la temperatura aumenta la viscosidad disminuye, excepto en altas temperaturas, tal es el caso de los lodos

cálcicos en los que a temperaturas de 300 °F se gelatinizan y aún se llegan a fraguar.

b) Presión.

Esta tiene un pequeño efecto en la reología de los lodos base agua, pero puede afectar la reología de los lodos base aceite, en el laboratorio puede valorarse la reología de los lodos bajo condiciones diversas de presión y temperatura, desafortunadamente esos instrumentos no son aún adaptados al uso de campo.

c) Tiempo.

La reología de un fluido también es función del tiempo, de una manera explicativa.- La lectura de viscosidad a 600 rpm en el Fann siempre se tomará antes de la medición a 300 rpm, si se invierte el orden, los resultados no serían los mismos, la resistencia al gel es otra manifestación que depende del tiempo, la estruadura del gel se desarrolla después de un periodo de tiempo durante el cual el fluido ha estado sujeto a reposo o bien a 'cero' la corte.

4.4 Criterios de Selección del Fluido de Perforación.

Para la selección del fluido de perforación se recomienda tomar toda la información disponible de todos los estudios hechos en el campo y en el laboratorio, para así diseñar un programa de lodos adecuado a las necesidades de la perforación, a continuación se dan algunos de los puntos más importantes para la selección del fluido de perforación (Tabla 4.3).

1) tipo de formaciones a perforar

a) Perforación en Lutitas delezneables

El problema de las lutitas puede ser menor o muy grave y tiene gran influencia en la selección del fluido de perforación. En situaciones normales, cuando el problema de las lutitas es menor,

usualmente la formación oportuna de un buen enjarre controla la lutita deleznable. Si la situación es grave, se debe de hacer un análisis completo de la lutita y se debe de elaborar el fluido de perforación específico para controlar o disminuir el problema.

b) Anhidrita

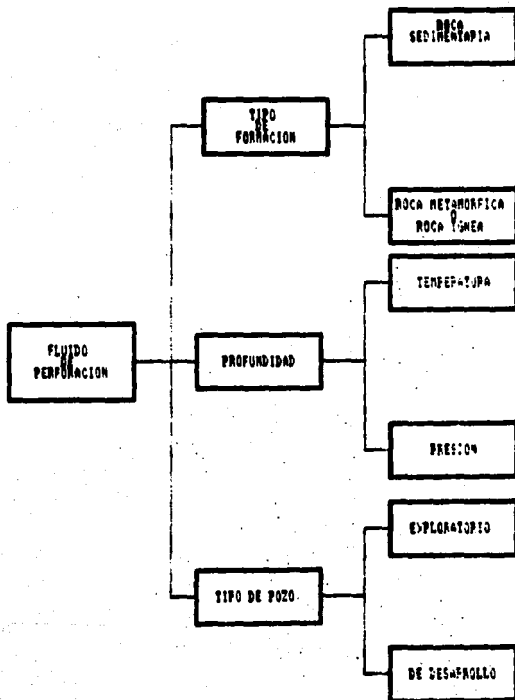
El problema más grave al perforar formaciones de anhidrita (CaSO_4) es el factor de los iones calcio (Ca^{++}) sobre las partículas de bentonita en un sistema de agua dulce. La contaminación cálcica de la formación de anhidrita limita seriamente la hidratación de la bentonita y floculará la bentonita, hidratada ocasionando aumentos en la pérdida de fluido y en las propiedades viscosas del fluido de perforación. Si solamente se perforan unos cuantos estratos de anhidrita o si se perfora una sección de anhidrita el recurso más económico sería eliminar el calcio y utilizar el fluido de perforación que más satisfaga a la perforación. Si se necesitan perforar secciones masivas de anhidrita y lutita, entonces se tendrá que usar un lodo especial, que no sea afectado por la anhidrita y/o lutita.

c) Perforación en formaciones salinas.

En la perforación de secciones de sal se tendrán efectos de contaminación similares, en un lodo de agua dulce, a los que se tiene con anhidrita. dado que los estratos de sal suelen estar compuestos de cloruro de magnesio (MgCl_2), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de sodio (NaCl) los efectos adversos antes mencionados serán debidos a los iones de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), y de cloruro (Cl^-).

Si es posible, se debe hacer un análisis del contenido de calcio y magnesio, para determinar si estos contaminantes se pueden eliminar económicamente. Si sólo se necesita perforar unos cuantos metros de estrato y esté luego se reviste, se puede usar un lodo de agua dulce, con tal que los iones de calcio y magnesio se hayan eliminado.

Criterio de Selección del fluido de perforación (Tabla 4.3).



Si se están perforando secciones masivas de sal, se tendrá que usar un lodo saturado de sal o un lodo inerte, para evitar el deslave y la formación de cavidades.

2) La profundidad.

Al realizar las perforaciones, las dificultades y problemas técnicos, así como los riesgos, se incrementan en razón directa con la profundidad. Generalmente, cuando la profundidad se incrementa, la presión y temperatura aumenta, variando éstas considerablemente de una área a otra.

a) Temperatura.

Generalmente al incrementarse la temperatura unos 15 °F la velocidad de las reacciones químicas en el fluido de perforación se duplican con lo cual las reacciones de los componentes químicos se aceleran, este fenómeno afecta las propiedades reológicas y el control de la pérdida de fluido. En otras áreas con contaminación del lodo serán perjudiciales para las propiedades del lodo.

Muchos de los dispersantes y aditivos de pérdida de fluido, empleados en los fluidos de perforación pierden la fuerza y llegan a ser inefectivos al incrementarse la temperatura:

- Los fosfatos son limitados a 180 °F.
- La carboximetilcelulosa y los almidones se degradan arriba de 300 °F.

Los lodos con alto pH y alto óxido de calcio (cal) son sujetos a solidificación cuando la temperatura se encuentra arriba de 260 °F.

La viscosidad de la fase líquida del lodo de perforación se decrementa con el aumento en la temperatura, haciendo que la pérdida de fluido y espesor del enjarra se incrementen en el pozo.

Las altas temperaturas dan como resultado espesas gelatinosidades en muchos tipos de lodos de perforación, resultando lo sig. :

- La reducción en el ritmo de perforación.
- Dificultad para regresar al fondo después de un viaje, causando pérdida de tiempo e incremento en los costos.
- Dificultad en la obtención de datos a partir de los registros eléctricos.

b) Presión.

La determinación del gradiente de presión de la formación y de fractura, tienen un papel muy importante en el diseño del fluido de perforación, así como en el diseño de asentamiento de tuberías de revestimiento del pozo.

El incremento del gradiente de presión lleva consigo el aumento de la densidad del lodo para controlar las presiones durante la perforación.

La presión hidrostática está en función de la profundidad del pozo y densidad del fluido de perforación.

se tiene que :

$$P_h = 0.052 \cdot \rho \cdot h \quad (4.4.1)$$

donde :

ρ (lb/gal) = Densidad del fluido de perforación.

h (pies) = Profundidad del pozo.

P_h (lb/pg²) = Presión hidrostática.

La obtención del gradiente de formación puede realizarse apartir de la ecuación de Ben A. Eaton.

$$P/D = S/D - (S/D - (P/D)_n) \cdot (R_o/R_n)^{1.2} \quad (4.4.2)$$

donde :

P/D = Gradiente de presión de formación.

S/D = Gradiente de sobrecarga.

(P/D)_n = Gradiente de presión normal.

para la costa del Golfo de Luisiana = 0.465 lb/pg²/ft.

para la costa del Golfo de Texas = 0.433 lb/pg²/ft.

R_n = Resistividad de la lutita (trazo de la línea normal) (ohm-m).

R_o = Resistividad de la lutita del registro del pozo (ohm-m).

Si se utiliza un registro de conductividad el término de las resistividades es sustituido por (C_n/C_o)^{1.2}.

C_n = Conductividad de la línea normal, millohas-m.

C_o = Conductividad observada del registro del pozo, millohas-m.

En caso de emplear datos del registro de perforación (exponente "d" o "dc" corregido por la densidad del lodo) el término de las resistividades o conductividades se sustituyen por : (d_{co}/d_{cn})^{1.2}.

d_{co} = Lectura de la línea normal del registro de exponente.

d_{cn} = Lectura del exponente dc calculado en el punto de interés.

Mientras que la presión de fractura se puede calcular con las siguientes ecuaciones:

Hubbert y Willis.

$$P_f/D = 1/3 (S/D - P/D) + P/D \quad (4.4.3)$$

Eaton.

$$P_f/D = (\nu / 1-\nu) (S/D - P/D) + P/D \quad (4.4.4)$$

Matthews y Kelly.

$$P_f/D = K_i (\gamma / D) + P/D \quad (4.4.5)$$

donde :

P_f/D = Gradiente de fractura de la formación.

K_i = Coeficiente de esfuerzos matriciales, adimensional (Fig.4.8).

S = Presión de sobrecarga (lb/pg^2).

P = Presión de formación (lb/pg^2).

D = Profundidad del punto de interés (pies).

ν = Relación o proporción de Poisson en función de los esfuerzos matriciales, adimensional (Figura 4.9).

Se puede aplicar la siguiente fórmula empírica para determinar la relación de Poisson.

$$\nu = 0.0471 (D)^{0.2352} \quad (4.4.6)$$

En la ecuación de Matthews y Kelly, se emplea un valor de longitud equivalente obtenida a partir de la siguiente ecuación.

$$D_e = \gamma / 0.535 \text{ , (pies) ; } \gamma = S - P \text{ , (lb/pg}^2\text{)}.$$

Obtenido " D_e " se localiza el valor de k_i de la (Fig.4.10).

La presión hidrostática del fluido de perforación (lodo) debe de mantenerse en un valor ligeramente superior a la presión de formación, evitando la entrada de fluidos extraños al agujero y también debe de ser inferior que la presión de fractura para evitar la pérdida del fluido de perforación el cual ocasionaría serios problemas durante la perforación del pozo.

3) Tipo de Pozo.

Para seleccionar el tipo de fluido dependerá si se tiene conocimiento de la zona explorada, para esto se tienen los siguientes pozos :

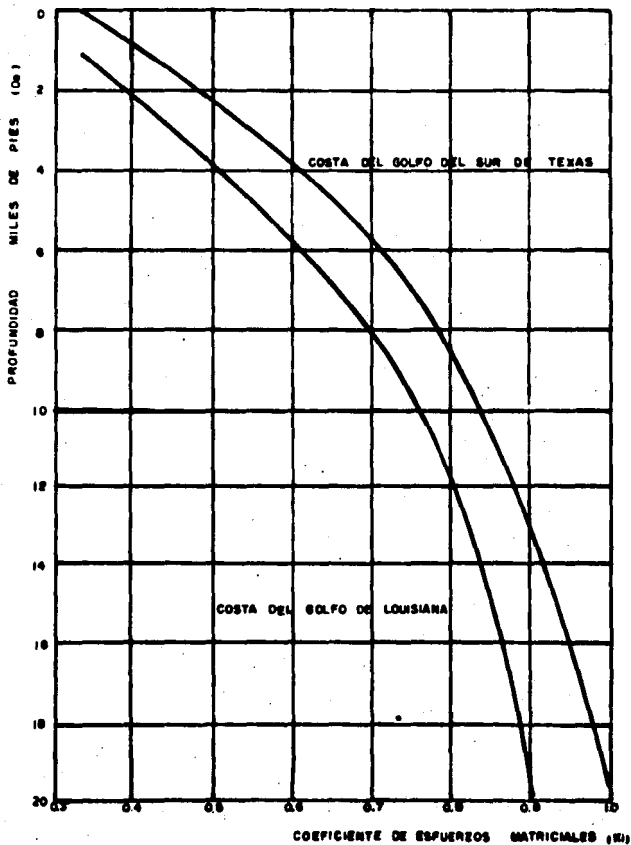


FIG. 4.8 COEFICIENTE DE ESFUERZOS MATRICIALES

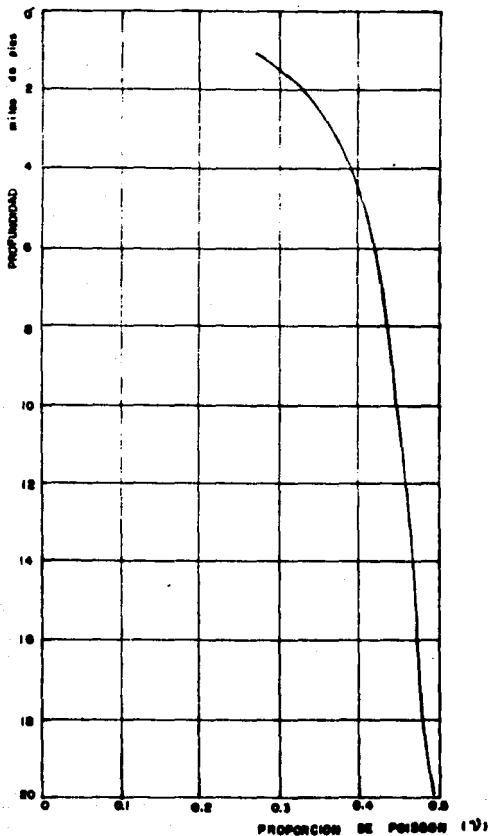


FIG. 4.9 VARIACION DE LA PROPORCION DE POISSON PARA FORMACIONES COMPACTADAS CON SOBRECARGA VARIABLE (EATON)

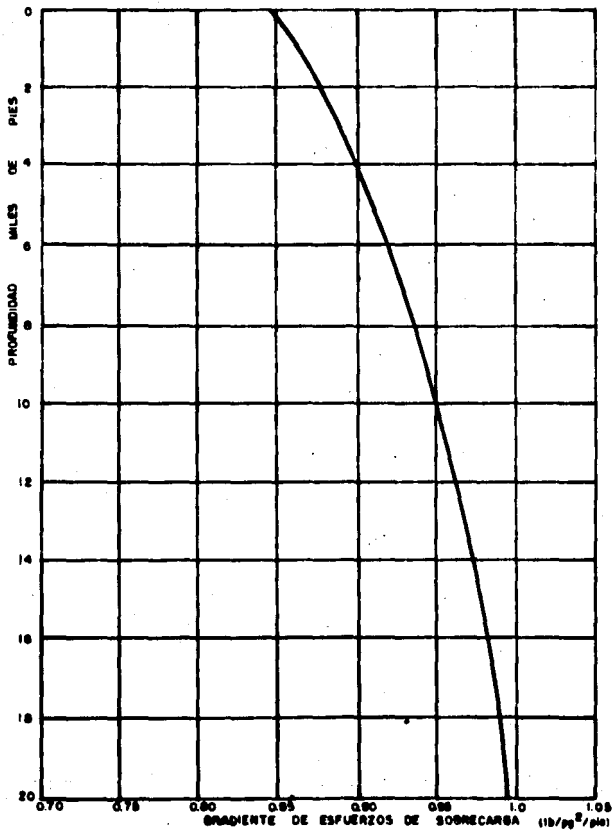


FIG. 4.10 GRADIENTE DE ESFUERZOS DE SOBRECARGA PARA FORMACIONES COMPACTADAS

a) Pozo exploratorio.

El criterio de selección del fluido de perforación de un pozo exploratorio dependerá básicamente de los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos de la zona geotérmica, ya que determinarán las posibles formaciones a perforar, la posible presión y temperatura existente en el yacimiento. En este tipo de pozo se debe de tener un extremo control de seguridad durante la perforación.

b) Pozo de Desarrollo.

Los pozos en desarrollo permiten el uso completo de las técnicas de perforación. Los sistemas de lodos experimentales u otros no probados aun, se usan una vez que se conoce la litología básica. Si se desea que los pozos de desarrollo se perforen en un mínimo de tiempo y con el menor costo posible, el programa de perforación debe de ser planeado cuidadosamente.

CAPITULO V

CONTROL DE SOLIDOS

5.1 Contaminación de los Fluidos de perforación.

A medida que transcurre el tiempo, las perforaciones se realizan cada vez más a mayores profundidades y en zonas que durante la perforación de los pozos se presentan problemas muy complejos, que en varias ocasiones se han tenido que suspender las operaciones parcial o totalmente por incapacidad de los fluidos de perforación.

Los factores que más afectan los lodos son las altas temperaturas, los contaminantes y los sólidos que se incorporan durante la perforación; y las propiedades que más se afectan son la viscosidad, densidad, gel y filtrado.

Al tener valores altos de las propiedades anteriores se observa una secuencia de problemas en las operaciones como son; alta resistencia al sacar la tubería, inducción a pérdidas por pistoneos, frecuentes pegaduras de tubería por presión diferencial daño a la formación, etc.

Lo anterior, trae como resultado pérdida de tiempo al estar realizando operaciones para controlar el pozo y consecuentemente el aumento de los costos por perforación.

5.1.1 Contaminación con cemento.

Siempre se debe de antesano, cuando se va a perforar cemento y al menos que el lodo haya sido tratado previamente o sea del

tipo tratado con calcio, que el retorno del lodo contaminado tendrá una alta viscosidad, fuerza de gelatinosidad, pérdida de agua y torta gruesa.

El cemento actúa como un agente floculante de las arcillas, aumenta la fuerza de gelatinosidad y daña las propiedades de filtración. El grado de la contaminación depende de la cantidad y condición del cemento. Si el cemento es duro y se perfora en recortes que se eliminan en la criba vibratoria, resultará menor la contaminación que cuando se perfora un tapón suave y tierno. Si el cemento se va a tratar con productos químicos, se obtienen mejores resultados tratándolo previamente para la contaminación.

Se debe prestar atención a lo siguiente, antes de iniciar el tratamiento :

- 1.- Cuando el cemento que se va a perforar es de poca cantidad y hay un exceso de lodo en el sistema, el contaminante de cemento en el retorno, puede desecharse cuando llega a la superficie.
- 2.- Algunas veces es posible bombear el lodo en el sistema a la reserva, perforar el cemento con agua y luego regresar el lodo sin contaminar.
- 3.- Algunas veces el lodo puede descartarse después de perforar el cemento y reponerse, ya sea con lodo de reserva o con lodo nuevo. En cada uno de estos procedimientos puede existir alguna contaminación residual que requiera un tratamiento menor.
- 4.- Después de que se ha colocado la tubería de ademe y no hay cemento que perforar, puede haber suficiente contaminación residual en la tubería de ademe para causar considerable desperdicio de tiempo del equipo, mientras se perfora y se colocan espacadores. El tratamiento para eliminar la contaminación, puede ser provechoso en esos casos.

5.- Cuando hay un tapón largo que perforar o cuando se van a colocar varios taponess y se van a perforar, el mejor procedimiento puede ser convertir a un lodo de cal durante el tiempo del primer cemento, por que el lodo de cal no se afecta con la contaminación del cemento.

6.- Con lodos ordinarios y cuando se va hacer agujero adicional, abajo del tubo de adese o cuando se va a perforar un tapón de cemento en agujero abierto, el manejo más económico de la contaminación de cemento puede ser tratada con productos químicos . El bicarbonato de sodio, pirofosfato ácido de sodio y quebracho, se usan comunente y la selección del que sea apropiado depende de la clase de lodo que se use y de la cantidad de cemento perforado.

El tratamiento previo de un lodo con cualquiera de estos tres productos químicos, se ejecutan en la misma forma general. La adición del producto químico en la presa de succión, se inicia unos minutos antes de perforar el tapón de cemento. Al llegar el lodo tratado a la barrena, se empieza la perforación del tapón y se continúa la adición del reactivo químico hasta que se haya perforado todo el tapón. La cantidad normal de reactivo químico requerido variará de 25 a 50 lb/pie³ del cemento que se va a perforar. Se pueden requerir cantidades más grandes, hasta 100 lb/pie³ de cemento, si el tapón de cemento es muy suave.

El bicarbonato de sodio es el agente más efectivo para el tratamiento de la contaminación del cemento en lodos que han tenido sólo un tratamiento menor. Con tratamiento previo, la cantidad de cemento que se va a perforar se deberá calcular en pies cúbicos, correr la tubería de perforación hasta cerca de la parte superior del tapón y tratar el lodo con 25 a 50 lbs. de bicarbonato de sodio por pie³ de cemento que haya de perforar.

Si el cemento ha fraguado y esta duro, esta cantidad por lo general dará suficiente tratamiento, pero si el cemento está

suave, se puede requerir bicarbonato adicional para dar un tratamiento total con hasta 10 lb/pie³ de cemento. Una cuidadosa revisión del retorno de lodos mientras se este perforando el cemento, será por supuesto, necesario y generalmente, el pH del lodo después de un tratamiento con buenos resultados deberá estar abajo de 9.0.

Si la cantidad de bicarbonato de sodio usado da por resultado demasiado adelgazamiento, se deberá agregar bentonita en pequeñas cantidades. Frecuentemente, después de perforar cemento, se desea un lodo mejorado y por esta razón, puede ser necesaria la adición de alguna bentonita. También, se debe tener cuidado para no sobretratar con bicarbonato ; ésto da por resultado altas fuerzas de gelatinosidad.

5.1.2 Contaminación con Yeso y Anhidrita

La contaminación con yeso (CaSO_4) sulfato de calcio y la anhidrita ($\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), se puede presentar durante la perforación, los síntomas que presenta el lodo con estos contaminantes son muy parecidos a los que se observan cuando la contaminación es por cemento; se eleva el filtrado, la viscosidad, la gel y el pH.

La diferencia que siempre se debe hacer para determinar el tipo de contaminación es la basada en el pH, cuando la contaminación es por cemento se observa que el pH, se eleva, y cuando la contaminación es por anhidrita o yeso el pH baja; la razón de este descenso se debe principalmente que el sulfato de calcio (CaSO_4), se disocia el calcio y el radical sulfato (CaSO_4) disocia -- Ca^{++} . SO_4^{-} . Los radicales de sulfato en presencia del agua se hidrolizan formando moléculas de H_2SO_4 ácido sulfúrico, el cual tiende a reducir la alcalinidad de nuestra solución, pretendiendo pasarla al rango de la acidez. Si se sospecha que el contaminante sea el yeso o la anhidrita se deben realizar pruebas que determinen la presencia del ión calcio y los sulfatos.

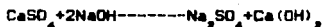
Cuando se esperan perforar grandes cantidades de yeso o anhi-

dríta, el mejor tratamiento es tener un lodo que tolere la contaminación por incorporación y que dicho contaminante, se incorpore al sistema sin producir ninguna reacción química; los lodos que aceptan dicha contaminación son los de yeso, cálcicos y surfactantes cálcicos.

Ahora si las cantidades de anhídrita o yeso que se van a perforar son pequeñas, el lodo se debe someter a tratamiento para precipitar los iones de calcio en solución, para que no alteren las propiedades de las arcillas.

5.1.2.1 Tratamiento con Sosa Caústica y un Dispersante Orgánico

Cuando se perforan grandes cantidades de yeso o anhídrita se puede permitir que el sulfato de calcio penetre al sistema y nosotros colaboramos para que se lleve a cabo la conversión del lodo. Para que las futuras cantidades de este material que se perfora no tenga un efecto adverso sobre las propiedades de flujo y las de filtración; de las siguientes formas se puede obtener lodo de yeso, cálcico o un surfactante cálcico, dependiendo de la cantidad de sosa con la que se trate el lodo. El pH de cada uno de los lodos anteriores es muy importante, la dispersión se regula con la cantidad de dispersante necesaria, la reacción que se produce al agregar sosa cáustica a un lodo es la siguiente:

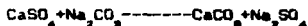


sulf. de calcio+sosa cáustica-----sulf. de sodio+cemento

Los lodos cálcicos formados requieren de grandes cantidades de sosa cáustica para mantener el pH, por tal motivo es preferible el uso del lodo de yeso, los cuales trabajan en un pH más bajo. Tanto los lodos cálcicos como los de yeso requieren de la adición de un reductor de filtrado (C.M.C. o almidón), la dosificación de dispersante debe ser permanente, se puede usar cualquier lignosulfonato o tanino.

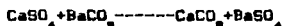
5.1.2.2 Tratamiento con Bicarbonato de Sodio (Soda Ash)

Cuando se perforan pequeñas cantidades de yeso y anhidrita se pueden tratar a base de fosfato y de precipitantes. El único problema es que los fosfatos no se pueden usar a grandes temperaturas. La soda Ash reacciona con el contaminante de la siguiente forma :



5.1.2.3 Tratamiento con Carbonato de Bario.

Este producto puede usarse en lodos que tienen un pH de 9.0 a 9.5, es conveniente usarlo para cantidades pequeñas de contaminantes en este rango de pH, el calcio y los sulfonatos se precipitan siguiendo esta reacción :



El lodo puede recibir un tratamiento previo a base de carbonato de bario, con el fin de que cuando se presente la contaminación las propiedades del lodo no varíen bruscamente. Si se van a perforar más de 1m^3 de anhidrita o yeso, el tratamiento a base de carbonato de Bario se vuelve incosteable.

Los tratamientos anteriores deben de acompañarse de un reductor de filtrado orgánico.

5.1.3 Contaminación con Sal.

La sal o cloruro de sodio (NaCl), que contamina un lodo, puede ser el resultado de perforar capas de sal, un domo salino o una arena con agua salada; algunas veces el agua salada del océano o de una bahía se usa para mezclar y como agua de repuesto. No hay un tratamiento para remover la sal de un lodo de perforación. El

único procedimiento con las contaminaciones serias de sal, es usar arcillas resistentes a la sal y almidón para mantener las propiedades de viscosidad y filtración.

Los lodos de agua salada son aquellos que contienen arriba de 10,000 p.p.m. de cloruro de sodio; los lodos de agua dulce generalmente, presentan buenas propiedades mientras no rebasen una salinidad como la anterior, una vez que se rebasa esta salinidad se tienen problemas con las propiedades de flujo y con el filtrado. Lo más recomendable, en el caso anterior es el uso de un lodo salado.

Flujo de agua salada.- La sal es un agente floculante muy poderoso y en cualquier pozo en el que la contaminación con sal pueda ser un problema, se harán pruebas frecuentes del lodo. El incremento de viscosidad, gelatinosidad, pérdida de agua y contenido de cloruros, son indicaciones de lodo contaminado con sal. Estos cambios en el lodo, pueden dar por resultado derrumbes o hundimientos de esquistos dentro del agujero que pueden pegar la sarta de perforación.

5.1.3.1 Lodos de agua salada y salobre.

En el agua salada y salobre siempre se encuentran sales de calcio y magnesio que tienden a disminuir el rendimiento de las arcillas (bentonita) que se usan en la preparación de los lodos de agua dulce.

Dichas aguas requieren concentraciones variadas de arcillas para obtener viscosidades, con las cuales se puedan trabajar básicamente. La cantidad de arcilla depende de la concentración de la sal en el lodo. En el mercado existen arcillas que son capaces de hidratarse con agua salada sin importarles que concentración tengan; estas arcillas se conocen como atapulquitas. Para obtener unos buenos rendimientos se hace una mezcla de bentonita y atapulquita, obteniéndose buenas propiedades de flujo pero el filtrado,

en las mayorías de las ocasiones es elevado, por lo que se requiere la presencia de un reductor del mismo (coloide orgánico).

La relación de bentonita, atapulgita puede ser 80/20, 70/30, 60/40 o aquellas que produzcan las mejores propiedades en el comportamiento del lodo.

5.1.4 Contaminación por incorporación de sólidos.

Los sólidos contenidos en el fluido de perforación afectan en gran medida sus propiedades, directamente de una manera negativa.

La figura 5.1 muestra el comportamiento de la velocidad de penetración, de barrenas y requerimientos diarios del equipo con respecto al contenido de sólidos en el fluido de perforación, como se observa en la figura un exceso de sólidos reduce la velocidad de penetración, acorta la vida de la barrena, aumenta los requerimientos diarios del equipo de perforación en el pozo. Además de causar incrementos en la viscosidad y densidad del lodo, aumenta la presión en las bombas, el consumo de combustible, aumenta el desgaste de todas las partes del equipo de rotación y circulación.

Todos estos efectos traen como consecuencia incrementos en los costos de tratamiento del lodo así como de los costos de perforación. Se observa en la figura 5.1 que estos efectos indicados son muy drásticos sobre el rango de 10 a 14% del contenido de sólidos, los requerimientos diarios del equipo se incrementan en un factor de 3. Esto es una mala indicación en los costos directos de construcción del agujero. Similarmente, si el 14% de sólidos fuera eliminado enteramente, la velocidad de perforación podría incrementarse por cerca de 400%, un promedio de 29% por cada por ciento de sólidos eliminados. Si en cualquier punto sobre la curva nosotros examinamos el efecto de eliminación de 1 volumen en por ciento de sólidos, el porcentaje ganado en la velocidad de perforación es un exceso de 10%.

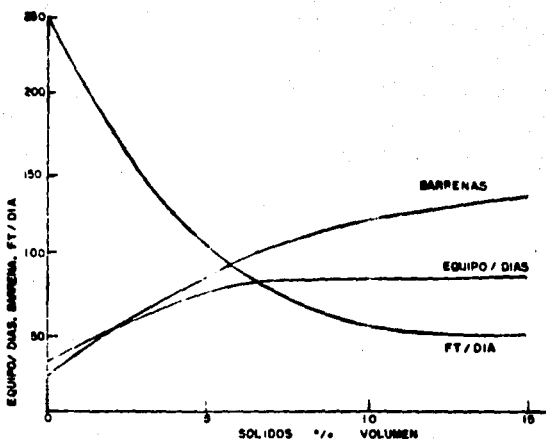


FIG. 5.1 EFECTO DEL CONTENIDO DE SOLIDOS SOBRE LA EFICIENCIA DE PERFORACION

- | | |
|---|--|
| 1 | LODO DE CAMPO (contenido de solidos 12%) |
| 2 | LODO DE CAMPO (6% solidos + polimeros) |
| 3 | LODO DE CAMPO (6% solidos + polimeros + cta) |

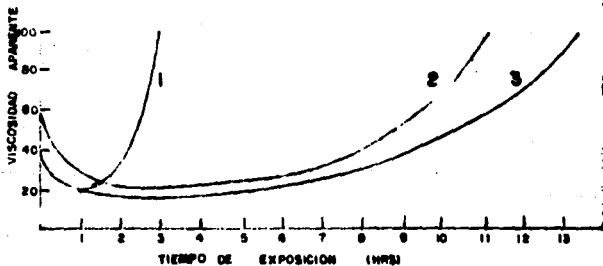


FIG. 5.2 EFECTO DE LOS SOLIDOS SOBRE LA VISCOSIDAD APARENTE DEL LODO

En resumen, la Figura 5.1 parece indicar que las condiciones de perforación para reducir el contenido de sólidos esta sobre un margen del 10% de sólidos; igual para un adecuado contenido de sólidos del 5 al 10% y para un muy excelente contenido de sólidos abajo del 5%, particularmente, con rocas de baja a media resistencia a la compresión.

Algunos perforadores estarían satisfechos con un contenido de sólidos de alrededor de 5% en fluidos de perforación no pesados. No obstante, los resultados citados arriba indican que ese 5% todavía está en el rango de la investigación para mejorar la eficiencia de perforación, debido al reducido contenido de sólidos.

Por ejemplo. Si se considera el impacto de reducir la densidad de un fluido de perforación, bajo condiciones favorables de 9.1 lb/gal (5.6% de sólidos) a 8.8 lb/gal (3.4% de sólidos) por medio de significativos mejoramientos en la eliminación mecánica de sólidos.

Datos de laboratorio y campo indican que esta reducción en el contenido de sólidos, mejoran todavía por mucho las velocidades de penetración del 10 a 50% y reduce el consumo de barrenas. Estos dos factores son los principales puntos de un cálculo del costo por pie de la perforación y para un 30% promedio de mejoramiento en la velocidad de penetración, podría esperarse de un 5 a 10% en la reducción del costo por pie de la perforación.

Por lo tanto, el control de sólidos es muy importante pues una alta concentración de éstos (más del 8%), reduce notoriamente la consistencia del lodo a temperaturas altas, aún cuando contengan estabilizadores de temperatura (Figura 5.2).

El procedimiento de control consiste en mantener los sólidos en un nivel bajo (menos de 6% en vol.) mediante floculación selectiva o mecánicamente usando cribas vibratorias, hidrociclones, centrifugas y limpiadores de lodo.

El problema principal para reducir los costos de perforación, puede ser la incapacidad por eliminar estos sólidos efectivamente, dado que los sólidos muy finos como las arcillas, son extremadamente perjudiciales en las velocidades de penetración.

En la práctica los sólidos de perforación pueden encontrarse de dos diferentes maneras:

1.-Sólidos agregados desde la superficie.

El tipo y cantidad de sólidos agregados al fluido de perforación desde la superficie en cantidades controladas son uno de los puntos más importantes en el control de un fluido de perforación, ya que de ellos dependerán todas las propiedades importantes tales como la densidad, viscosidad, pérdida de agua, etc. para poder alcanzar los objetivos de la perforación.

Entre los sólidos agregados al lodo se encuentran principalmente los " aditivos químicos " que con su naturaleza, propiedades viscosas y actividad iónica, facilitarán la tarea del equipo mecánico para remover sólidos y de este modo mejorar el control de sólidos perforados contenidos en el sistema de circulación.

Refiriéndose a los aditivos químicos tales como, polímeros de revestimiento, ayudan a preservar las partículas perforadas de la desintegración y por lo tanto mejoran la eficiencia de acarreo hacia la superficie de los sólidos perforados.

En ocasiones se utilizan también aditivos dispersantes, que en caso contrario al de preservar las partículas perforadas, retienen y dispersan los sólidos perforados creando sólidos finos que no podrán ser removidos por equipo mecánico, por gravedad o por disolución.

En cuanto a las propiedades viscosas, una alta viscosidad va a impedir la efectividad de la remoción de sólidos por medios me -

cánicos o químicos y por lo tanto también evitará el asentamiento de las misas.

La actividad iónica cuando es mantenida retardará la hidratación de los sólidos perforados que puedan ser activados con el fluido de perforación por lo que su remoción en la superficie será más efectiva.

2.-Sólidos agregados por la formación.

Son los sólidos generados por el trabajo de la barrena y retenidos en el lodo, éstos son indeseables ya que afectan adversamente las propiedades primarias del fluido y necesitan con mayor frecuencia el tratamiento en el sistema de perforación. La naturaleza de los sólidos perforados que deben retenerse en suspensión por un fluido de perforación pueden variar de partículas reactivas de bentonita a granos de arena inerte.

Algunos sólidos del lodo tienen más efectos sobre la perforación que otros. La Figura 5.3 muestra los efectos sobre la velocidad de penetración por tres materiales sólidos: barita, recortes perforados y producción moderada de arcillas. Las curvas a y b son de datos obtenidos por la Universidad de Oklahoma y la curva c fue obtenida de datos de la Mobil in West Texas, el cual incluyen 317 barrenas utilizadas en un campo. Esto refleja el efecto de perforación con varias combinaciones de salmuera y recortes perforados.

Los lodos referidos y las condiciones de operación representadas por las curvas en la Figura 5.3 son obviamente muy diferentes. Por lo tanto, sólo las pendientes relativas de estas curvas podrán ser comparadas. La concentración de sólidos, usualmente para las tres curvas es de 4 a 12% en volumen. Los siguientes efectos sobre la velocidad de perforación son evidentes.

M a t e r i a l

Decrementos en las velocidades de perforación.
% promedio / % de sólidos.

Barita(b).....	2.6
Recortes perforados(c).....	4.8
Producción moderada de arcilla(a).....	6.7

Comparando la barita, un volumen igual de recortes perforados causa aproximadamente dos veces el decremento en la velocidad de perforación, además, la barita (sobre un volumen base) es dos veces tan efectiva como los sólidos perforados en incremento del peso de lodo. Por lo tanto, por usar barita en lugar de recortes perforados para realizar un lodo pesado dado, alrededor de 3/4 partes de el efecto adverso sobre las velocidades de penetración pueden ser evitados. La selección aquí es obvia pero lograrlo es difícil algunas veces.

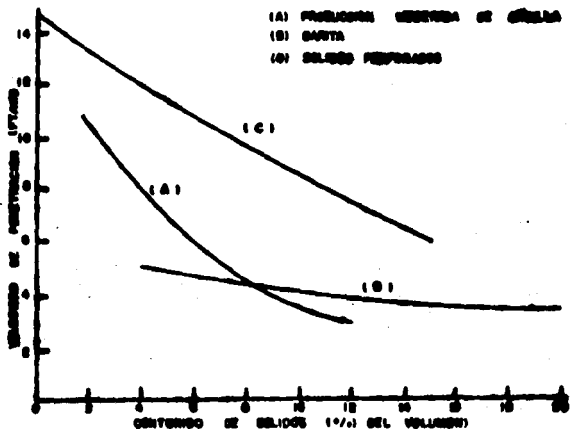


FIG. 6.3 EFECTO DE DIFERENTES SÓLIDOS SOBRE LA VELOCIDAD DE PERFORACION

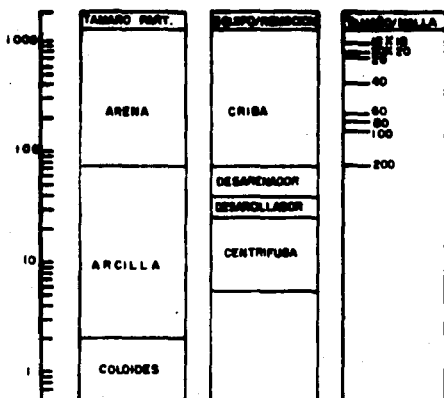


FIG.5.4 FIGURA QUE MUESTRA EL TAMAÑO DE PARTICULAS QUE CADA EQUIPO DE CONTROL DE SOLIDOS DE TIPO MECANICO PUEDE ELIMINAR

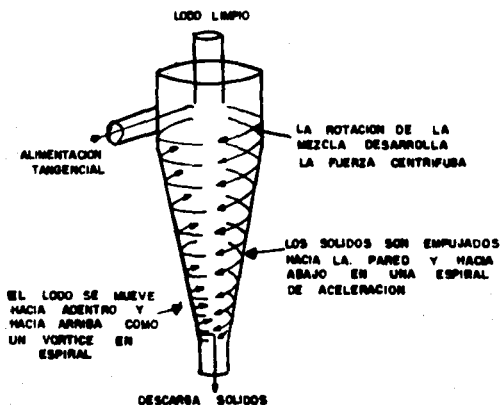


FIG.5.5 ESQUEMA DE OPERACION DE UN HIDROCICLON

5.2 Sistema de Control de Sólidos

Una de las principales funciones del equipo de control de sólidos es la de eliminar los sólidos perforados transportados por el lodo durante la circulación, el equipo comúnmente usado para la eliminación de sólidos es el siguiente:

CRIBA VIBRATORIA. Su uso común consiste de una criba afianzada a una estructura pulsativa inclinada. El lodo que retorna pasa sobre la criba y los sólidos de perforación grandes son separados del líquido y sólidos finos. Esta unidad elimina todos los sólidos grandes por medio de las aberturas de la malla de la criba. Las aberturas son tan pequeñas como las de una malla 200 (U.S. estándar), hasta las aberturas más grandes como las de una malla 10. La Figura 5.4 ilustra el tamaño de las partículas removidas (micrones) por la criba vibratoria y otros mecanismos de separación.

SEPARADOR DE ARENA. Es un tanque de reposo colocado abajo de la criba vibratoria que permite el asentamiento de las partículas sólidas en la corriente de lodo; éste eliminará partículas de todos los rangos de tamaño, la eficiencia es gobernada sólo por el tiempo de residencia. El tanque es de volumen pequeño, normalmente 50 barriles, éste factor y un alto gasto de circulación de lodo permiten tiempo para la separación de sólo partículas grandes (más grandes de 74 micrones). El propósito del tanque de almacenamiento es el de separar sólidos de perforación grandes si la criba vibratoria falla u ocurren desviaciones.

DESARENADOR. Son hidrociclones dimensionados para eliminar sólidos en el rango API de arenas de 74 micrones. El dimensionamiento del cono varía de 6 a 12 pg, éste eliminará la mayor parte de partículas más grandes de 40 micrones y un porcentaje menor de pequeñas partículas.

Un esquema del hidrociclón es mostrado en la Figura 5.5. El lodo que ha sido procesado a través de la criba vibratoria y del

separador de arena es alimentado tangencialmente dentro de una cámara cónica. Una alta fuerza centrífuga es desarrollada y la lechada girará a la parte inferior del cono hacia el ápice. Esta fuerza causa que los sólidos de perforación se muevan hacia las paredes y caigan a través del ápice. La columna de fluido y las partículas pequeñas giran hacia arriba en el ápice y son descargadas a través de la cima del hidrociclón.

DESARCILLADOR. Son básicamente hidrociclones, que emplean conos pequeños de 2 a 4 pg para aplicar más fuerza centrífuga a el lodo y proporcionar una separación de sólidos de perforación finos y líquido. Estos eliminan la mayor parte de sólidos mayores de 25 micrones y un menor porcentaje de diámetros pequeños. La mayor parte de las operaciones de perforación emplean conos de 4 pg, aunque conos pequeños podrán ser considerados, si la mayoría de los sólidos de perforación están en un rango de 10 a 4 micrones y éstos, no tienen peligro de sobrecargar y obturar dichas unidades pequeñas. En el desarenador y desarcillador un corte fino puede ser obtenido por regulación o ajuste del ápice de cada hidrociclón para incrementar el volumen de descarga.

CENTRIFUGA. Es usada para eliminar partículas de 5 a 10 micrones. El lodo entra al centro del tazón de la centrifuga. El tazón gira creando una fuerza centrífuga alta que causa que los sólidos sean propulsados hacia afuera del tazón, mientras que el líquido y coloides remanentes cerca del centro, son descargados a través del orificio de derrame. Los sólidos son acarreados hacia la descarga por una zona que gira en la misma dirección como el tazón pero a una velocidad ligeramente baja. El nivel del líquido gobierna el tiempo de residencia y la eficiencia de separación y puede ser controlado ajustando el orificio de descarga. Esta tiene algunos grados de flexibilidad, cuando la velocidad de la centrifuga lo especifica.

5.2.1 Análisis del Control de Sólidos.

Los parámetros necesarios para determinar el diseño del sistema de separación de sólidos son: Determinar la cantidad de sólidos generados durante la perforación, el tipo de roca y la distribución del tamaño de partícula.

5.2.1.1 Cantidad de Sólidos Generados Durante la Perforación.

1.- Determinación del contenido de arena.

El objetivo de esta prueba es prevenir el efecto abrasivo por un alto contenido de arena en el lodo. Las partes del equipo más expuestas a la abrasión por la arena del lodo son las bombas, la tubería de perforación y las barrenas. Un contenido alto de arena también origina enjarres gruesos y permeables, o pueden asentarse en el pozo cuando se interrumpe la circulación, interfiriendo en la operación correcta de las herramientas de perforación.

El contenido de arena se determina por elutriación, por asentamiento o por análisis de malla. El más común de estos métodos en perforación, por su simplicidad es el de análisis de mallas. El volumen de la arena, incluyendo los espacios entre las partículas, se mide y se expresa como porcentaje en volumen.

El equipo para la determinación del porcentaje de arena consiste en un cedazo de malla 200 (Figura 5.6), un embudo que ajusta en el soporte del cedazo y un recipiente de vidrio donde se miden el volumen del lodo, el volumen de agua con que se diluye el lodo y el % en volumen de arena. El rango de porcentaje más común es de 0 a 20% .

procedimiento:

- a) Agregue el lodo (de una muestra tomada después de la criba), hasta la marca correspondiente; después agua hasta la siguiente marca. Cubra la boca del tubo y agite vigorosamente.
- b) Vacíe la muestra de lodo diluido a través del cedazo, lavando

todo residuo de lodo en el tubo con agua clara. Lave la arena retenida en el cedazo hasta eliminar las trazas de lodo.

c) Coloque el embudo sobre el cedazo e inviertalo lentamente, con agua haga caer la arena del cedazo al tubo. Espere que se asiente la arena.

d) En las graduaciones del tubo lea el porcentaje de arena en volumen y repórtelo, indicando, si es necesario, de que lugar se tomó la muestra de lodo.

2.- Determinación del contenido de líquidos y sólidos en el lodo por medio de la retorta.

Esta determinación nos permite conocer los porcentajes, en volumen y en peso, de líquidos y sólidos en un lodo. El contenido de sólidos nos da una idea del tratamiento a seguir para acondicionar un lodo, para mejorar sus propiedades reológicas y además tienen relación directa con la velocidad de perforación. Al aumentar el contenido de sólidos disminuye la velocidad de penetración, debido principalmente a que los sólidos aumentan la viscosidad.

El aparato es propiamente una retorta de destilación (Figura 5.7). Una cantidad medida de lodo se coloca en un recipiente metálico; se calienta hasta evaporar los componentes líquidos del lodo; los vapores pasan a través de un empaque de lana de acero que evita el paso de sólidos, se condensan y se recogen en una probeta graduada. Los volúmenes de los líquidos se leen directamente en la probeta, y los sólidos, en suspensión y disueltos, se determinan por diferencia.

A continuación se da un procedimiento general que puede variar ligeramente según la construcción de la retorta.

Procedimiento:

a) Coloque una cantidad medida de lodo en la retorta. Generalmente el depósito de lodo de las retortas tiene la forma de picnómetros

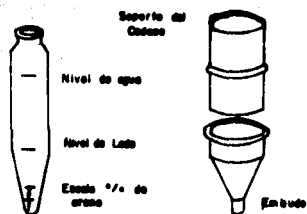


FIG. 5.6 EQUIPO PARA LA DETERMINACION DEL % DE ARENA

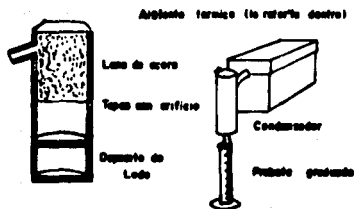


FIG. 5.7 EQUIPO UTILIZADO EN EL METODO DE LA RETORTA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE SOLIDOS

y retiene un volumen de lodo exactamente igual en todas las determinaciones. Si es necesario, pase antes la muestra por un cedazo de malla 10. Empaque la parte superior de la retorta con lana de acero fina.

b) Arree la retorta y colóquela en su soporte aislador. Ponga una probeta graduada en la descarga del condensador (el tamaño de la probeta es especial para cada marca de retorta). Agregue una gota de agente humectante a la probeta.

c) Conecte la corriente a la resistencia eléctrica hasta que termine la destilación. Los tiempos de destilación son también variables según la marca de la retorta. En ningún caso debe calentarse la retorta al rojo oscuro.

d) De los volúmenes de líquidos recolectados en la probeta y el volumen de la muestra original de lodo, se calculan los porcentajes en volumen de líquidos y sólidos.

3.-Determinación por absorción del azul de metileno.

Este método es una nueva herramienta analítica para el control del lodo. Cuando la determinación se efectúa en una muestra con un solo tipo de arcilla, los resultados son muy exactos, pero cuando existen mezclas, el método ofrece una idea razonable del mineral arcilloso predominante y la pureza de la muestra. La experiencia ha demostrado que la prueba del azul de metileno, puede proporcionar datos útiles cuando las determinaciones se efectúan en un lodo con determinada densidad promedio de los sólidos y determinado porcentaje en volumen.

La capacidad de intercambio catiónico, se calcula dividiendo los mililitros de azul de metileno (1 ml = 0.01 meq) entre los mililitros de lodo utilizados en la prueba.

$$\text{Capacidad de intercambio} = \frac{\text{ml azul de metileno}}{\text{ml de lodo}}$$

Los lodos de perforación, frecuentemente contienen otras sustancias además de la bentonita que absorben azul de metileno, por lo cual se efectúa un tratamiento con peróxido de hidrógeno para eliminar su efecto. La cantidad de bentonita se puede calcular en la siguiente forma:

$$(\text{Kg} / \text{m}^3) \text{ Bentonita} = 14.25 \times \text{Capacidad de Intercambio.}$$

4.- Determinación a partir de formulas y nomogramas.

La cantidad de sólidos pueden ser determinados calculando primeramente el gasto de sólidos obtenidos durante la perforación, ecuación 5.1.

$$QSI = (0.851) (ROP) (Dh^2) \quad (5.1)$$

Donde:

QSI = Gasto de entrada de sólidos, (lb/hr)

ROP = Velocidad de penetración, (pie/hr)

Dh = Diámetro del agujero, (pg)

La ecuación 5.1 asume una gravedad específica de los sólidos de perforación de 2.5. Multiplicando QSI por las horas de perforación en un día dado, nos proporcionará la cantidad de sólidos perforados.

La Figura 5.8 muestra gráficamente QSI para varios diámetros de agujero y velocidades de penetración.

Para manejar la eliminación de sólidos en la superficie, se debe conocer la cantidad de sólidos que son generados como producto de la perforación.

La elaboración de nomogramas se ha desarrollado para usarse en el campo, de modo que proporcione una medición competente del total de sólidos.

CURVAS BASADAS EN LA EC.1

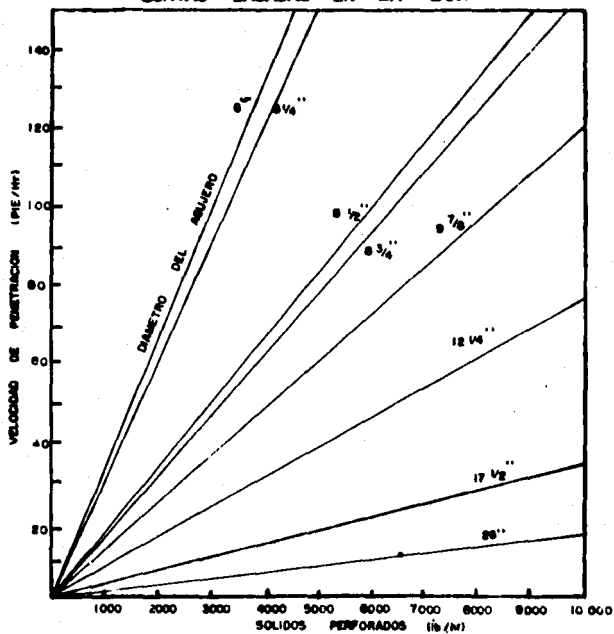


FIG. 5.8 PRODUCCION DE SOLIDOS PARA DIFERENTES DIAMETROS DE AGUJEROS EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE PENETRACION

El nomograma de la Figura 5.9 proporciona un medio de medición de las libras de sólidos que son generados por minuto Vs la velocidad de penetración y las de sólidos que están siendo sumadas por galón de lodo según el gasto de flujo.

En el ejemplo de la Figura 5.9 muestra que 18 libras de sólidos están siendo generados cada minuto cuando se tiene un ritmo de penetración de 8 pies/hr, en un agujero de 12 1/4 pg. Los sólidos perforados sumados son 0.04 lbs/gal a la densidad del lodo cuando se bombea un gasto de 500 gpm.

Si la velocidad de penetración fuera de 50 pies/hr se producirían más de 100 lbs de sólidos por minuto y 0.02 lbs/gal más de peso al lodo con el mismo gasto de flujo.

Si estos sólidos no están siendo eliminados eficientemente en la superficie, el contenido de sólidos en el lodo puede incrementarse y la densidad del lodo puede subir. Esto es por que posiblemente los sólidos sean muy finos, por lo que el equipo mecánico de eliminación de sólidos no puede eliminar efectivamente los sólidos y ellos son recirculados, interrumpiendo dentro de las partículas más pequeñas.

Por supuesto, el nomograma viene a ser un tanto discutible si se presentan derrumbes en el agujero. Estos cálculos son solamente una indicación relativa de los sólidos existentes dentro del sistema de lodo para una velocidad de penetración dada.

Otros dos nomogramas fueron elaborados para determinar las libras de sólidos en un galón de lechada (Figs. 5.10 y 5.11).

La figura 5.10 cubre gastos de flujo para 100 gpm y es usada para corrientes de bajo gasto de flujo, parecida a la corriente de descarga de un hidrociclón.

DENSIDAD RELATIVA DE SOLIDOS = 2.65

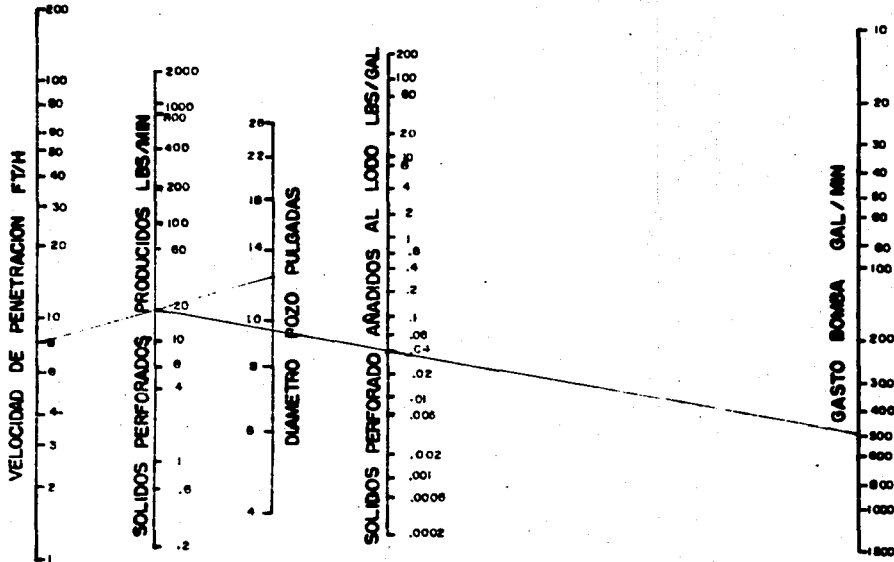


FIG. 5.9 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR SOLIDOS GENERADOS DURANTE LA PERFORACION

La Figura 5.11 cubre gastos de flujo para 1500 gpa y es usada para las corrientes de alto gasto de flujo tal como en la alimentación y retorno de un hidrociclón.

Un análisis de la categoría de sólidos del lodo en el equipo de separación de sólidos. Puede indicar el tamaño predominante de partículas que hay, así como la proporción de sólidos que está eliminando el equipo. Si estas partículas no están siendo eliminadas eficientemente, el equipo apropiado tiene que ser seleccionado para eliminar las partículas de tamaño secuencialmente predominante, empezando con las partículas grandes.

Para evaluar la eficiencia de un sistema de eliminación, los sólidos que están siendo eliminados deben ser igualados a los sólidos que están siendo producidos. Al bajar la eficiencia, la dilución es más requerida para mantener una densidad dada del lodo y los costos de mantenimiento del lodo pueden también incrementarse en proporción directa a la baja eficiencia de la eliminación de sólidos.

5.2.1.2 Tipo de Roca.

Una vez que la cantidad de sólidos de perforación fue determinada, el tipo de roca debe ser establecido. Esto se puede conocer por medio de experiencias de perforaciones anteriores, reportes geológicos, sísmicos, etc. Conociendo los estratos de roca que pueden ser encontrados, permitirá incorporar dispositivos de seguridad en el sistema de eliminación, ayudando a eliminar dificultades en operaciones posteriores.

5.2.1.3 Distribución del Tamaño de Partículas.

La distribución del tamaño de los sólidos de perforación pueden ser determinados usando unas pruebas de campo y técnicas de cribado. Los resultados obtenidos pueden ser marcados en representaciones gráficas de distribución de tamaño de partículas.

DENSIDAD RELATIVA DE SOLIDOS = 2.65

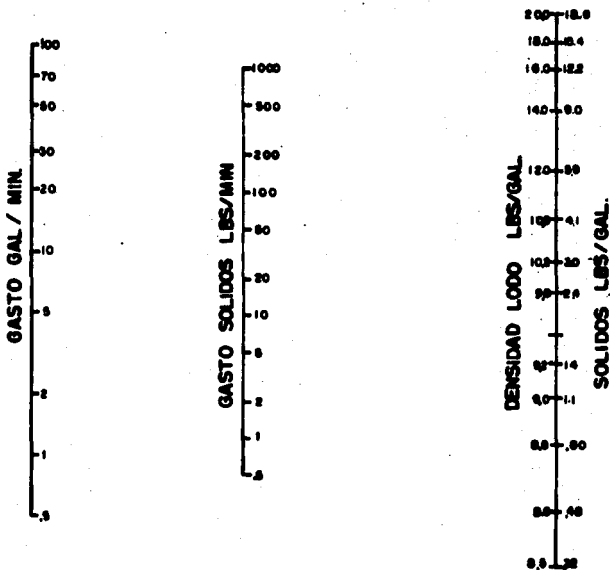


FIG. 8.10 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE SOLIDOS Y EL GASTO DE SOLIDOS

DENSIDAD RELATIVA DE SOLIDOS = 2.35

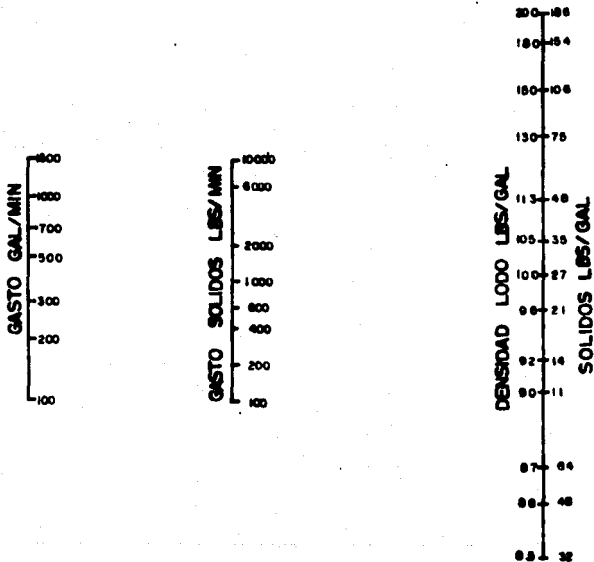


FIG. 6.11 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR CONTENIDO DE SOLIDOS Y GASTO DE SOLIDOS

La reciente clasificación del tamaño de partículas del API es de uso limitado. En término de porcentaje en volumen, ellos definen como arenas las partículas más grandes de 74 micrones y como arcillas aquellas menores de 74 micrones.

Esta clasificación proviene de una prueba abrasiva, por que está basada sobre la suposición de que todos los sólidos mayores que 74 micrones son arenas abrasivas; sin embargo, esta suposición no es necesariamente válida, algunas de las partículas mayores de 74 micrones no son abrasivas y algunas, que se encuentran en la categoría de las arcillas son abrasivas. Otra manera imprevista es necesaria para la clasificación de sólidos, dado que los sólidos en un sistema de eliminación pueden ser desde menos de 1 micron hasta más de 3000 micrones.

La Tabla 5.1 es una clasificación propuesta del tamaño de partícula en un sistema pesado. La misma clasificación del tamaño de partícula puede ser utilizada al considerar dos gravedades específicas 4.2 para la barita y 2.65 para los residuos de sólidos.

La clasificación sugerida trata con el tamaño más bien que con el tipo de sólidos, puesto que éste es el criterio más importante.

TABLA 5.1 Clasificación del tamaño de partícula para un Sistema de lodo.

Categoría de tamaño de Partícula	Tamaño (micrones)	Malla estándar No. U.S
Grueso	> 2000	< 10
Intermedio	250 - 2000	60 - 10
Medio	74 - 250	200 - 60
Fino	44 - 74	325 - 200
Ultrafina	2 - 44	sustracción
Coloidal	< 2	(NBT)

La Tabla 5.2 compara varios tamaños de partículas comunes, se muestran como pequeños sólidos de lodo ultrafinos y coloidales estan en relación con otras partículas comunes.

TABLA 5.2 Tamaños de algunas partículas comunes.

1 micron = 1/25400 pg.

1 micron = 0.001 mm.

Sólidos del lodo	tamaño en micrones (μ)
arena API	> 74
arcilla API	< 74
Sólidos finos	44 - 74
Sólidos Ultrafinos	2 - 44
Coloidales	< 2

1.- Método de campo para determinar el tamaño de las partículas.

Antes de determinar una clasificación para el tamaño de los sólidos es necesario desarrollar un procedimiento para medir el tamaño de la partícula en el campo. Existen métodos de laboratorio los cuales son complicados y no necesariamente exactos, que requieren demasiado tiempo para obtener resultados. Se propone un método de campo para medir el tamaño de sólidos en las operaciones. Es simple, fácil de usar y tendería a mejorar la eficiencia de eliminación de sólidos. Sin embargo, solamente la distribución relativa del porcentaje en peso de las partículas es necesaria para llevar a cabo la eliminación sistemática y eficiente de estas partículas.

Para seleccionar el equipo apropiado de eliminación de sólidos es necesario analizar la distribución del tamaño de sólidos en el lodo a un tiempo dado.

El retorno de la corriente desde cada sección del equipo puede todavía ser analizada para determinar que residuos de sólidos y procesamiento, se requiere en la siguiente etapa de eliminación de sólidos. Para usar este procedimiento, la información puede ser obtenida sobre un pozo ya perforado para seleccionar el equipo de eliminación adecuado.

El procedimiento desarrollado por indagación de la cantidad de cada tamaño de partícula abajo de 44 micrones, usando criba vibratoria está bosquejado en el apéndice A.

Las series de cribas usadas en el análisis fueron seleccionadas después de varias pruebas a muestras de lodos, para asegurar que no existiera un taponamiento.

En el procedimiento bosquejado del apéndice A, del paso 1 al paso 6 se proporcionará una correcta determinación del total de

sólidos dependiendo de que tan representativa sea la muestra.

Del paso 7 al paso 13 se puede obtener el peso de sólidos en cada criba o en cada categoría de sólidos abajo de 44 micrones en la muestra de lodo. El contenido de sólidos más pequeños que 44 micrones es obtenido por los pasos 14 y 15.

La cantidad de partículas más pequeñas que 2 micrones puede ser obtenida por una prueba de azul de metileno y la categoría ultrafina puede ser determinada por sustracción.

La prueba de azul de metileno (API RP 13B sección 9.32), mide la capacidad de cambio del catión de los sólidos perforados en el lodo, el cual es básicamente una medición del contenido equivalente de bentonita de un lodo.

Es conocido que estas partículas son mucho menores que 2 micrones en tamaño, así la prueba de azul de metileno da una determinación cuantitativa de este tamaño de partícula.

La prueba no es correcta completamente, puesto que, algunas partículas más grandes pueden exhibir una limitada capacidad de intercambio catiónico y algunas partículas abajo de 2 micrones no pueden tener una capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, esto es suficientemente correcto para mediciones de campo.

La Tabla 5.3 es un análisis de vía húmeda de un ejemplo del flujo de descarga de un desarenador, que ilustra como puede ser obtenida la distribución del tamaño de la partícula. Es importante secar los sólidos para después pesarlos, porque el peso del agua absorbida produce error en la medición, ya que además, la película absorbida de agua atrae las partículas.

El agua absorbida puede causar un error tan grande como el 40% si los sólidos son pequeños y por lo tanto, expuestos a un área de superficie grande. En el ejemplo dado en la Tabla 5.3 se

tiene un 27% de agua absorbida en peso.

TABLA 5.3 Ejemplo del análisis del tamaño de partícula de una corriente en un desarenador de 8 pg.

Categoría	Malla Estándar No U.S	Micrones (plus)	Peso Mojado (gr)	Peso Seco (gr)	Base Seca (%)
Gruesa	6	3360	0.85	0	0
	10	2000	8.00	2.50	0.35
Intermedio	12	1680	9.60	1.35	0.20
	25	710	93.50	66.50	9.85
	40	420	76.30	53.80	7.98
	60	250	194.90	145.00	21.47
Medio	100	149	262.40	198.10	29.35
	200	74	148.70	112.90	16.75
Fina	325	44	69.40	50.90	7.55
Subtotal (44 a 3360+)			863.65	631.05	93.50
Ultrafina (por substracción) 2 a 44				13.03	1.92
coloidal (por MBT) (-)2				31.00	4.58
Muestra de entrada (por peso)				675.08	100.00
Entrada(675.08)-salida(44.03)=(Sobre cribas; 631.05)					
Cálculos del porcentaje de agua.					
Total de la muestra mojada= 863.65 gm					
Total de la muestra seca = 631.05 gm					
(% de agua por peso)= $\frac{863.65 - 631.05}{863.65} \times 100 = 27\%$					

Cuando el porcentaje en peso de cada categoría de tamaño de partícula ha sido determinado, se puede aprovechar para graficar la distribución y obtener un perfil del tamaño de las partículas. La representación más satisfactoria es la desarrollada por Darling (Figura 5.12), en la cual representa una gráfica semilog de $(\Delta P / \Delta \bar{D}) \times 2.3 \bar{D}$ Vs \bar{D} del análisis mostrado en la tabla 5.3.

Donde:

ΔP = Cambio de porcentaje acumulado.

$\Delta \bar{D}$ = Cambio en el tamaño de la partícula.

\bar{D} = El promedio de tamaño de un micrón de las partículas en una categoría dada.

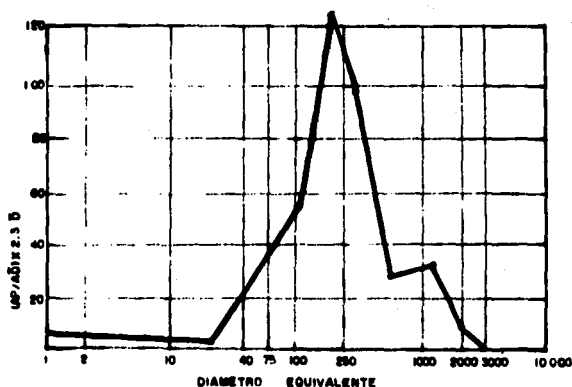


FIG. 5.12 GRAFICA DE DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE PARTICULA

Una vez que el diseño de ingeniería es familiar con la cantidad de sólidos de perforación generados, el tipo de roca perforada y la distribución del tamaño de partículas, la conveniente selección del equipo de control de sólidos puede comenzar.

5.2.2 Evaluación y Selección de Cribas Vibratorias.

La criba vibratoria es dimensionada para la selección de la malla apropiada para una aplicación dada. El rango de tamaño de las cribas van desde malla 10 (U.S.) hasta malla pequeña 200.

La doble cubierta de los vibradores permiten el tratamiento de lodo en dos etapas, primero a través de una criba gruesa y luego a través de una criba fina. Usualmente, dos cribas vibratorias son instaladas en paralelo para proporcionar una unidad de servicio continuo y una unidad sustituta, si la primera falla o llega a ser sobrecargada. La segunda unidad será usada o cuando la primera no pueda manejar el gasto de lodo, entonces la corriente podrá ser desviada fácil y rápidamente para sustituir la unidad minimizando la pérdida de lodo. Es prudente establecer un factor de seguridad cuando se seleccionan los tamaños de las cribas para prevenir taponamiento si la viscosidad del lodo se incrementa.

Aunque el dimensionamiento de la malla puede ser predeterminado para un cierto grado, por conocimiento o anticipación de la distribución del tamaño de partícula, la eficiencia de campo es el mejor criterio de diseño. Un buen método para el dimensionamiento conveniente de la criba es probar la eficacia excelente de la malla sobre un vibrador, cuando suceda un taponamiento o derrame del lodo.

La experiencia indica que las cribas eliminarán una tercera parte de los sólidos generados durante una perforación lenta.

Esta pieza del equipo cuando es seleccionada adecuadamente, es capaz de realizar una separación positiva de sólidos perforados, de un tamaño aproximado de 100 a 175 micrones con cribas finas (malla cuadrada de 80 a 150, Grado Market). Datos de laboratorio y campo indican que cantidades significantes de recortes en un rango de 50 a 100 micrones, son separados también cuando son usadas cribas finas; esto es debido a la adhesión de las partículas más grandes.

Así la criba vibratoria de malla fina es esencial como un mecanismo de separación primaria de sólidos, eliminando un significativo porcentaje de recortes recién perforados; antes de que se conviertan en sólidos extremadamente finos reduciendo la carga de material grueso en las bombas centrífugas e hidrociclones, mejorando la eficiencia y durabilidad de éstos.

Debido a que los modelos de diseño no analíticos son comúnmente utilizados, vibradores con muchas variaciones en los parámetros de diseño están en el mercado. Es decir, con cubiertas de ángulos variable (desde 5° hacia arriba hasta 30° hacia abajo), y con la aceleración normal desde 1.1 hasta 8.3 g. Los modelos de vibración de las cribas varían en lineal, elíptico y circular; y velocidades rotatorias del vibrador variando de 900 a 3600 rpm.

Supuestamente, las cribas que tienen una gran área de abertura deberían de transmitir más fluido que las cribas con pequeña área de abertura. Siendo que en realidad la conductancia de la criba determina una mucho mejor medición de su habilidad para transmitir dicho fluido.

Una criba transmitirá considerablemente más fluido para un mismo tamaño de abertura, cuando de la misma manera la conductancia sea mayor.

La mayoría de las cribas de malla cuadrada aplicadas en los fluidos de perforación son de grado market (MG).

La malla rectangular (oblonga), es frecuentemente usada en lugar de las cribas de malla cuadrada para superar los problemas de taponamiento encontrados cuando partículas llamadas "casi" del mismo tamaño taponan las aberturas de la tela de malla cuadrada. Estas cribas son también empleadas para incrementar la relación de área de aberturas de una criba de malla cuadrada teniendo un tamaño de aberturas igual.

La criba layered está compuesta de una tela fina de malla cuadrada en la parte superior que está en contacto con otra del mismo tipo pero ligeramente más gruesa y una tercera (pesada y muy gruesa) localizada en el fondo como soporte. La criba layered ha sido resistente al taponamiento por partículas de casi el mismo tamaño de aberturas y también tiene una conductancia alta de fluido.

Sin embargo, debido a que están hechas de un alambre muy fino, éstas deben de ser cuidadosamente apoyadas y tensionadas sobre un vibrador para resistir la fatiga y el desgaste. La relación de aberturas de la malla no proporciona una buena medición de habilidad de la criba para transmitir el fluido. Por último se tiene la criba de tela cuadrada sencilla con tornillos tensores "tensile bolting cloth" (TBC).

Una criba es especificada por el número de aberturas o número de alambres por pulgada de la malla.

En un esfuerzo por estandarizar esta especificación, el API emitió una recomendación práctica tentativa. Esta recomendación especifica la malla en ambas direcciones, siguiéndola en similitud por el tamaño de aberturas en micrones y el porcentaje de aberturas de área. Por ejemplo, en la especificación API :

30 x 30 (541 x 541 , 40.8).

Es llamada para una criba de malla cuadrada el cual tiene 30 aberturas/pg, en cada dirección, con un tamaño de aberturas de 541

micrones y una área de abertura de 40.8%. Se podría entonces determinar de la Tabla 5.4, que el diámetro de los alambres en ambas direcciones para esta tela es de 12 mils (0.012 pg).

Como un segundo ejemplo, considerando las especificaciones API, para 70 x 30 (178 x 660, 40.3), esta se especifica como una criba de malla rectangular, la cual tiene 70 aberturas/pg en una dirección y 30 aberturas/pg en la otra. El tamaño de abertura es de 178 micrones en la dirección de la malla 70 y 660 micrones en la dirección de la malla 30, con una relación de área de abertura de 40.3. De la Tabla 5.4 podemos obtener que el diámetro del alambre es de 7.5 mils.

En este ejemplo los diámetros del alambre son los mismos en ambas direcciones, pero en general ellos pueden ser diferentes. En particular, se ha sugerido que la conductancia del fluido en la criba es un parametro mejor que el área de apertura, en la determinación de la capacidad de flujo. Además, las asignaciones del A.P.I. no manejan cribas no estándar como las cribas layered.

En la Tabla 5.4 se presentan especificaciones para diferentes tipos de cribas, en donde se comparan las conductancias.

Por ejemplo para la criba 60x60 se tiene una conductancia de 3.65 kd/mm, lo que indica una capacidad de flujo más alta que la criba 80x80, que tiene una conductancia de 2.91 kd/mm. Una comparación similar puede ser hecha entre otras cribas, por ejemplo, entre la TBC 94x94 y la TBC 120x120 mostrando que la conductancia de fluido es un mejor indicador de lo que sucede.

La razón de que la conductancia de fluido sea un parámetro más sensitivo a la transmisibilidad de flujo que el área de abertura, es porque esta basada o relacionada con el área de superficie del alambre en contacto con el fluido.

La Tabla 5.4 muestra que para un mismo tamaño de abertura (80

x80), una TBC tiene sustancialmente una conductancia más alta que la de grado market. Para aberturas que son mas pequeña (indicando capacidad de separación más fina) que la tela MG o TBC, las cribas layered tiene una conductancia igualmente mas alta, es decir que pueden manejar más fluido. sin embargo, ni la tela layered ni la TBC son tan fuertes como la MG y su uso puede dictar cambios de diseño en un vibrador para soportarlos y apoyarlos adecuadamente.

5.2.2.1 Eficiencia de separación de solidos de la criba.

La eficiencia de separación de la criba se obtiene a partir de un balance de materia :

$$W_f = W_u + W_o \quad (5.7)$$

donde :

W_f = Peso de solidos del gasto de flujo de la alimentación.

W_o = Peso de sólidos del gasto de flujo separados por la criba.

W_u = Peso de solidos del gasto de flujo que pasa a través de la criba.

Una segunda ecuación que relaciona a R como la proporción del peso de las partículas para cualquier rango de tamaño " S " (por ejemplo, entre 100 y 200 micrones) se define como :

$$R_f W_f = R_u W_u + R_o W_o \quad (5.8)$$

donde :

R_f = % en peso de la alimentación para el rango del tamaño de interés.

R_u = % en peso de los solidos separados por la criba (mayores) en el rango de tamaño de interés.

R_o = % en peso de los solidos a través de la criba (menores)

en el rango de interés.

Resolviendo las ecuaciones 5.7 y 5.8 simultaneamente y despejando W_o se tiene :

$$\frac{W_o}{W_f} = \frac{R_f - R_u}{R_o - R_u} \quad (5.9)$$

Estableciendo que la eficiencia de separación (E_s) es :

$$E_s = \% \text{ separado} = \frac{R_o W_o}{R_f W_f} \times 100 \quad (5.10)$$

Esto expresa que, la eficiencia de separación en un rango de tamaño dado " S " es el porcentaje de sólidos eliminados de la alimentación sobre la criba.

Sustituyendo W_o/W_f en la ecuación 5.10 obtenemos :

$$E_s = 100 \times \frac{R_o (R_f - R_u)}{R_f (R_o - R_u)} \quad (5.11)$$

Considerando un número de tamaños diferentes de partículas, se puede graficar E_s contra el tamaño para obtener la curva o grado de eficiencia. La ecuación 5.11 puede ser aplicada a cualquier incremento de tamaño de partícula de interés.

El tamaño medio de la partícula o punto de corte medio (D_{50}), es el tamaño de partícula para el cual el grado de eficiencia es 50%. Esto significa, que el punto de corte D_{50} es el tamaño de partícula, para el cual el 50% de las partículas son separadas de la alimentación y el otro 50% no son separadas.

La Figura 5.13 representa una curva de eficiencia para la criba 60x60 (234 x 234, 30.5) grado market. Las barras cortas horizontales trazadas sobre la curva de separación de las cribas, indican los rangos de tamaño para los correspondientes valores de E_s .

TABLA 5.4 CARACTERISTICAS DE LA CRISIS

TIPO DE CRISIS DATA	ABERTURA		DIAMETRO ALAMBRE (mm)	AREA DE ABERTURA (mm ²)	CONDUCTANZA	PUNTO DE LABORACION MICRONS	DESGRADE COMPLETO MICRONS
CUAD. MC							
9*9	97	2,454	28	61.2	112.75	-	-
10*10	75	1,905	25	50.3	75.50	-	-
12*12	60	1,524	20	51.8	67.00	-	-
14*14	51	1,265	20	51.0	44.25	-	-
16*16	44.5	1,113	18	50.7	37	-	-
18*18	37.6	935	18	45.9	26.29	-	-
20*20	33	838	17	43.6	21.45	-	-
30*30	21.3	541	12	40.8	12.67	-	-
40*40	15	381	10	38.0	7.45	280	-
50*50	11	279	9.0	30.3	4.38	330	-
60*60	9.2	234	7.5	30.5	3.65	30	-
80*80	7	178	5.5	31.4	2.91	160	-
100*100	5.5	140	4.5	30.3	2.19	115	-
120*120	4.6	117	3.7	30.9	1.89	-	-
150*150	4.1	105	2.6	37.4	2.11	-	-
200*200	2.9	74	2.1	33.6	1.32	-	-
250*250	2.4	63	1.6	36.0	1.19	-	-
325*325	1.7	44	1.4	30.0	0.65	-	-
CUAD. TBC							
54*54	14.5	368	4.0	61.5	17.67	-	-
80*80	8.8	224	3.7	59.6	7.04	-	-
94*94	7.14	181	3.5	45.0	4.68	-	-
120*120	5.73	146	2.6	47.3	4.25	-	-
165*165	4.16	106	1.9	47.1	3.06	-	-
RECTANGULAR							
20*8	30/93	752/2362	20/32	45.7	36.72	-	-
30*20	18/35	485/889	15	39.1	13.99	-	-
35*12	12.6/67	320/1700	16	42.0	15.39	400	-
40*36	17.8/15	452/381	10	40.5	8.86	-	-
40*30	15/28.8	381/592	10	42.5	11.58	-	-
40*20	12/36	310/910	14	36.8	9.95	350	-
50*40	11.5/16.5	292/419	8.5	38.3	7.38	-	-
60*40	7.7/18	200/406	9.0	31.1	4.48	120	-
60*24	7.7/33	200/830	9.0	41.5	3.42	330	-
70*30	7/26	178/660	7.5	40.3	7.16	210	-
80*40	5.5/18	140/460	7.0	35.6	4.53	175	-
LAYERED							
38	11.5	292	N/A	43.7	18.82	340	-
44	10	254	N/A	44.9	16.26	-	-
50	8.8	223	N/A	42.9	13.18	290	235
68	7.5	191	N/A	41.0	10.77	-	-
70	6.2	157	N/A	39.1	8.21	180	165
84	5.1	131	N/A	38.6	6.57	-	-
100	4.3	109	N/A	37.6	5.3	145	110
130	3.3	84	N/A	37.0	4.28	-	92
160	2.7	68	N/A	37.3	3.11	-	-
180	2.4	61	N/A	38.4	2.82	-	78
220	2	50	N/A	36.9	2.18	-	-

Recalcando que E_s representa una eficiencia sobre un rango de tamaños, por ejemplo, en la tabla 5.5 se muestran los tamaños de las cribas de prueba con sus correspondientes tamaños de abertura. Se puede considerar que las separaciones y los tamaños medios de partículas dados son los más finos que pueden ser separados bajo las condiciones para el cual el dato fue tomado.

TABLA 5.5 Especificaciones de las cribas de prueba U.S.

Criba de prueba No	Tamaño de abertura (Micrones)
20	841
25	707
30	595
35	500
40	410
45	354
50	297
60	250
70	210
80	177
100	149
120	125
140	105
170	88
200	74
230	63
270	53
325	44
400	37

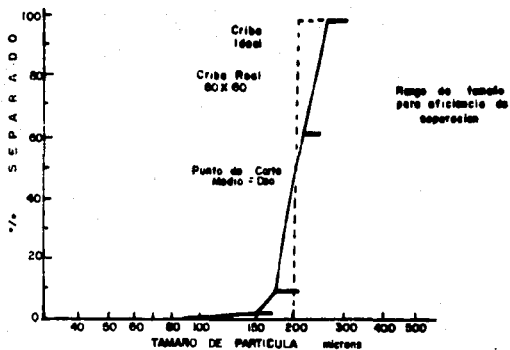


FIG. 5.13 CURVA DE EFICIENCIA PARA LA CRIBA 60 X 60

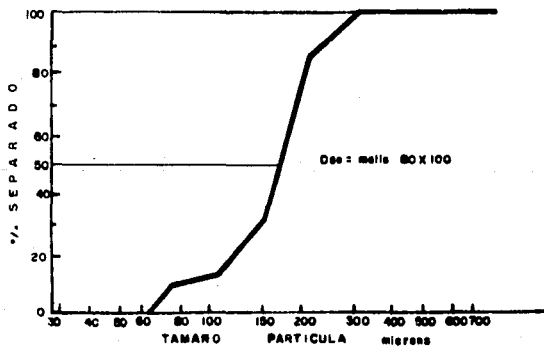


FIG. 5.14 PORCENTAJE SEPARADO POR CRIBA LAYERED 70 CONTRA EL TAMAÑO DE PARTICULA

Un ejemplo típico de resultados obtenidos para la criba layered malla 70 es mostrado en la tabla 5.6. El porcentaje separado contra el tamaño de malla es presentado en la Figura 5.14 el cual el punto de corte medio se observa que está entre las mallas 80 y 100 (177 y 144 micrones). Este procedimiento puede ser aplicado para dos diferentes vibradores y comparar los resultados para definir cual este eliminando la mayor parte de sólidos.

Tabla 5.6 Cálculo del porcentaje separado para una criba layered malla 70.

U.S. número	Porcentaje retenido			% separado por una malla dada
	Alimentación	menores	Mayores	
16	0	0.0	0.2	100.0%
20	0.1	0.0	0.2	100.0%
30	0.3	0.0	0.9	100.0%
40	3.8	0.0	7.8	100.0%
50	21.2	0.0	36.5	100.0%
70	33.7	15.5	40.0	88.2%
100	20.4	34.5	10.6	30.7%
140	9.7	22.0	2.3	14.8%
200	6.7	17.2	1.0	9.7%
230	2.9	1.2	0.3	0.0%

En la Figura 5.15, se muestra el efecto dramático de la viscosidad plástica del lodo sobre el gasto de flujo para una criba de malla 100 sobre dos vibradores uno layered (A) y uno convencional GM (B) para 10 muestras de lodo. De esta figura se deduce que la viscosidad plástica del lodo de perforación fue establecida

como un factor principal que afecta el gasto de flujo de la criba.

Los resultados (Fig. 5.15), indican un decremento exponencial en el gasto de flujo para un incremento en la viscosidad plástica; lo más notable son los drásticos incrementos de los gastos de flujo en la criba para viscosidades plásticas abajo de 10 cp. Lo anterior, sugiere una temporal adición de agua a la línea de flujo después del recorrido, para prevenir la pérdida de lodo en la malla. Estos resultados indican que deben ser considerados, tanto límites de viscosidad como el de los sólidos de una criba.

En la Figura 5.15 también se puede observar que el flujo en una criba puede variar desde varios cientos de gpm hasta menos de 10 gpm para un rango de viscosidades de 1 a 70 cp. Cabe mencionar que la densidad para este rango varía solamente pocas décimas de lb/gal. De este modo, se tiene que la viscosidad comparada con la densidad es un factor decisivo de influencia en el límite del flujo en la criba.

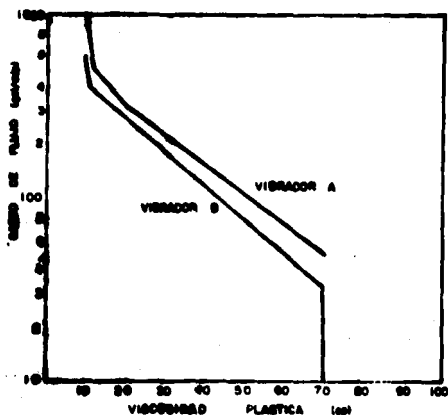


FIG. 5.15 EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE EL GASTO DE FLUJO

5.2.2.2 Selección de Cribas Vibratoria.

Un trabajo analítico importante sobre separación de sólidos en fluidos de perforación fue primeramente publicado por Hoberock, quien presentó un modelo analítico para determinar el gasto de flujo en la criba en ausencia de sólidos en el fluido de perforación. De este modelo, la capacidad de flujo de fluido sólo (sin sólidos) Q_f , el cual establece el límite máximo para la capacidad de flujo, puede ser estimada de las características de la criba y de la vibración dinámica. Las curvas mostradas en las figuras 5.16, 5.17 y 5.10, determinan esa capacidad límite para cribas vibratorias con diferentes características de fluido y vibraciones dinámicas dadas. Esta capacidad usualmente se incrementa, con la disminución de la viscosidad plástica (PV), incremento del área de cribado, la aceleración normal y el ángulo ascendente de la cubierta.

Obviamente, la capacidad límite del fluido manejado para un vibrador es determinado por el contenido de sólidos y líquidos en el fluido de perforación de retorno. De hecho, la capacidad actual de flujo de los vibradores es considerablemente menor, que la capacidad de flujo para un fluido solo debido a la presencia de sólidos.

Cuando un fluido de perforación con sólidos perforados fluye a través de la criba, tres efectos reducen la capacidad de flujo.

PRIMERO. Las partículas considerablemente más grandes que los poros de la criba tienden a cubrir la abertura, reduciendo el área de cribado para el fluido y el paso de partículas pequeñas. Este efecto, usualmente, puede ser reducido si tales sólidos son acarreados fuera de la criba con una alta velocidad de acarreo. Sin embargo, es posible que cambiando un parámetro de la partícula se pueda incrementar la velocidad de acarreo de los sólidos, aunque se disminuya el flujo de fluidos a través de la criba.

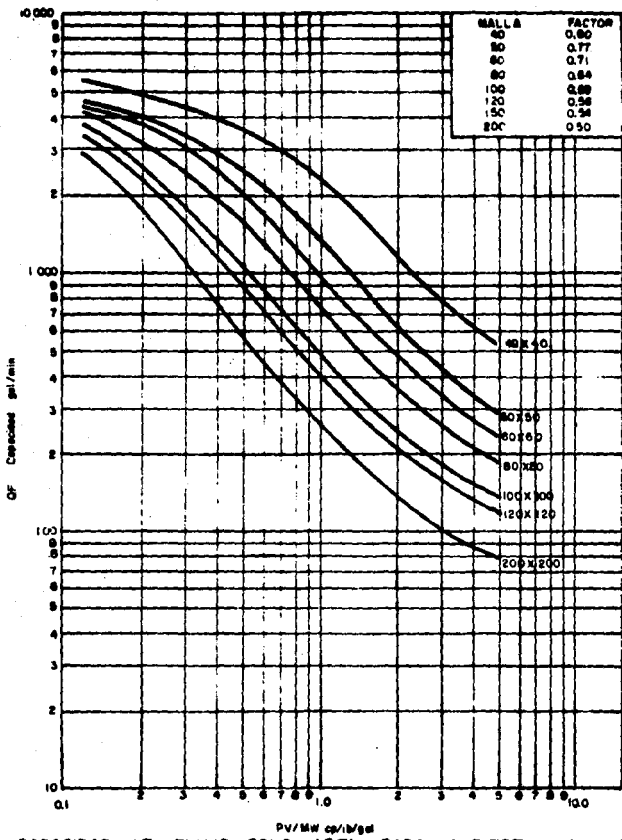


FIG.5.16 CAPACIDAD DE FLUJO SOLO (QF) PARA CUBIERTA PLANA (0°) CRIBA VIBRATORIA (4 PIES ANCHO X 5 PIES LARGO, 4.52 ACELERACION NORMAL Y 67 % ALCANCE DE FLUIDO)

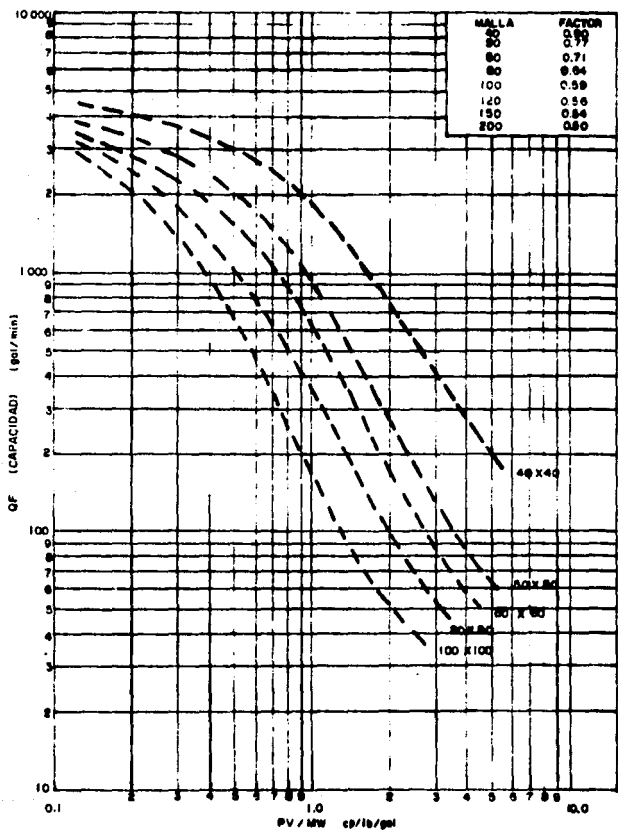


FIG. 5.17 CAPACIDAD DE FLUIDO SOLO (QF) PARA CUBIERTA INCLINADA (15°) CRIBA VIBRATORIA

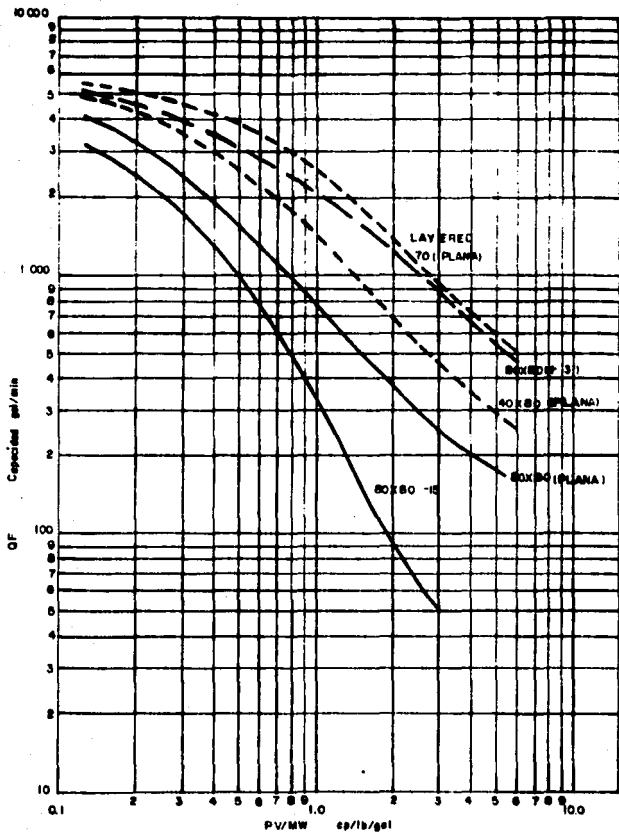


FIG. 5.18 CAPACIDAD DE FLUIDO SOLO (QF) PARA VARIAS CRIBAS Y ANGULOS, CON CORTE MEDIO DE APROXIMADAMENTE 170 μ

SEGUNDO. El efecto de taponamiento ocurre, cuando las partículas ligeramente más grandes que los poros se encajan permanentemente en las aberturas.

TERCERO. Las partículas ligeramente más pequeñas que los poros de la criba, pasan a través de las aberturas con dificultad a causa de la mala orientación o velocidad, con respecto a la abertura dada de la criba.

Las Figuras 5.16 a 5.18 muestran curvas de capacidad para fluido sin sólidos para vibradores (cribas de 20 pies², cubierta sencilla o doble, aceleración normal de 4.5 g, 67% de alcance de la criba) con cubierta plana y de pendiente inclinada hacia abajo (-15°), como una función de varias cribas de malla cuadrada grado market y una relación (PV/MW) viscosidad plástica entre densidad. En la Tabla 5.4 se presentan las características importantes de las cribas usadas en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.

Es conveniente señalar que las Figuras 5.16 a 5.18 muestran las capacidades para fluidos que no contienen sólidos. Con el objeto de mejorar el método y la aplicación de estas curvas de eficiencia, se propone un método empírico que usa datos fácilmente obtenibles del pozo (velocidad de penetración, diámetro, gasto de circulación); así como el factor de taponamiento de la criba, determinado empíricamente con datos de laboratorio y campo para calcular un factor de reducción para las curvas de capacidad de fluido únicamente.

Los resultados obtenidos concuerdan razonablemente con los datos de campo. Sin embargo, el método está limitado en el manejo de todas las aplicaciones de cribamiento y es significativo para aplicarse sólo a condiciones promedio de cribamiento, excluyendo específicamente, el cribamiento de lodo negro gelatinoso y arenas de casi el mismo tamaño de la abertura.

La ecuación para calcular la capacidad del vibrador con fluido cargado con sólidos (Q_s), basada en la capacidad del vibrador con fluido únicamente (Q_f) esta dada por :

$$P = 0.678 \frac{ROP \times Dh^2}{Q} \quad (5.2)$$

Donde:

P = % en volumen (no fracción) de sólidos recién perforados en el espacio anular.

ROP = Velocidad de penetración, (pie/hr)

Dh = Diámetro del agujero, (pg)

Q = Gasto actual de circulación del equipo, (gpa)

y por :

$$Q_s = \frac{Fc}{1 + P} Q_f \quad (5.3)$$

Donde :

Q_s = Gasto de fluido con sólidos, (gpa)

Q_f = Gasto de fluido sin sólidos, (gpa)

Fc = Factor de taponamiento empirico de la malla.

Para ilustrar el uso de las Figuras 5.16 y 5.17 así como de las ecuaciones 5.2 y 5.3, compare la eficiencia de la criba con cubierta inclinada (-15°) hacia abajo (Figura 5.17) con la criba de cubierta plana (Figura 5.16).

Las siguientes condiciones son asumidas:

Perforación de un pozo de 8.75 pg.

Gasto de circulación del equipo : 325 gpa.

Velocidad de penetración : 15 pies/ hr.

Densidad del lodo : 9.0 lb/gal.

Viscosidad plástica : 9.0 cps.

Criba designada : malla 80 (80 x 80 Grado Market)

Primeramente, se calcula P de la siguiente manera:

$$P = 0.0678 ((RDP \times Dh^2)/Q)$$

$$P = 0.678 ((15 \times 8.75^2)/325)$$

$$P = 0.24\%$$

A partir de las Figuras 5.16 y 5.17, $F_c = 0.64$ para la criba grado market 80 x 80 y sustituyendo P y F_c en la ecuación 5.3 se tiene que:

$$Q_s = (0.64 / (1 + 0.24))Q_f$$

$$Q_s = 0.52 \times Q_f \quad (5.4)$$

De la Figura 5.17, para la criba con cubierta inclinada (-15°) hacia abajo, observamos que para una relación PV/MW de 9.0/9.0 ó 1.0 y una criba 80 x 80, $Q_f = 330$ gpm. Por la ecuación 5.4, la capacidad para este vibrador con fluido cargado con sólidos Q_s es:

$$Q_s = 0.52 \times 330$$

$$Q_s = 172 \text{ gpm} \quad \text{cubierta inclinada } (-15^\circ) \text{ hacia abajo.}$$

El Q_f para un vibrador de cubierta plana, con criba de malla 80 x 80 y PV/MW = 1, es aproximadamente de 750 gpm (Figura 5.16). La capacidad para este vibrador con flujo cargado de sólidos Q_s es:

$$Q_s = 0.52 \times 750$$

$$Q_s = 390 \text{ gpm} \quad \text{cubierta plana.}$$

Para las condiciones establecidas, la capacidad del vibrador de cubierta plana es dos veces más que la del vibrador con cubier-

ta inclinada (-15°) hacia abajo, de hecho es el adecuado para la tarea en mano.

Solamente dos vibradores designados de cubierta inclinada hacia abajo, podrían acomodarse marginalmente al gasto de circulación del equipo bajo estas condiciones. De este modo, bajo tales condiciones se pueden establecer, de la Figura 5.16 por ensaye y error las cribas más finas que podrían estar funcionando en el vibrador de cubierta inclinada hacia abajo. Asumiendo, que la criba más fina posible es la malla 50 x 50 grado market, F_c es 0.77 (de la Tabla de la Figura 5.16).

Entonces:

$$Q_s = (0.77 / (1 + 0.24)) Q_f$$

$$Q_s = 0.62 \times Q_f$$

De la Figura 5.8, el Q_f obtenido es aproximadamente de 870 gpm. La capacidad para este vibrador con fluido cargado de sólidos Q_s , es entonces:

$$Q_s = 0.62 \times 870$$

$$Q_s = 540 \text{ gpm}$$

Esto es, un exceso de la capacidad requerida de 325 gpm. Se podría pensar que fuera posible que la criba de malla 60 x 60 cumpliera con esta capacidad.

Para la malla 60 x 60, $F_c = 0.71$;

$$Q_s = (0.71 / (1 + 0.24)) Q_f$$

$$Q_s = 0.57 \times Q_f$$

De la Figura 5.16 se puede observar que Q_f está cerca de 600 gpm, y por lo tanto sustituyendo :

$$Q_s = 0.57 \times 600$$

$$Q_s = 342 \text{ gpm.}$$

Esta capacidad es sólo marginalmente adecuada para las condiciones establecidas. Si esto viene necesariamente a incrementar el gasto de circulación del equipo o si la relación (PV / MW) pudiera incrementarse solamente un poco, la pérdida del lodo sobre el extremo del vibrador puede seguramente resultar con la criba de malla 60 x 60.

En la práctica, el vibrador con cubierta inclinada hacia abajo puede estar limitado para cribas de malla 50 x 50 bajo tales condiciones.

Resumiendo este ejemplo, en el vibrador de cubierta plana bajo las condiciones establecidas funcionarán cribas de malla 80 x 80, mientras que el vibrador con cubierta inclinada hacia abajo puede funcionar solamente con cribas de malla 50 x 50.

Posteriormente un segundo modelo analítico fue desarrollado por Hoberock, en el cual la capacidad de flujo de fluidos (Q_s) puede ser relacionada con Q_f en términos del factor de carga de sólidos r . Este representa el efecto de sólidos de tamaño grande y de F_c , que representa el efecto de partículas de tamaño crítico o casi crítico definidas como partículas clasificadas en tamaño, desde 25% más pequeñas hasta 50% más grandes, con respecto a la abertura del poro en la criba.

La expresión (ver apéndice B) que relaciona Q_s con Q_f es la siguiente :

$$Q_s = \frac{F_c}{1 + r} Q_f \quad (5.5)$$

donde :

$$r = 26.18 \times 10^{-6} (\delta F u dh^2 / b h \bar{v}) \quad (5.6)$$

δ ($0 < \delta < 1$) = Radio de permeabilidad de la criba para la permeabilidad de una capa de estrato.

F ($0 < F < 1$) = Fracción de sólidos mas grandes que las aberturas de la criba.

u = Promedio de la velocidad de penetración, (pie/hr(m/nr))

dh = Promedio del diametro del agujero, (pg (cm))

b = Ancho de la criba vibratoria, (pg (cm))

n = Espesor de la tela de la criba, (pg (cm))

\bar{v} = Promedio de la velocidad de los sólidos acarreados, (pg/seg (cm/seg)),

y donde 26.18×10^{-6} llega a ser 21.81×10^{-8} cuando es expresado en unidades del Sistema Metrico. Podemos ver de esta expresion que incrementando la velocidad de los sólidos acarreados decrece r y se aumenta la capacidad actual Qs del vibrador.

Suponiendo que se tienen 3 cribas vibratorias planas vibrando circularmente, grado market de malla 80 x 80 asumiendo los siguientes datos:

Aceleración Normal = 4.5 g

Alcance de fluido sobre las cribas = 67%

Largo de la criba = 5 pies

Ancho de la criba = 4 pies

Espesor de la tela de la criba = 0.011 pg

Las condiciones existentes en el pozo son las siguientes :

Densidad del lodo (MW) = 10 lb/gal

Viscosidad plástica (VP) = 15 cp

Diametro del agujero (dh) = 12 1/4 pg

Velocidad de acarreo de los sólidos (\bar{v}) = 3 pg/seg

Velocidad de penetración (u) = 20 pies/hora

El primer paso es determinar la relación (PV/MW), entonces obtenemos $15/10 = 1.5$. Entrando con 1.5 a la Figura (5.18) se obtiene $Q_f = 510$ para cada criba o bien 1530 para las tres cribas, el factor de taponamiento para esta criba es $F_c = 0.64$ y obtiene de la Tabla mostrada en la Figura 5.16.

Asumiendo $\delta = 1$ y una distribución del tamaño de partícula " gruesa " en la línea de flujo con un tamaño medio de partícula para sólidos de 200 micrones. Para esta abertura de criba de 178 micrones, si nosotros asumimos la distribución del tamaño de la partícula con una desviación estándar de 3, se tiene que F es 0.53 para una criba grado market de malla 80 x 80.

Sustituyendo en la ecuación 5.6 se tiene que :

$$r = 26.18 \times 10^{-6} (\delta F u d h^2 / b h \bar{v}),$$

como tenemos tres cribas entonces, $b = 3 \times 48 = 144$ pg

$$r = 26.18 \times 10^{-6} ((1)(0.53)(20)(2.25)^2 / (144)(0.011)(3))$$

$$r = 26.18 \times 10^{-6} (1590.663/4.752)$$

$$r = 26.18 \times 10^{-6} (334.735)$$

$$r = 0.876$$

Sustituyendo en la ecuación 5.5 se obtiene:

$$Q_s = \frac{F_c}{1 + r} Q_f$$

$$Q_s = \frac{0.64}{1.876} Q_f$$

$Q_s = 0.341(1530) = 522$ gpm, para la capacidad de fluido con sólidos de las tres cribas.

Si la velocidad de acarreo de los sólidos puede ser incrementada de 3 a 6 pg/seg, para aumentar o mejorar la dinámica de acarreo, la capacidad de flujo llega a ser:

$$r = 26.18 \times 10^{-6} (167.368)$$

$$r = 0.438, \text{ entonces}$$

$$Q_s = \frac{0.64}{1.438} Q_f$$

$Q_s = 0.455 (1530) = 681$ gpm, que es un incremento del 30%, lo cual proporciona suficiente margen para mejorar la perforación del abujero.

El trabajo de Hooperock demuestra que la capacidad de flujo de cualquier criba es una función de un gran número de variables, específicamente, de las propiedades reológicas del fluido; tipo, cantidad y distribución del tamaño de los sólidos perforados; cálculos y combinaciones de mallas de cribas; patrones de frecuencia de vibración y aceleración en cada punto a lo largo de la criba; ángulo de criba con respecto a la horizontal y altura de la criba por encima de la presa de fluido.

Maximizando la capacidad de manejo de fluido hay un cambio entre el manejo de sólidos separados fuera de la criba y el procesamiento de limpieza del fluido por medio de la criba. Por ejemplo, si tenemos una inclinación de la criba hacia abajo para mejorar el acarreo de sólidos, correrá más fluido hacia afuera de la criba y los sólidos descargados estarán mojados. La inclinación de la criba hacia arriba (+) para ahorrar fluido puede disminuir la velocidad de acarreo, pero si la inclinación hacia arriba es bastante, los sólidos pueden incrementarse sobre la criba taponando sus aberturas.

Estimando otro camino, la criba vibratoria tiene límites de capacidad determinados por las porciones de sólidos y líquido de el fluido de perforación. A pesar de los trabajos efectuados sobre el acarreo de sólidos y sobre el flujo de fluidos a través de la criba, no es utilizable un modelo matemático compresible que pueda predecir las capacidades de las cribas vibratorias para un contenido arbitrario de sólidos en un fluido de perforación específico.

5.2.3 Evaluación y Selección del Hidrociclón.

Normalmente los hidrociclones (desarenadores y desarcilladores), son la siguiente etapa de la eliminación primaria de sólidos, después de que la criba ha eliminado el material grueso (mayor de 100 a 175 micrones para un dimensionamiento adecuado de la instalación de la criba). El desarenador y desarcillador instalados y operados adecuadamente eliminan frecuentemente los componentes finos de los sólidos.

Generalmente, un desarenador con conos de 8 a 12 pg eliminan efectivamente todo el material mayor de 70 micrones y cerca del 50% para materiales mayores de 40 a 50 micrones. Mientras que los desarcilladores para casi todas las aplicaciones practicas con conos de 4 a 6 pg eliminan efectivamente todo el material mayor de 40 micrones y cerca del 50 % para materiales de 15 a 20 micrones.

Así para una viscosidad y densidad de lodo baja se debe de visualizar un proceso de dos etapas de eliminación, con el cual dicho fluido es practicamente limpiado de todos los sólidos perforados mayores de 40 micrones y parte de los sólidos perforados entre 20 y 40 micrones, el proceso es descrito en la IADC Mud Equipment Manual (Handbook No 6) And Drilling Practices Manual by Moore.

La distribución de las instalaciones con un concepto erróneo de la capacidad, tamaño de los hidrociclones y de las bombas con -

trifugas, es por lo general un problema en el dimensionamiento de dichas instalaciones.

Un concepto erróneo concierne a aquellos hidrociclones que pueden parecer estar tirando demasiado lodo hacia afuera. En efecto, esto es debido a que esencialmente están diseñados para hacer lo con una importante diferencia, el lodo que es lanzado hacia afuera, tiene un contenido mucho más alto de sólidos de sólidos que el lodo de la alimentación.

Para ilustrar este concepto se consideran 10 conos de 4 pg, el descarcillador esta descargando 6.0 gpm con una densidad de 10 lb/gal en el flujo de fondo hacia la presa de reserva; la descarga por hora de sólidos sería :

$$6 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ bl}}{42 \text{ gal}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{113 \text{ lb (sól)}}{\text{bl}} = 966 \text{ lb/hr.}$$

En un periodo de 24 horas, 205 barriles de corriente de fondo del descarcillador fueron bombeados conteniendo 23200 lbs de sólidos. Si en la alimentación se tiene un lodo con densidad de 9.1 lbs/gal, el cual contiene 52 lb/bl de sólidos de baja densidad cerca de 450 barriles de lodo pueden estar descargando para llevar a efecto la misma eliminación neta de sólidos. las ventajas del descarcillamiento de este lodo son obvias.

Otro concepto erróneo gira alrededor de que son deseables flujos de fondo más pesados a gastos de carga más lentos. Ciertamente, a corrientes de fondo más pesados el contenido de sólidos es más grande. pero desafortunadamente, el ajuste o arreglo del ápice del hidrociclón para producir flujos de fondo más pesados produce una reducción del gasto total del flujo de fondo. Si se desea reajustar al descarcillador del ejemplo anterior, tal que el flujo de fondo y de descarga sea de 11.5 lb/gal y 2 gal/min, respectivamente. Entonces la descarga por hora de sólidos será de :

$$2 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ bl}}{42 \text{ gal}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{215 \text{ lb (sól)}}{\text{bl}} = 614 \text{ lb/hr}$$

Aunque el volumen de descarga diario del desarcillador puede ser reducido de 200 a 70 bis, el total de sólidos descargados por día puede ser reducidos a un 37% ; 8500 lbs de sólidos perforados tendrían que ser eliminados por algunos otros medios menos eficientes, probablemente descargando y por dilución completa de lodos.

El primer paso para evaluar una instalación de un hidrociclón es verificar la capacidad del equipo. La evaluación de la capacidad del hidrociclón se resume en los siguientes pasos :

- 1.- Contar el número de conos.
- 2.- Determinar el tamaño del cono (4,5,8,10,12 pg).
- 3.- Determinar la capacidad para cada tamaño de cono.
- 4.- Multiplicar el número de conos por la capacidad por cono para llegar a la capacidad del equipo.
- 5.- Compare la capacidad requerida.

El paso 1 no debe de ser problema. El paso 2 es más o menos difícil pero con algún ingenio se puede determinar el tamaño del cono muy fácilmente. Basicamente, el tamaño medio del cono se aproxima con el diámetro interior del cono en este punto externo.

Los tamaños típicos de conos son 4,5,6,8 y 12 pg. Estas dimensiones nominales, no necesariamente son la dimensión real o verdadera. El tamaño del cono puede ser determinado por inspección y por consulta del manual del fabricante.

El tamaño del cono puede ser determinado por medición del cono reemplazado o por su diámetro exterior (OD) restandole cerca de 1/2 pg.

Una vez que el tamaño del cono ha sido establecido, las capacidades de flujo para una instalación particular puede ser determinado. Las capacidades del cono para un tamaño en particular

son casi universalmente especificadas en 75 pies de carga de alimentación y son completamente consistentes de fabricante a fabricante. Esto es, la mayor parte de los conos de 4 pg tienen una clasificación similar de capacidad, sin considerar el fabricante. Algunas guías de capacidad de conos son mostradas en la Tabla 5.7. Por ejemplo, un desarecillador con 12 conos de 4 pg puede tener una capacidad de gasto de 600 gpm ($12 \times 50 = 600$).

Un desarenador con dos conos de 12 pg puede tener un gasto de 1000 gpm, tomando en cuenta que la capacidad del hidrociclón tiene que sobrepasar el gasto máximo de circulación anticipado del equipo por un mínimo de 25%.

Este dimensionamiento, no solamente asegura que el gasto completo de circulación este siendo procesado (suponiendo un recorrido correcto del fluido) sino que además proporciona alguna capacidad adicional para el procesamiento del fluido que entra a la sección de alimentación.

TABLA 5.7 Capacidades para varios Tamaños de hidrociclones a 75 pies de carga de alimentación.

Tamaño del cono,pg	Capacidad del cono, gal/min
4	50 a 75
5	75
6	100
8	150
10	300
12	500

El desarenador es dimensionado de acuerdo al máximo gasto de circulación del lodo y a la máxima velocidad de penetración esperada. Los fabricantes han proporcionado nomogramas que pueden ser usados para determinar el número de hidrociclones requeridos.

Estos recomiendan que las unidades sean dimensionadas sobre

un gasto de flujo igual a 1.25 veces el gasto de circulación del lodo. En algunos casos, los equipos tienen desarenadores de reemplazo con cribas de malla fina en el vibrador. Esto puede ser prudente para instalar un desarenador mejor que una criba fina en una operación de perforación rápida donde un gran porcentaje de sólidos están entre 40 a 100 micrones. Un desarenador tiene un Apice más grande que un desarcillador y elimina eficientemente, bajo condiciones correctas de operación, sólidos de este tamaño. Las Figuras 5.19 y 5.20 ilustran nomogramas típicos usados para el dimensionamiento de desarenadores y desarcilladores.

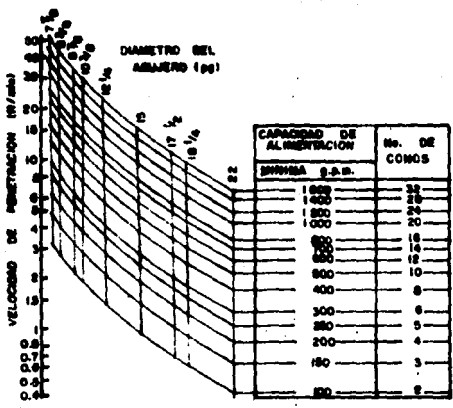


FIG. 5.19 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR No. DE CONOS DE UN DESARCILLADOR

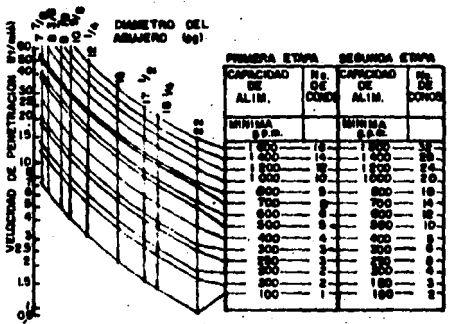


FIG. 5.20 NOMOGRAMA PARA DETERMINAR No. DE CONOS DE UN DESARCILLADOR EN 2 ETAPAS

5.2.4 Evaluación y Selección de la Bomba Centrífuga.

El siguiente paso en la evaluación es determinar la carga en el colector de alimentación del hidrociclón. Si la carga de alimentación no es del rango recomendado (70 a 80 pies), los pasos siguientes deben conducir a la situación correcta, pues la eficiencia del hidrociclón es radicalmente afectada por la baja carga de alimentación, la Figura 5.21 ilustra los conceptos.

Una bomba centrífuga, operando a una velocidad dada con un impulsor particular proporcionará una carga permanente en cualquier descarga de flujo particular.

Esta carga la cual es independiente de la densidad de los fluidos que son bombeados, puede considerarse como la altura a la cual un fluido se elevaría en una tubería vertical sobre la descarga de la bomba.

Como se puede ver en la Figura 5.21, la presión de descarga bajo estas condiciones variará con la densidad del fluido bombeado, igual aún cuando los diferentes fluidos son levantados por la misma carga.

Los hidrociclones son diseñados para operar a 70 u 80 pies de carga hidrostática. Para determinar la presión correcta de alimentación, se debe convertir la carga a presión. Esto es determinado muy fácilmente con la ecuación de presión hidrostática.

$$P = 0.052 \times D \times MW \quad (5.12)$$

donde:

D = Carga hidrostática, pies

MW = Densidad del lodo, lb/gal

P = Presión de alimentación, lb/pg².

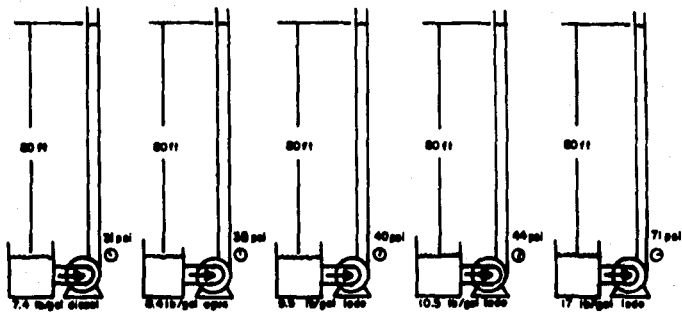


FIG. 8.21 PRESION DE DESCARGA PARA BOMBA CENTRIFUGA CUANDO DESCARGA FLUIDOS DE DIFERENTE DENSIDAD CON CARGA CONSTANTE

Entonces haciendo D igual a los valores recomendados de 75 pies, la ecuación 5.12 queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P &= 0.052 \times 75 \times MW \\ P &= 3.9 \times MW \\ P &\approx 4 \times MW \end{aligned} \quad (5.13)$$

La ecuación 5.13 puede expresar que presión de alimentación es requerida para una densidad dada de lodo al manejar los hidrociclones a 75 pies de carga.

Para el caso típico de un lodo de densidad de 9.0 lb/gal, la presión calculada en el colector de alimentación estaría cerca de 36 lb/pg². La ecuación puede ser arreglada en la siguiente forma:

$$D = \frac{P}{0.052 \times MW} \quad (5.14)$$

La ecuación 5.14 permite calcular correctamente la carga de alimentación disponible, basado en el conocimiento de la presión de alimentación y en la densidad del lodo.

Esto puede ser utilizado al seleccionar la adecuada combinación bomba-motor-impulsor cuando la carga de alimentación es demasiado baja. La Figura 5.22 muestra como varía el punto de corte medio (50%) con la carga de la alimentación para un cono deslimizador típico de 4 pg. Como se indica en la figura, una reducción del 33% en la carga de 75 a 50 pies, resulta en un 200% de incremento en el corte medio, de 16 a 48 micrones. Para la mayoría de los lodos este cambio significa una reducción en la eliminación de sólidos.

La Tabla 5.8 muestra como la capacidad de este cono varía con la carga de alimentación. La misma reducción del 33% en la carga de alimentación resulta en una reducción del 15% en la capacidad

de manejo de fluido. De esta manera, si esta instalación del hidrociclón fue correctamente dimensionada, pero operando con la reducción de carga hidrostática indicada (50 pies), sería apenas capaz de procesar el gasto de circulación completo de los equipos y en suma, haría una pésima separación de sólidos. Definitivamente, la eficiencia del hidrociclón es afectada críticamente por la carga de alimentación.

TABLA 5.8 Variación de la capacidad de hidrociclones de 4 pg con la carga de alimentación.

Capacidades del cono, gal/min/cono								
Tamaño del cono, pg	Carga de alimentación, pie (para lodo de 9 lb/gal)							
	45	50	55	60	65	70	75	80
4	39.7	42.3	44.9	46.2	47.4	48.7	50	51.2

El primer paso en la evaluación de un posible problema de carga de alimentación es obtener una lectura confiable de la presión de alimentación. Típicamente el cálculo comúnmente utilizado es incierto o inadecuado y en muchos casos no pueden ser calculados del todo. Se debe tener medida la presión de alimentación de trabajo para verificar que el equipo existente está siendo abastecido con la carga de alimentación adecuada.

Si la presión de alimentación observada es $4 \times MW$ ($\approx 2 \text{ lb/pg}^2$), la combinación bomba-motor-impulsor está correctamente dimensionada y los hidrociclones están recibiendo la carga de alimentación correcta. La baja presión de alimentación puede generalmente indicar una de dos condiciones :

1.- Un apropiado dimensionamiento del sistema de bombeo con una obstrucción restringida en la succión. Puesto que la bomba proporciona una particular carga bajo una serie de condiciones de operación dadas. Otro dimensionamiento apropiado del sistema de bombeo sería cortar la carga de alimentación en el colector del hidrociclón debido a la gran pérdida de carga en la succión de la bomba. Un severo taponamiento en la succión puede causar daño a la bomba debido a la cavitación.

2.- Un inapropiado dimensionamiento del sistema de bombeo, en esta situación los componentes de bombeo no proporcionarán la carga hidrostática requerida bajo la menor de las condiciones.

En la condición (1) debería ser siempre comprobado si la presión de alimentación es baja. Si la succión está obstruida los residuos deben ser removidos y la presión de alimentación recalcada.

Si este es aún bajo, entonces no hubo obstrucción en la succión de la bomba, por lo que deben ser analizadas la combinación de bomba-motor-impulsor así como también las tuberías de succión-descarga.

El total de carga hidrostática requerida de la bomba es la suma de tres componentes:

a) La pérdida de carga debida a elevación. La energía es requerida para levantar el fluido que es bombeado desde los tanques de lodo levantándolo hacia el colector de alimentación del hidrociclón. Esta es la distancia medida en pies, desde la superficie del lodo en los tanques a el colector de alimentación del hidrociclón. Generalmente, este terreno es de 5 a 8 pies sobre los equipos.

b) Pérdida de carga hidrostática en la línea de succión y de descarga. Es la pérdida de energía debida a la fricción en la línea de succión, de descarga y en el múltiple de distribución.

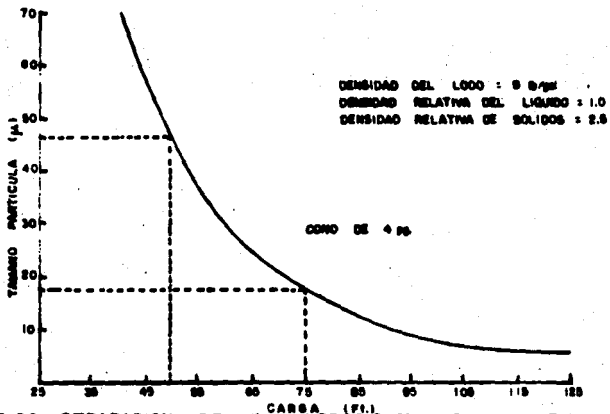


FIG. 5.22 SEPARACION DE UN HIDROCICLON DE 4 pul. EN FUNCION DE LA CARGA DE ALIMENTACION

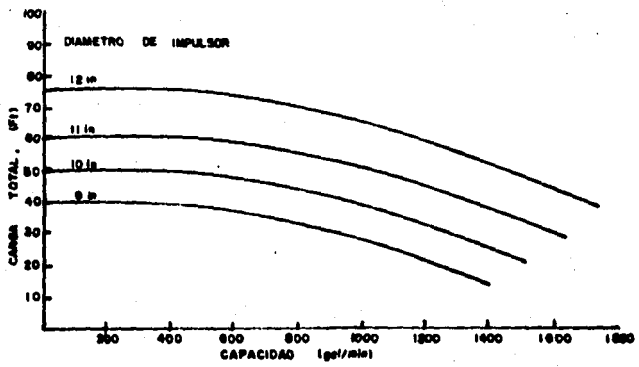


FIG. 5.23 CURVA DE EFICIENCIA PARA UNA BOMBA CENTRIFUGA OPERANDO CON 1,150 rpm.

Este término tendrá generalmente un rango de 5 a 15 pies en un procesamiento típico de gastos y puede ser asumido dentro de este rango si no se tiene mejor información disponible.

c) Pérdida de carga a través de los hidrociclones. Esta es la pérdida de energía a través de los hidrociclones y para propósito de dimensionamiento de la bomba, es asumida para ser la carga de alimentación recomendada por los fabricantes de 70 a 80 pies.

Si nosotros asumimos el peor caso posible para una pérdida de carga en la línea de succión, de descarga y en la red de distribución (15 pies), una pérdida de levantamiento típica para un equipo (6 pies) y la carga de alimentación (75 pies) del hidrociclón recomendado, se tendrá un requerimiento total de carga de cerca de 100 pies. La combinación bomba-motor-impulsor deberá ser capaz de producir 100 pies de carga. Para ilustrar como el equipo de bombeo es analizado, se seleccionará algún equipo hipotético, asumiendo lo siguiente:

Bomba centrífuga de 5 x 6

Motor de 1150 rpm

Impulsor de 11 pg

Total de carga requerida = 100 pies

Capacidad del hidrociclón de 800 gpm (en 75 pies de carga).

Para evaluar esta situación debe de referirse a las curvas de comportamiento de bombas. La Figura 5.23 es una de ellas y muestra estimaciones de eficiencia (rendimiento de carga) para la combinación bomba-motor, como una función del tamaño del impulsor y gasto de flujo.

Si se utiliza el dato de 800 gpm y se intersecta la línea para el impulsor de 11 pg, relacionando este punto en el eje vertical encontramos que la bomba es capaz de desarrollar solamente cerca de 55 pies de carga total, lo cual no es suficiente. La opción sería elegir un impulsor más grande, lo cual no produciría cambios positivos.

El impulsor de 12 pg que es el más grande que se ajustaría a esta bomba, desarrolla sólo 68 pies de carga (a 800 gpm).

La siguiente alternativa es la utilización de una bomba más grande, por ejemplo una 8 x 8, aunque observando la Figura 5.24 el impulsor más grande disponible para dicha bomba (13 1/2 pg), desarrolla solamente 86 pies de carga, indicando con ello que no es lo adecuado. Si se analiza el cambio a 1750 rpm del motor, en la Figura 5.25 para una bomba 5 x 6 con las revoluciones especificadas para el motor; y se sigue el procedimiento anterior, encontramos que un impulsor de 9 1/2 pg puede desarrollar la carga requerida de 100 pies.

Como se observa el problema fueron las 1150 rpm, no obstante este motor generalmente no es adecuado para aplicaciones en hidrociclones.

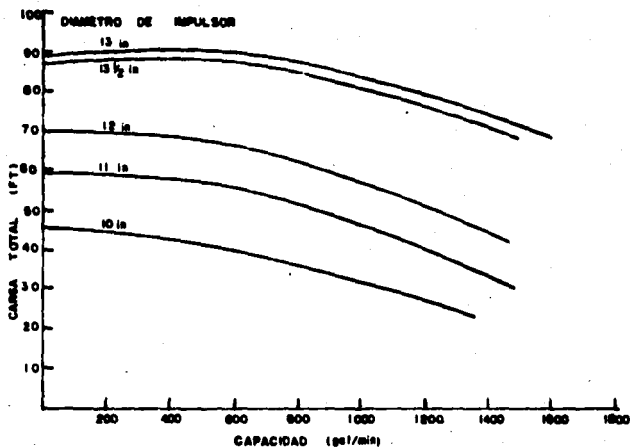


FIG. 5.24 CURVAS DE EFICIENCIA PARA UNA BOMBA CENTRIFUGA DE 6X6 OPERANDO CON 1,150 r.p.m.

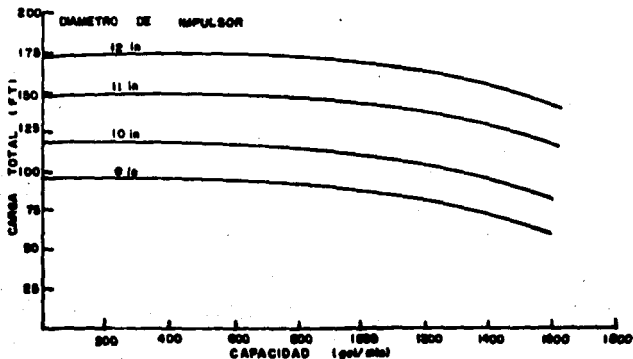


FIG. 5.25 CURVAS DE EFICIENCIA PARA UNA BOMBA CENTRIFUGA DE 6X6 OPERANDO CON 1,750 r.p.m.

En base a lo anterior, el procedimiento para la selección bomba-motor-impulsor es la siguiente:

- 1.- Medir la pérdida por levantamiento.
- 2.- Calcular la pérdida por fricción en la succión y descarga, a la capacidad del gasto del equipo del hidrociclón o estimarlo en 5 ó 15 pies (dependiendo de la complejidad de la tubería).
- 3.- Sumar los resultados del paso 1 y 2 para la carga de alimentación recomendada (75 pies) para obtener el total de carga requerida (por lo menos 90 pies).
- 4.- Identifique el tamaño de la bomba (sobre la etiqueta).
- 5.- Identificar las rpm del motor y la potencia en la etiqueta. Si las rpm del motor son 1150, la combinación bomba-motor probablemente no es la adecuada y deberá ser reemplazada con un equipo de 1750 rpm.
- 6.- Asumimos un motor de 1750 rpm. Encontrar la curva de comportamiento para la bomba (5 x 6 ó 6 x 8) operando a esa velocidad.
- 7.- Sobre esa gráfica localizar la intersección de la carga total requerida y la capacidad del gasto para la instalación del hidrociclón.
- 8.- Seleccionar el más grande de los dos tamaños de impulsores que caen entre este punto (los tamaños son marcados en pulgadas sobre cada curva del impulsor).

Este procedimiento debe de permitir una asignación individual para el equipo de bombeo sobre instalaciones que utilicen hidrociclones y llegar a poder solucionar la mayoría de los problemas de bombeo.

5.2.5. Evaluación y Selección de la Centrifuga.

Frecuentemente los lodos no pesados suelen ser desechados cuando otros sólidos contenidos llegan a obstaculizar la perforación. Sin embargo, debido a que la barita en un lodo pesado representa un valor substancial existiera siempre renuencia para desechar como tal el lodo.

El decantamiento centrífugo procesa un flujo de alrededor de 35 gpm y es usado principalmente como un mecanismo de salvamento de material pesado en lodos, en líquido y también como salvamento de químicos en sistemas no pesados. Se han desarrollado Centrifugas grandes para procesar eficientemente flujos de 75 gpm.

El decantamiento elimina partículas finas de barita de alrededor de 5 micrones, arcillas y partículas de arena fina de alrededor de 7 micrones. La eficiencia de retención de la barita es buena. El equipo es generalmente durable, confiable y requiere poca atención.

El mejor criterio a usar cuando se diseña una instalación centrífuga son la distribución del tamaño de las partículas y el gasto de circulación. Las mejores aplicaciones de las centrifugas es cuando se tiene o requiere alguna de las siguientes condiciones el cual incluyen :

- Disminución o pérdida del sistema por incrementos en el peso del lodo y decrementos de volumen.
- Reducción de las propiedades de flujo del lodo por partículas coloidales de control que afectan la viscosidad.
- Recuperación de barita.
- Eliminar sólidos finos sin afectar el peso del lodo.
- Eliminación de líquidos contaminados causado por el flujo de agua salada u otras fuentes.
- Reducción del total de sólidos mientras que se recuperan partículas químicas y coloides.

La centrifuga satisface los siguientes objetivos en torno a las necesidades específicas del procesamiento de lodo.

- 1.- La concentración de barita gruesa debe ser liberada en una corriente de fluido.
- 2.- La eficiencia de barita recuperada debe ser comparable a el mejor equipo utilizado.
- 3.- La unidad debe tener capacidad para procesar un lodo pesado mientras que se esta perforando un esquistos activo.
- 4.- La unidad debe tener una flexibilidad inherente de operación.
- 5.- El tamaño y peso permitirán montarla sobre un patin.
- 6.- La operación y costos de mantenimiento deben ser razonables.

La Figura 5.26 muestra esquemáticamente el proceso de flujo que se tiene en esta unidad, el cual ocurre en la siguiente forma:

El lodo diluido con agua entra en el bastidor o caja en la esquina superior izquierda y bajo la influencia del giro del rotor sigue una trayectoria espiral hacia la derecha en el espacio anular. Las partículas grandes y pesadas son forzadas hacia las paredes de la carcasa.

A menos que se impida o evite, todo el fluido podrá fluir simplemente fuera por el extremo opuesto del espacio anular. Sin embargo, estas corrientes de fondo están restringidas en volumen por la corriente de fondo de la bomba, forzando algunos líquidos a fluir a través de las cavidades del rotor. Este líquido emerge a través de la flecha del motor.

Todas las partículas pequeñas se asientan a una velocidad lenta y son transportadas hacia el interior del rotor. Todas las partículas grandes se asientan rápido y se mueven hacia las paredes de la carcasa y finalmente fuera del espacio anular como corriente de fondo. Puesto que el tamaño (punto de corte medio) a el cual la separación es hecha no es muy sensitivo al gasto de flujo

La centrifuga satisface los siguientes objetivos en torno a las necesidades específicas del procesamiento de lodo.

- 1.- La concentración de barita gruesa debe ser liberada en una corriente de fluido.
- 2.- La eficiencia de barita recuperada debe ser comparable a el mejor equipo utilizado
- 3.- La unidad debe tener capacidad para procesar un lodo pesado mientras que se esta perforando un esquiato activo.
- 4.- La unidad debe tener una flexibilidad inherente de operación.
- 5.- El tamaño y peso permitirán montarla sobre un patin.
- 6.- La operación y costos de mantenimiento deben ser razonables.

La Figura 5.26 muestra esquemáticamente el proceso de flujo que se tiene en esta unidad, el cual ocurre en la siguiente forma:

El lodo diluido con agua entra en el bastidor o caja en la esquina superior izquierda y bajo la influencia del giro del rotor sigue una trayectoria espiral hacia la derecha en el espacio anular. Las partículas grandes y pesadas son forzadas hacia las paredes de la carcasa.

A menos que se impida o evite, todo el fluido podrá fluir simplemente fuera por el extremo opuesto del espacio anular. Sin embargo, estas corrientes de fondo están restringidas en volumen por la corriente de fondo de la bomba, forzando algunos líquidos a fluir a través de las cavidades del rotor. Este líquido emerge a través de la flecha del motor.

Todas las partículas pequeñas se asientan a una velocidad lenta y son transportadas hacia el interior del rotor. Todas las partículas grandes se asientan rápido y se mueven hacia las paredes de la carcasa y finalmente fuera del espacio anular como corriente de fondo. Puesto que el tamaño (punto de corte medio) a el cual la separación es hecha no es muy sensitivo al gasto de flujo

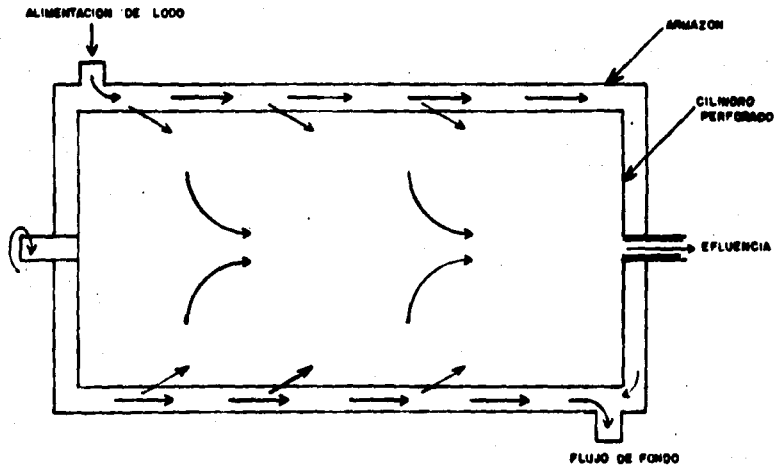


FIG. 5.26 ESQUEMA DE UNA CENTRIFUGA CON ROTOR PERFORADO

5.2.6 Arreglos comunes en la eliminación de sólidos.

La mayor parte de los arreglos comunes en la eliminación de sólidos son: La criba vibratoria - desarenador - desarcillador colocados como se muestra en la Figura 5.27 (aquí se muestra con una centrifuga opcional de alto volumen). La combinación del desarenador-desarcillador es completamente estándar para eliminar los sólidos en fluidos de perforación no pesados. La centrifuga opcional de alto volumen funciona como un mecanismo desarcillador procesando cortes medianos de 5 a 8 micrones con casi 150 gpm de gasto de circulación del equipo.

Cuando la fase líquido del fluido de perforación es de alto costo unitario o los gastos disponibles son particularmente altos, la centrifuga puede ser utilizada más efectivamente cuando parte de esta capacidad es usada para licuar las corrientes de fondo del hidrociclón.

En la mayoría de los casos, el 90% de los gastos de eliminación de sólidos podrá ser posible sólo con la adición de una centrifuga de alto volumen para el arreglo estándar. Idealmente, el desarenador y desarcillador podrán ser puestos sobre los tanques del equipo tal que las corrientes de fondo sean fácilmente recogidas con una una centrifuga, si se desea.

El procesamiento de fluido de perforación pesado requiere de una modificación del arreglo anterior, como se muestra en la Fig. 5.28, debido a que la presencia de barita presenta serios problemas de eliminación. El uso de centrifugas decantadoras, con 15 a 30 gpm. de capacidad es altamente recomendado para eliminar coloides (control de viscosidad) y recuperar barita.

Generalmente, estos arreglos no son utilizados excepto cuando los contrastes ambientales son severos o el costo unitario del lodo es alto.

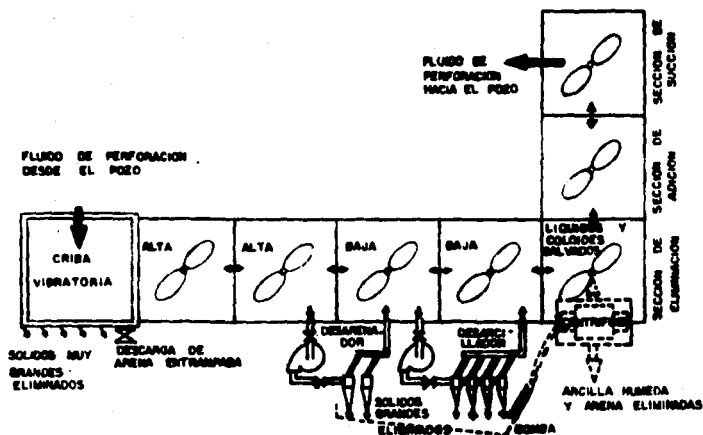


FIG.5.27 INSTALACION CON CENTRIFUGA OPCIONAL PARA ELIMINACION DE SOLIDOS EN DOS ETAPAS PARA FLUIDOS DE PERFORACION NO PESADOS

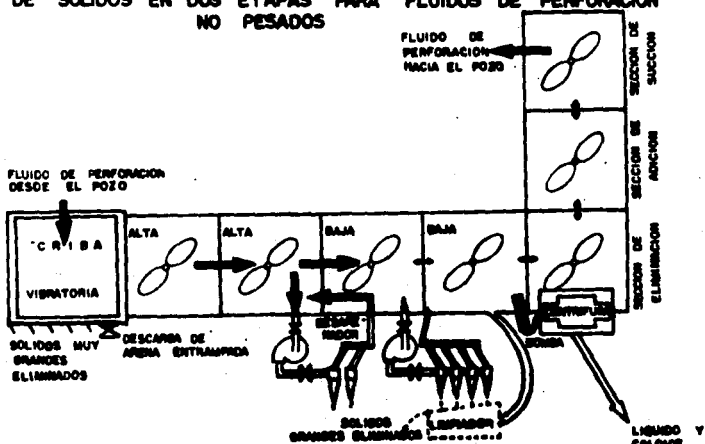


FIG.5.28 INSTALACION PARA ELIMINACION DE SOLIDOS CON CENTRIFUGA Y LIMPIADOR DE LODOS PARA FLUIDOS DE PERFORACION PESADOS

El correcto recorrido de los fluidos a través del sistema de eliminación de sólidos es esencial para la máxima eliminación de sólidos en cualquiera de los arreglos. Generalmente, cometer errores en el recorrido de los fluidos puede resultar fácilmente una reducción del 50% del gasto de circulación del equipo existiendo pérdidas en cada circulación. Igual si el equipo de eliminación opera con un 100% de eficiencia sobre el restante 50% del gasto del equipo de circulación, entonces deberemos tener un gasto de eliminación neto de sólo 50%. El contenido de sólidos aumentará bastante rápido a 50%, eliminando bajo condiciones iguales y de perforación. Desafortunadamente un recorrido o circulación de materiales malo es también del todo común. En realidad los errores de circulación son probablemente los problemas más comunes en el sistema de eliminación de sólidos.

La Figura 5.28, muestra el esquema de un adecuado recorrido del sistema de eliminación de sólidos para lodos no pesados, se observa que la sección de succión para la bomba del desarenador está corriente arriba para la sección hacia la cual el derrame es descargado. Además, note que la bomba del desarcillador se alimentará desde la sección hacia la cual el derrame del desarenador fue descargado.

El derrame del desarcillador es descargado a la siguiente sección corriente abajo. Esta es la base para el hidrociclón de etapas múltiples en el procesamiento de lodo. Algunas reglas para un proceso de circulación en dos etapas son :

- 1.- El derrame para cada pieza del equipo descarga hacia la sección de succión corriente abajo desde la sección de succión para esa pieza del equipo.
- 2.- La sección de succión para el desarcillador puede estar de una u otra manera en la misma sección hacia la cual el derrame del desarenador es descargado o en una corriente abajo más distante.

- 3.- Dos piezas del equipo no tienen la misma sección de succión.
 4.- Dos piezas del equipo no tienen la misma sección de descarga de derramas (siguiendo las reglas 1 y 2).

Estas aparecen como simples principios de separación. Una mala circulación de fluidos afecta el proceso de eliminación de sólidos. La Figura 5.28 muestra un acoplamiento correcto para el desarenador y desarcillador.

Si nosotros consideramos solamente al desarenador, calculamos que porcentaje del total de fluido que entra a la sección de succión del desarenador es actualmente procesado. La figura indica que el desarenador es capaz de procesar 400 gpm. El gasto del equipo de circulación que entra a la sección de succión del desarenador es de 350 gpm.

Para balancear el flujo dentro y fuera de la sección del desarenador, un contraflujo debe ocurrir desde la siguiente sección corriente abajo. Puesto que la corriente de fondo desde el desarenador (la cual abandona el sistema) es pequeña comparada con el volumen existente procesado, es desechado. De esta manera el contraflujo será alrededor de 50 gpm. En otras palabras olvidándonos de la corriente abajo del desarenador :

$$\begin{array}{l} \text{Volumen que entra a la} \\ \text{sección de succión del} \\ \text{desarenador} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Volumen que sale de la} \\ \text{sección de succión del} \\ \text{desarenador} \end{array}$$

La bomba del desarenador no será capaz de distinguir fluido a contraflujo (o cualquier otro fluido entrando a la sección de succión de la bomba) de el fluido del agujero cargado con sólidos del pozo, lo cual nosotros deseáramos del mismo modo para procesar el 100%.

Así, si todo el lodo sin tratar entrarán a la sección de succión del desarenador para ser procesados. En este caso nuestro porcentaje procesado es :

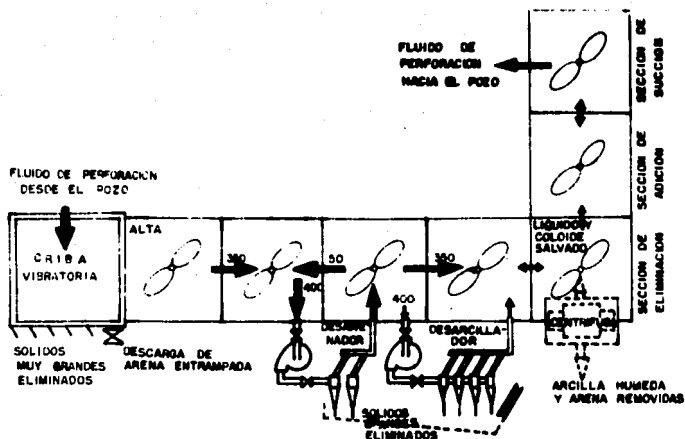


FIG. 5.29 CORRECTO RECORRIDO DEL FLUIDO DE PERFORACION EN EL DESARENADOR

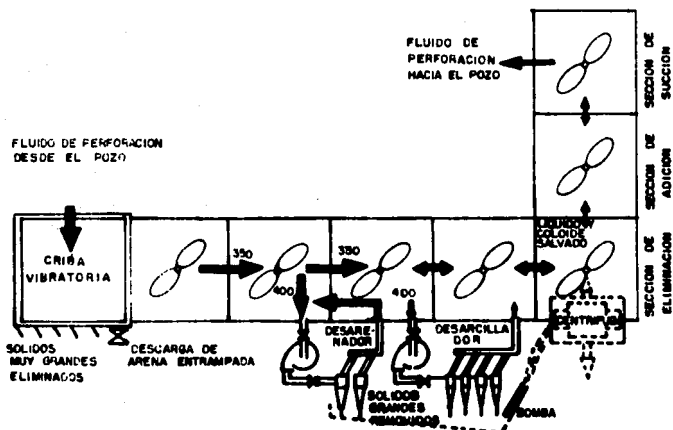


FIG. 5.30 RECORRIDO INAPROPIADO DEL FLUIDO DE PERFORACION EN EL DESARENADOR

$$\% \text{ Procesado} = \frac{\text{Volumen desarenado}}{\text{Volumen que entra a la seccion del desarenador}} \quad (5.25)$$

$$\% \text{ procesado} = \frac{400}{350 + 50} = 100$$

$$\% \text{ procesado} = 100\%$$

En una salida apropiada del sistema de eliminacion, cada pieza del equipo procesara 100% del fluido que está entrando a la seccion de succión. Ahora bien, que porcentaje procesado podria resultar de un error común en el recorrido del fluido, igual que la descarga del derrame del desarenador para la seccion del compartimiento de la succión. La Figura 5.30 ilustra este caso, aplicando un balance a los flujos dentro y fuera de la seccion de succión, se tienen 400 + 350 gpm entrando y 400 gpm son procesados.

$$\% \text{ procesado} = \frac{400}{400+350} \times 100 = 53\%$$

Desafortunadamente, este problema es demasiado común en el procesamiento de eliminación de sólidos. Los cálculos arriba mostrados muestran el error de este razonamiento, una mala circulación o recorrido de materiales reducen drásticamente el gasto total de eliminación de una instalación de hidrociclones, porque sólo una fracción del equipo de circulación será procesado.

5.3 Implementación del Programa de computo.

El programa que se desarrolló determina el control de sólidos en la superficie por medio de cribas vibratorias, utilizando datos de campo fácilmente obtenibles, como son :

Q = Gasto de Circulación en el Pozo, (gal/min)

ROP = Velocidad de Penetración, (pie/hr)

MW = Densidad del Lodo, (lb/gal)

D = Diámetro del Pozo, (pg)

PV = Viscosidad Plástica, (cp).

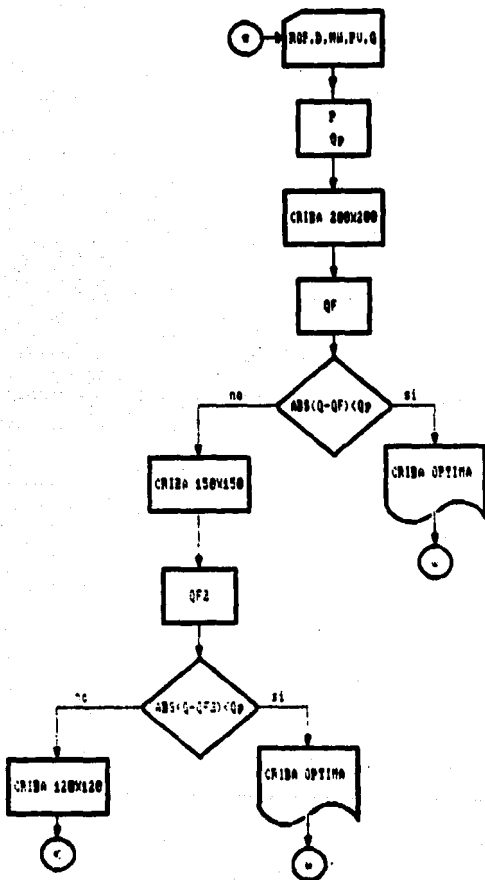
Para realizar este programa y hacerlo accesible a la utilización de parámetros fácilmente obtenibles de campo, se tuvieron que ajustar una serie de curvas de capacidad de flujo, las cuales fueron obtenidas por Hoberock a partir de un minucioso estudio realizado en diferentes cribas vibratorias.

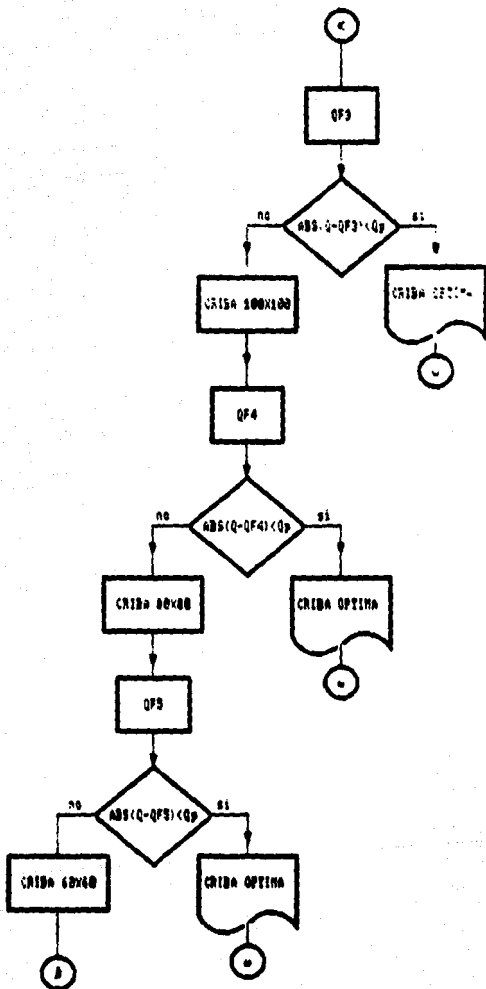
Este ajuste se realizó debido a la gran complejidad de parámetros que interfieren en el transporte y separación de sólidos en las cribas; tales como el patrón de vibración, ángulos de posición de la cubierta, conductividad de la malla, velocidad del vibrador, factor de taponamiento, etc. así como de las propiedades de los fluidos.

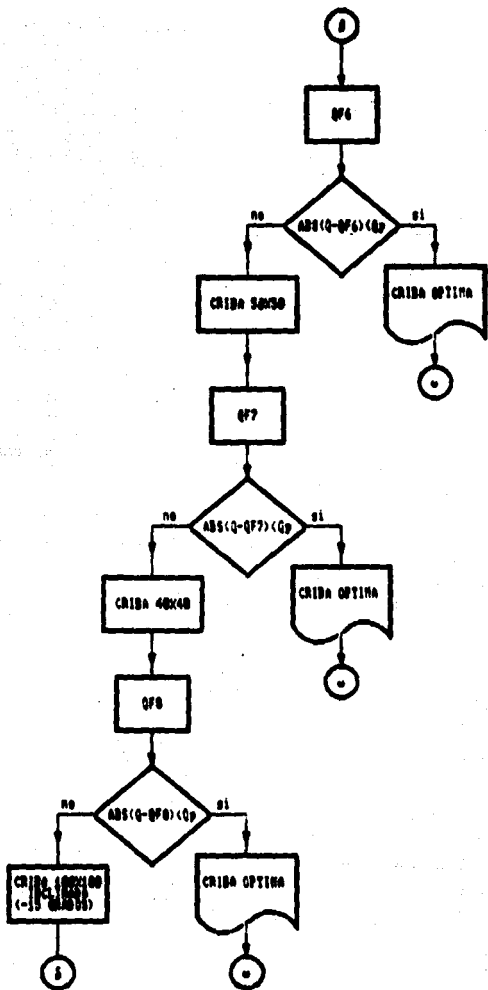
El ajuste de curvas fue desarrollado por el método de SVD para obtener las formulas que se aplicaron en el programa (apendice D).

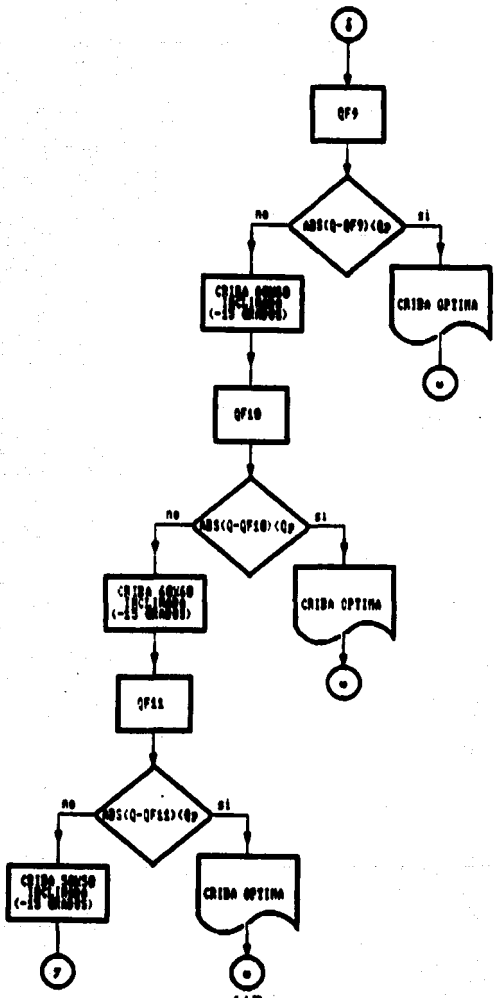
El programa fue elaborado en lenguaje Fortran con sistema Vax y posteriormente implementado en PC en lenguaje Basic y C. A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa :

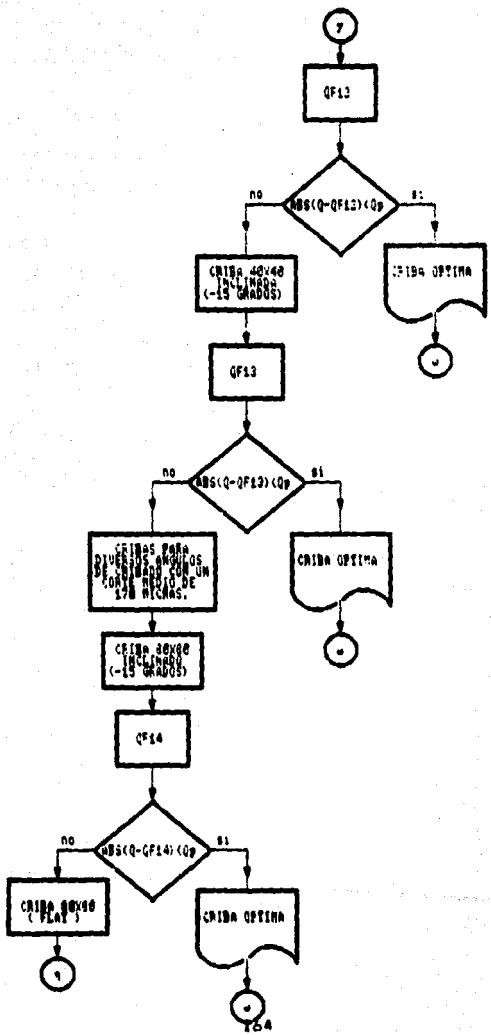
diagrama de flujo para el control de solidos en superficie por medio de cribas vibratorias

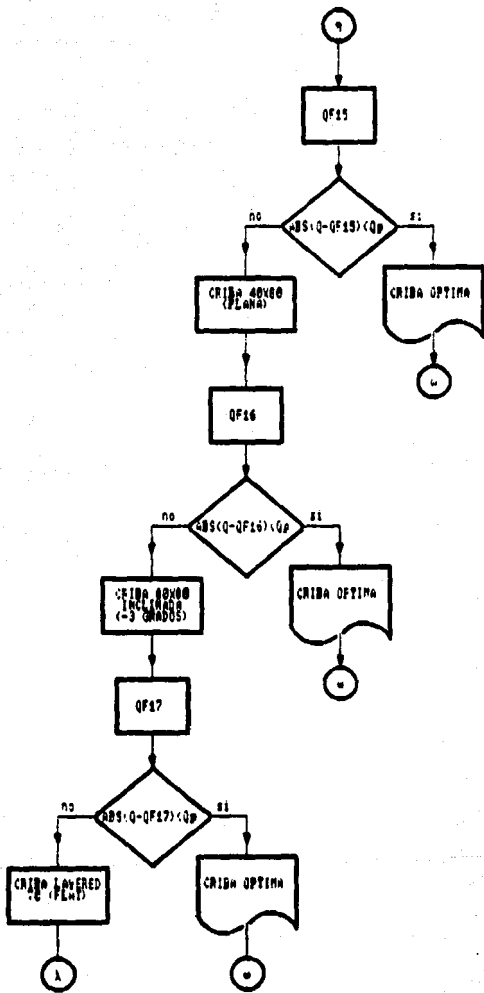


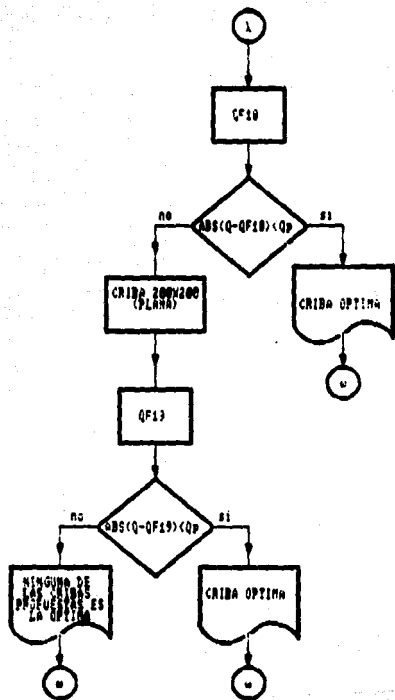


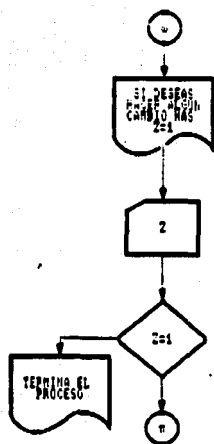












DISCUSION DE RESULTADOS

La dificultad y complejidad de establecer modelos matematicos y de hacerlos accesibles de una manera sencilla a las operaciones de campo para el control de solidos en la superficie, propician seleccionar de una manera empirica los equipos de control de solidos en el campo propiciandole en muchos casos la pérdida de las propiedades del fluido de perforación, aumentando los costos de tratamiento de estos y en algunos casos hasta la pérdida del pozo.

Los fabricantes de equipos de control de solidos e investigadores han tratado de obtener nomogramas y formulas sencillas a partir de una gran cantidad de parámetros que interfieren en este proceso, para ser utilizados en el campo.

El programa fue alimentado con datos de Heberock²⁷, obteniéndose una reproducción de resultados iguales tal como se muestra en el archivo de resultados de dos corridas. El programa maneja unicamente las condiciones, en que fueron elaboradas cada una de las curvas obtenidas respectivamente para cada criba como son:

Capacidad de fluido solo (Qf), para cubierta plana (0°), cribas vibratorias (4 pies de ancho x 5 pies de largo, 4.5 g de aceleración normal y 67% de alcance del fluido).

malla	factor de taponamiento.
40 x 40	0.90
50 x 50	0.77
60 x 60	0.71
80 x 80	0.64
100 x 100	0.59

mallas	factor de taponamiento.
150 x 120	0.56
150 x 150	0.54
200 x 200	0.50

Capacidad de fluido solo (QF), para cubierta inclinada hacia abajo (-15 grados), criba vibratoria (4 pies de ancho x 5 pies de largo, 4E g de aceleracion normal y 67% de alcance de fluido).

mallas	factor de taponamiento
40 x 40	0.9
50 x 50	0.77
60 x 60	0.71
80 x 80	0.64
100 x 100	0.59

Capacidad de fluido solo (QF), para varias cribas y ángulos de cubierta, con corte medio de aproximadamente 170 micrones.

Capacidad de gasto para fluido solo (Qf) para cubierta inclinada hacia abajo (-15°)

mallas	ángulo	factor de taponamiento
80 x 80	(-15)	0.64
80 x 80	plana	0.64
40 x 80	plana	0.80
80 x 80	(+3)	0.64
layered 70	plana	0.50

El programa que se utiliza está restringido para otros tipos de cribas que no se utilizan, así como parámetros de operación ya que a medida que pasa el tiempo salen nuevos diseños con características nuevas, así como de hidrociclones, centrifugas y productos químicos para la eliminación de sólidos.

Las medidas adoptadas para solucionar los problemas que se presentan en la perforación se deben basar en el establecimiento de un control adecuado del fluido de perforación, del equipo de control de sólidos y de las operaciones a desarrollar durante la construcción del pozo.

ESTE PROGRAMA SELECCIONA EL EQUIPO DE CONTROL
PRIMARIO DE SOLIDOS (CRIBAS VIBRATORIAS)
EN SUPERFICIE

D A T O S D E E N T R A D A :

VELOCIDAD DE PENETRACION (FT/HR) = 15.0000
DENSIDAD DEL LODO DE FEFF. (LB/GAL) = 9.0000
VISCOSIDAD PLASTICA (CF) = 9.0000
GASTO DEL FLUIDO DE PERFORACION (GAL/MIN) = 325.0000
DIAMETRO DEL POZO (PG) = 9.7500

R E S U L T A D O S

LA CRIBA 60X60 CON CUBIERTA INCLINADA (-15 GRADOS)
PROPORCIONA UNA BUENA SEPARACION DE SOLIDOS

SI DESEA HACER ALGUN CAMBIO HAGA 2 = 1

D A T O S D E E N T R A D A :

VELOCIDAD DE PENETRACION (FT/HR) = 18.0000
DENSIDAD DEL LODO DE PERF. (LB/GAL) = 10.0000
VISCOSIDAD PLASTICA (CP) = 15.0000
GASTO DEL FLUIDO DE PERFORACION (GAL/MIN) = 410.0000
DIAMETRO DEL POZO (PS) = 12.2500

R E S U L T A D O S

LA CRIBA 50X50 CON CUBIERTA PLANA (0 BRADOS)
PROPORCIONA UNA BUENA SEPARACION DE SOLIDOS

SI DEBEA HACER ALGUN CAMBIO HAGA 2 = 1

T E R M I N A E L
P R O C E S O

NOMENCLATURA

A	Area transversal, cm^2 , pie^2 .
b	Ancho de la Criba, pg , cm .
C	Capacidad Termica, $\text{cal/gr}^\circ\text{C}$.
Cn	Conductividad de la linea normal del registro, milichas-m.
Co	Conductividad observada del registro, milichas-m.
D	Profundidad, pie .
D	Carga hidrostática, pie .
\bar{D}	Procedio de tamaño de partículas, micrón .
De	Longitud Equivalente, pie .
d	Distancia, cm .
dcn	Exponente dc calculado en el punto de interés, adim .
dco	Exponente de la linea normal del registro de exp, adim .
E	Empuje ascendente, lb .
Es	Eficiencia de separación, en porcentaje (no fracción).
F	Sólidos mas grandes que la abertura de la malla, fracción.
Fc	Factor de taponamiento, adimensional .
Gm	Densidad relativa del lodo, adimensional (agua = 1).
h	Espesor de malla de la criba, pg , cm .
h	Longitud de tubería, pie .
k	Conductividad térmica, $\text{cal/seg-cm}^\circ\text{C}$.
ki	Coefficiente de esfuerzos matriciales, adimensional .
L	Longitud del Rotor, pg .
MW	Densidad del fluido de perforación, lb/gal .
m	Viscosidad, cp .
N	Velocidad del rotor, pg .
P	Peso o fuerza de tensión, lb .
P	Presión, lb/pg^2 .
P	Sólidos perforados, % en volumen (no fracción).
Pf	Presión de fractura, lb/pg^2 .
PV	Viscosidad plástica, cp .
P/D	Gradiente de presión de formación, $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$.
Pf/D	Gradiente de presión de fractura, $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$.
(P/D)n	Gradiente de presión normal, $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$.

Q	Gasto de circulación, gpm.
Qa	Calor almacenado, cal.
Qc	Flujo de calor, cal/seg.
Qe	Gasto del efluente, gpm.
Qf	Gasto de circulación sin sólidos, gpm.
Qs	Gasto de Circulación con sólidos, gpm.
R	Radio del rotor, pg.
Rf	Peso de sólidos en la alimentación, por ciento.
Rn	Resistividad de la línea de lutita, ohm-m.
Ro	Resistividad de la lutita observada en el registro, ohm-m.
Ro	Peso de sólidos que pasan através de la criba, por ciento.
Ru	Peso de sólidos separados por la criba, por ciento.
ROP	Velocidad de penetración, pie/hr.
r	Factor de carga, adimensional.
S/D	Gradiente de presión de sobrecarga, lb/pg ² /pie.
\bar{u}	Promedio de velocidad de penetración, pie/hr, m/hr.
V	Volumen de roca, cm ³ .
\bar{v}	Promedio de velocidad de los sólidos acarreados, pg/seg.
W	peso unitario de la tubería, lb/pie.
Wf	Peso de sólidos del gasto de flujo en la alimentación, lb.
Wo	Peso de sólidos separados del gasto de flujo, lb.
Wu	Peso de sólidos que pasan através de la criba, lb.
YP	Punto de cedencia, lb _f /100 pie ² .
ρ	densidad, gr/cm ³ .
ρ_r	densidad de la roca, gr/cm ³ .
ρ_w	densidad del agua, gr/cm ³ .
ϕ	porosidad, porcentaje(fracción).
ΔT	Variación de temperatura, °C.
δ	Velocidad de corte, seg ⁻¹ .
η_e	Viscosidad efluente, cp.
ν	Relación de Poisson, adimensional.

A P E N D I C E (A)

Procedimiento de análisis en cribas para determinar la distribución del tamaño de partícula en el lodo de perforación.

- 1.- Tomar una muestra representativa (500 ml) de un volumen total de lodo de 2 galones.
- 2.- Evapore el líquido de la muestra sin hervir.
- 3.- Lixiviar la muestra seca con hexano sin aceite, si fue usado aceite en el lodo original.
- 4.- Resecar sin hervir.
- 5.- Pesar las muestras.
- 6.- De los resultados obtenidos en el paso 5, para la muestra de sólidos de 500 ml, calcule la cantidad de sólidos en la muestra de 2 galones para ser analizados.
- 7.- Tomar una muestra representativa de 2 galones de lodo.
- 8.- Vaciar la muestra lentamente a través de la criba vibratoria con dilución si es necesario.
(Nota : Si cualquier vía de fluido sale entre las cribas, la muestra debe de ser descargada y una nueva muestra procesada principiando en el paso 7. Las cribas recomendadas son las U.S. estándar números 4,10,12,25,40,60,100,200 y 325.)
- 9.- Secar los sólidos con cuidado en la criba para evitar pérdida de partículas finas que puedan caer a través de la criba cuando la muestra esta seca.
- 11.- Resecar la muestra.
- 12.- Vibrar la muestra seca otra vez sobre la cribas por 5 minutos en frecuencia media.
- 13.- Pesar los sólidos secos en cada criba.
- 14.- Colectar todos los materiales producidos abajo de 44 micrones Criba(No 325) que fue utilizada en los pasos 8 hasta 12.
- 15.- Tomar una muestra representativa de 500 ml del producido y calcular los sólidos equivalentes en el total de volumen producido como perfil del paso 4 hasta el 6.

14.- Como una comprobación sobre el paso 13, restar el peso de sólidos sobre la criba (paso 13) de la cantidad de sólidos en la muestra inicial de 2 galones (paso 6).

(Peso de sólidos en en 2 gal. de muestra) - (Peso de Sólidos Sobre las cribas) = (Peso de sólidos más pequeños que 44 μ).

Comprobar con : peso de sólidos más pequeños que 44 micrones por análisis de muestras (paso 15).

A P E N D I C E (B)

Capacidad Actual de flujo de fluidos y factor de carga de sólidos.

Se consideró primeramente una capa uniforme de sólidos con una conductancia (C_s) que se halla sobre una criba con conductancia (C). Aunque los sólidos no están normalmente tal como una capa uniforme, nosotros mostraremos que el concepto es útil, por definición se tiene que :

$$C = K/h \quad ; \quad \text{y} \quad C_s = K_s/D \quad ;$$

donde :

K = permeabilidad de la criba.

K_s = permeabilidad de la capa de sólidos.

h = espesor de la criba.

D = profundidad de equilibrio de los sólidos sobre la criba.

La capa de sólidos y la criba constituyen dos medios en serie para la transmisión del fluido y la expresión para la conductancia efectiva total (C_t) puede ser obtenida como sigue :

Denotando a q' como el flujo a través de la capa de sólidos y la criba, ignorando por el momento, el efecto crítico de tamaño de partícula. Entonces, esto puede ser mostrado como sigue :

$$q' = (C_t/C) q_f \quad (B-1)$$

Esto es en forma directa para mostrar que para dos medios porosos en serie la conductancia total (C_t) está dada por :

$$C_t = \frac{C C_s}{C + C_s} \quad (B-2)$$

El efecto de partícula crítica o casi del tamaño es para reducir q' por la relación (criba/sólidos) conocido como factor de interferencia r_s (es decir $q_s = r_s q'$); sustituyendo la ec (B-1) en q_s obtenemos;

$$q_s = r_s (C t / C) q_f. \quad (B-3)$$

de las ecuaciones (B-2) y (B-3) se tiene:

$$\frac{q_s}{q_f} = \frac{r_s}{1 + C/C_s} \quad (B-4)$$

El factor de carga de sólidos r es definido como $r = C/C_s$. De la definición de C y C_s , pero también se tiene que :

$$C/C_s = \delta (D/h), \quad (B-5)$$

Donde $\delta = K/K_s$ y D es obtenido de la siguiente consideración. La suma de sólidos q_{out} descargado de la criba. Como materiales de gran tamaño es dado en términos del ancho de la criba (b), la profundidad de la capa de sólidos (D), y del promedio de la velocidad de acarreo de sólidos (v) (en pg^3/seg (cm^3/seg)) como :

$$q_{out} = b D v \quad (B-6)$$

La cantidad de sólidos q_d generados por perforación para una velocidad de penetración (u), para un diametro de agujero (d_h) puede ser obtenido (en pg^3/seg (cm^3/seg)) como :

$$q_d = 26.18 \times 10^{-4} u d_h^3.$$

Si F ($0 \leq F \leq 1$) denota la fracción de sólidos más grandes que la abertura de la criba, la cantidad de sólidos de gran tamaño presentados en la criba es :

$$q_{in} = 26.18 \times 10^{-4} F u d_h^3. \quad (B-7)$$

considerando un estado de equilibrio, $q_{in} = q_{out}$ e igualando las ecuaciones (B-6) y (B-7), despejando D de la expresión anterior y Sustituyendo está en la ec. (B-5) y posteriormente en la ec. (B-4), la expresión final obtenida queda como :

$$q_s = \frac{r_s}{1+r} q_f. \quad (B-8)$$

donde :

$$r = 24.18 \times 10^{-4} \left(\delta F u \frac{d_n^2}{b h v} \right). \quad (B-9)$$

En el procedimiento discutido se ha asumido una capa uniforme de sólidos que se encuentran sobre la criba, teniendo una área total (S). El flujo de fluido es obstaculizado por estas partículas de sólidos de gran tamaño y el restante de la criba está abierto excepto para casi del mismo tamaño que son taponados. Si el área bloqueada por partículas de gran tamaño (S_b). Y asumiendo que el flujo actual es proporcional al área disponible de la criba, tenemos que el flujo reducido q_s' producido por los sólidos.

$$q_s' = r_s \frac{S - S_b}{S} q_f. \quad (B-10)$$

Igualando q_s' de Ec. (B-10) con q_s de la ec. (B-4) se tiene :

$$1 - \frac{S_b}{S} = \frac{1}{1 + C/C_s} \quad (B-11)$$

ahora usando la ecuación (B-5) y cambiando el orden obtenemos :

$$\frac{S_b}{S} = 1 - \frac{1}{1 + \delta D/h} \quad (B-12)$$

Esto muestra que el concepto de área bloqueada es equivalente a la uniformidad del estrato, o capa.

A P E N D I C E C

Las ecuaciones que se muestran a continuación para las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 fueron obtenidas por el método de SVD (Descomposición del valor singular).

Es un método confiable que nos permite calcular los coeficientes de una función.

El método se inicia con la generación de una "matriz de diseño", para el cual se propusieron más de 20 funciones. Esta es una matriz de diseño A de orden $m \times n$ cuyos elementos vienen definidos por la siguiente expresión:

$$a_{i,j} = \phi_j(X_i)$$

Si Y denota el vector de m elementos $\{Y_i\}$ y C al vector de coeficientes, entonces la aproximación del modelo matemático lineal.

$$\sum_{j=1}^n C_j \phi_j(X_i) \approx Y_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

puede escribirse en forma matricial como :

$$Ac \approx Y$$

El método SVD descompone la matriz A en tres matrices Σ, U y V . Σ es una matriz diagonal de orden $m \times n$ cuyos elementos no negativos son los valores singulares de la matriz A. Los valores $U_{m \times m}$ y $V_{n \times n}$ son dos matrices ortogonales unitarias, las cuales son usadas en la transformación del sistema $Ac \approx Y$ y en un sistema equivalente $\Sigma \bar{c} = \bar{Y}$.

En otras palabras, si la matriz A puede expresarse como UV^t , entonces la aproximación $Ac \approx Y$ puede sustituirse por

$$UV^t c = Y$$

Como U y V son dos matrices ortogonales, tales que $UV^t = I$ ó

$$U^{-1} = U^t Y$$

o bien como $\bar{c} = \bar{Y}$, donde $\bar{Y} = U^t Y$ y,

$$\bar{c} = V^t c$$

Los resultados obtenidos por el método de SVD tienen un error del 0 al 10% de los valores reales obtenidos por medio de las figuras.

A continuación se presentan las ecuaciones obtenidas:

Donde:

PV (cp) = Viscosidad Plástica.

MW (lb/gal) = Densidad.

QF (gal/min) = Capacidad con fluido unicamente, y

REL = (PV/MW).

Formulas Obtenidas de la Figura 5.16.

Criba vibratoria, cubierta plana (0°) con malla de 4 pies de ancho x 5 pies de largo.

FORMULAS	MALLAS
$QF = 3585.54 \cdot 0.210 REL^3 + 1.422 REL^2 - 4.108 REL$	200 x 200
$QF = 3872.33 \cdot 0.099 REL^3 + 0.964 REL^2 - 2.075 REL$	120 x 120
$QF = 4356.57 \cdot 0.080 REL^3 + 0.808 REL^2 - 2.049 REL$	100 x 100

$QF = 5092.25 \bullet -0.009 REL^3 + 0.719 REL^2 - 2.029 REL$	80 x 80
$QF = 5543.92 \bullet -0.092 REL^3 + 0.972 REL^2 - 2.104 REL$	50 x 60
$QF = 5723.11 \bullet -0.098 REL^3 + 0.417 REL^2 - 1.700 REL$	50 x 50
$QF = 6195.70 \bullet -0.007 REL^3 + 0.100 REL^2 - 1.110 REL$	40 x 40

Formulas Obtenidas de la Figura 5.17.
Para criba vibratoria, cubierta inclinada (-15°) con malla 4 x 5.

FORMULAS	MALLAS
$QF = 5052.31 \bullet -0.230 REL^3 + 1.707 REL^2 - 4.010 REL$	100 x 100
$QF = 5256.63 \bullet -0.078 REL^3 + 0.752 REL^2 - 2.950 REL$	80 x 80
$QF = 4458.33 \bullet -0.029 REL^3 + 0.417 REL^2 - 2.920 REL$	60 x 60
$QF = 4851.06 \bullet -0.018 REL^3 + 0.276 REL^2 - 1.019 REL$	50 x 50
$QF = 5163.19 \bullet -0.002 REL^3 + 0.119 REL^2 - 1.155 REL$	40 x 40

Formulas Obtenidas de la Figura 5.18.
Diferentes cribas y Angulos con punto medic de corte de aproximadamente 70 μ .

FORMULAS	MALLAS
$QF = 4901.54 \bullet -0.190 REL^3 + 1.190 REL^2 - 3.044 REL$	80 x 80
$QF = 4849.84 \bullet -0.090 REL^3 + 0.422 REL^2 - 2.845 REL$	80 x 80 (flat)
$QF = 5727.54 \bullet -0.026 REL^3 + 0.847 REL^2 - 1.050 REL$	40 x 80 (flat)
$QF = 5567.15 \bullet -0.016 REL^3 + 0.210 REL^2 - 1.127 REL$	80 x 80 (-3°)
$QF = 6284.90 \bullet -0.011 REL^3 + 0.179 REL^2 - 1.057 REL$	Lay. 70 (flat)
$QF = 3454.51 \bullet -0.189 REL^3 + 1.254 REL^2 - 2.710 REL$	200 x 200

A P E N D I C E (D)

T a b l a d e C o n v e r s i o n

Longitud

1 pg = 2.54 cm
 1 pie = 30.48 cm
 1 milla = 5277 pies
 1 metro = 100 cm
 1 mil = 10^{-3} pg
 1 micron = 0.001 mm
 1 micron = 3.937×10^{-5} pg

Presión

1 Kg/cm² = 14.223 lb/pg²
 1 atm = 1.033 kg/cm²
 1 atm = 14.696 lb/pg² abs
 1 bar = 10^5 pas
 1 atm = 1.0132 bar

Masa

1 kg = 2.2046 lb
 1 lb = 453.59 gr

Viscosidad

1 cp = 6.7197×10^{-4} lb_m/pie-seg
 1 cp = 0.04031 lb_m/pie-min

Volumen

1 bl = 42 gal
 1 m³ = 6.2896 bl
 1 bl = 5.6146 pie³
 1 m³ = 35.314 pie³
 1 bl = 158.987 lt

Temperatura

$^{\circ}\text{F} = 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C} + 32$
 $^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
 $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$

Contenido de calor Entalpia

1 Btu/lb_m = 0.556 cal/gr
 1 Btu/lb_m = 2.326×10^3 j/kg
 1 cal/gr = 4.187 kj/kg
 1 cal/lb_m = 9.2241 j/kg

Densidad

$$\gamma_{ro} = \frac{141.5}{131.5 + \rho_{API}}$$

$$\rho_{API} = \frac{141.5}{\gamma_{ro}} - 131.5$$

$$1 \text{ gr/cm}^3 = 62.426 \text{ lb/pie}^3$$

$$1 \text{ lb/pie}^3 = 5.6166 \text{ lb/bl}$$

$$1 \text{ gr/cm}^3 = 350.63 \text{ lb/bl}$$

Energia

$$1 \text{ Btu} = 1.0550 \times 10^{10} \text{ erg}$$

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ g-cal}$$

$$1 \text{ pie-lb} = 3.766 \times 10^{-7} \text{ kw-h}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.055 \times 10^3 \text{ j}$$

$$1 \text{ Btu} = 2.931 \times 10^{-4} \text{ kw-h}$$

$$1 \text{ hp-hr} = 7.457 \times 10^{-1} \text{ kw-h}$$

$$1 \text{ Btu} = 1.055 \times 10^3 \text{ w/s}$$

Conductividad Termica

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{h-pie-}^\circ\text{F}} = 4.134 \times 10^{-3} \frac{\text{Cal}}{\text{seg-cm-}^\circ\text{C}}$$

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{h-pie-}^\circ\text{F}} = 6.230 \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{h-m}^2}$$

$$1 \frac{\text{cal}}{\text{s-cm-}^\circ\text{C}} = 4.187 \times 10^2 \frac{\text{w}}{\text{m-}^\circ\text{C}}$$

Gradiente Energetico

$$1 \text{ Btu/pie} = 3461.3 \text{ j/a}$$

C O N C L U S I O N E S

El aumento de los costos de hidrocarburos y el desmedido agotamiento de este recurso energético, ha permitido la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. Una de estas alternativas en nuestro país esta encaminada a la explotación y aplicación de la energía geotérmica, dado que se tiene y se encuentra distribuida en la mayor parte del territorio Mexicano.

La energía geotérmica tiene un gran potencial energético ya que aparte de generar energía eléctrica a partir de ésta, se puede aplicar a usos no eléctricos.

La explotación de este recurso a medida que transcurre el tiempo se vuelve más complicada, debido a que estos yacimientos cada vez más se van localizando a mayor profundidad ocasionando serios problemas en la perforación y terminación de los pozos.

Las altas temperaturas de estos yacimientos, las contaminaciones y las zonas fracturadas traen como consecuencia la pérdida de las propiedades y de circulación del fluido de perforación, actualmente se utilizan sistemas de fluidos base-agua, bentonita - lignito y/o cromolignosulfonato así como diversos aditivos químicos que en algunas ocasiones no son efectivos en los problemas. No obstante, se siguen haciendo investigaciones en esta área para mejorar estos productos químicos.

La aplicación de técnicas y sistemas de eliminación de sólidos, aparte de separar los sólidos perforados sirven como dispositivos de apoyo para el control de las propiedades del fluido de perforación, reduciendo los costos de tratamiento y contribuyendo a incrementar la velocidad de penetración.

Partiendo de los problemas encontrados en la eliminación de sólidos en los pozos, se han probado diferentes métodos empíricos, analíticos y mixtos con el fin de obtener modelos de optimización y eficiencia que reflejen el proceso. La complejidad de éste debido al número de variables que la influyen, han sido la causa principal de no obtener modelos matemáticos disponibles. Es por tal motivo que se ajustaron las curvas de capacidad de fluido obtenidas por Hoberock, aplicando el método SVD (descomposición del valor singular) mediante el cual se estableció una matriz de diseño para cada expresión matemática propuesta, obteniéndose el ajuste adecuado para cada curva.

Las expresiones matemáticas obtenidas posteriormente fueron aplicadas en la elaboración del programa de cómputo para cribas vibratorias, el cual fue validado con datos de Hoberock²⁷.

Se ha visto el impacto que tiene el control de sólidos en superficie sobre la perforación, tratándose de establecer de una manera accesible el posible criterio de selección de un equipo de control de sólidos, mediante la descripción del equipo y de un programa de cómputo en cribas vibratorias en lenguaje basic. El conocimiento profundo de toda problemática del proceso, es fundamental para poder estructurar todos los elementos que influyen directa o indirectamente en la planeación de éste proceso.

Dado que el costo de producción de energía geotermoeléctrica está en función directa con el costo de los pozos que es de aproximadamente del 60 - 70% del costo total del proyecto. Y dado que la vida promedio de un pozo geotérmico es de 10 - 15 años, se debe planear mediante un balance de todos los problemas involucrados en estos proyectos, para obtener una máxima eficiencia del campo geotérmico con los mínimos costos requeridos para la obtención de dicha energía.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Alonso Reyes Faustino.
"La Geotermia una Alternativa Energetica".
Tesis Facultad de Ingenieria U.N.A.M. 1987.
- 2.- Del valle Toledo Enrique.
"Apuntes de introducción a la Geofisica".
2a. Edición. Facultad de Ingenieria U.N.A.M. 1984.
- 3.- Arastead H. Christopher.
"Geothermal Energy - Review of Research and Development".
Paris : Unesco, 1973.
- 4.-Informe del Grupo Técnico Sobre Energía Geotérmica.
2o periodo de sesiones, comité preparatorio de la conferencia
de las Naciones Unidas sobre fuentes de energía nuevas y
renovables.
Asamblea General de de las Naciones Unidas, 1980.
- 5.- Dorfman, H. Myron.
"The Outlook for Geopressured-Geothermal Energy And Associated
Natural Gas".
Distinguished Author Series. Journal of Petroleum Technology.
(publicado por el I.I.E. en la referencia E 631)
USA, September 1982.
- 6.-Mercado, Gonzales Sergio.
"Reservorios geotermicos geopresurizados".
Boletín Instituto de Investigaciones Electricas.
Mexico, Julio-Agosto 1986.
- 7.-Alonso H.
"Present And Planned Utilitation of Geothermal".
Resources in Mexico EPRI.
Reunion Anual, San diego California 1985.
- 8.-Mercado, S., Arellano, V., Villaseñor, F.
"Desarrollo de la Energía Geotérmica en México y el Mundo".
Estudios preparados para la subdirección General de Asuntos
internacionales, SEMIP. Cuernavaca Morelos 1982.
- 9.-Organización Latinoamericana de Energía.
"Metodología OLADE Para la Explotación Geotérmica".
Seminario Sobre Exploración Geotérmica.
Quito Ecuador 1978.

- 10.-Rezo Montiel Antonio.
"Desarrollo de la Exploración Geotérmica en México".
Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.
Morelia Michoacán.
- 11.-V.M. Arellano.
"La energía Geotérmica en México y el Mundo".
Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca Morelos.
- 12.-Benítez Hernández M.A., Baraicochea Petrisana F.
"Apuntes de Fluidos de Perforación".
Facultad de Ingeniería(U.N.A.M.).
- 13.-Instituto Mexicano del Petróleo(subdirección de capacitación).
Compendio de Fluidos de perforación k/pi/72.
- 14.-Santoyo-Gutiérrez S.
"Los Fluidos de Perforación y su Importancia en la Perforación de Pozos Geotérmicos".
Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca. Mor. Mex.
- 15.-Arthur W. Mc Cray And Frank W. Cole.
"Oil Well Drilling Tecnlogy".
University of Oklahoma Press.
- 16.-H. Cristócher. H Annstead.
"Geothermal Energy".
London New, second edition 1983.
- 17.-H.G. Sereda.. E.M. Sloviou.
"Perforación de Pozos Petroleros y Gas Natural".
Editorial MIR Moscú 1978.
- 18.-James R. Kelsey and Charles C. Carson.
"Geothermal Drilling".
Sandia National Laboratories, Geoterm. Sci & Tech. 1987 vol.1.
- 19.- Santoyo Gutierrez, S., Baca A.A y Morales, M.R.
"Estado de la Tecnología de Perforación de Pozos Geotérmicos en México".
Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca. Mor.
México. 1991.
- 20.-Morales R. J. Manuel, Herrera C. Omar, Arreola V. Reyna.
"Construcción de un Pozo Geotérmico".
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Mor.

- 21.-Alonso Cardenas Ignacio.
"Apuntes de Terminacion de Pozos"
Facultad de Ingenieria (U.N.A.M.).
- 22.-Caudillo M. Pedro-Reguera Roa Ernesto.
"Curso de Perforacion de Pozos Geotermicos".
OLADE-BID-UNAM-CFE.IIE. 1985.
- 23.- Socrates Santoyo G. J. Manuel Morales.R.,Guillermo Barroso A.
"Control Apropiado de las Condiciones del fluido de perfo -
racion durante la construccion de los pozos Geotermicos".
Instituto de Investigaciones Electricas (Departamento de
Geotermia), Cuernavaca, Morelos, CP 62000, Mexico.
- 24.- Larry Leblanc.
"How to Design a Design a Money Saving Solids Control System".
World Oil. Octubre de 1978.
- 25.- Nelson M.D.
"Removal of Fine Solids from weighted Muds".
Drilling and production Practice. 1970
- 26.- Field L.J, Anderson D.B.
"An Analytical Approach to Removing Mud Solids".
S.P.E 3532. Octubre de 1971
- 27.- Williams michael P. and Hoberock Lawrence L.
"Solids Control for the Man of the Rig".
Parte 1. Octubre de 1982.
Parte 2. Noviembre de 1982.
Parte 3. Diciembre de 1982.
Petroleum Engineer International.
- 28.- Manoj Lal and Hoberock L.L.
"Solids-Conveyance Dynamics and Shaker Performance".
S.P.E. Drilling Engineering. Diciembre de 1989.
- 29.- Hoberock L.L.
"Screen Selection is Key to Shale-Shaker Operation".
Oil and Gas Journal. Diciembre 7 de 1981.
- 30.- Cagle W.S, Wilzer L.B.
"Layered Shale Shaker Screens Improve MUD Solids Control".
World Oil. Abril de 1978.
- 31.- Hoberock, L.L.
"A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids".
Journal of Petroleum Technology. Noviembre de 1980.

- 32.- Berlanga, Juan M.
"Apuntes de Computación Aplicada a la Ingeniería Petrolera".
Facultad de Ingeniería UNAM.
- 33.- Domínguez A, Bernardo, Berasajo de la Mora Francisco J.
"Método Actual para la Apertura e Inicio de Explotación de
pozos en el campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California,
México".
Comisión Federal de Electricidad, Mexicali, Baja California,
México. 1991.