

21
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"EL AIRE COMO FLUIDO DE PERFORACION EN POZOS PETROLEROS"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
GUSTAVO GONZALEZ MARROQUIN



MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1990



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.

EL AIRE COMO FLUIDO DE PERFORACION
EN POZOS PETROLEROS

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| <u>INTRODUCCION.</u> | 3 |
| <u>I.- PERFORACION CON AIRE.</u> | 5 |
| I.1 GENERALIDADES. | 6 |
| I.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS. | 8 |
| I.2.1 Ventajas. | |
| I.2.2 Desventajas. | |
| I.3 EQUIPO EMPLEADO EN LA PERFORACION CON AIRE. | 12 |
| I.3.1 Compresores. | |
| I.3.2 Cabezal Rotatorio. | |
| I.3.3 Tubería de Descarga. | |
| I.3.4 Equipo Preventor de Reventones. | |
| I.3.5 Bomba Dosificadora de Espumante. | |
| I.3.6 Válvulas de Retención. | |
| I.3.7 Medidor de Flujo. | |
| I.3.8 Alarma de Presión. | |
| I.3.9 Múltiple de Válvulas. | |
| I.3.10 Separador de Líquidos. | |
| I.3.11 Barrenas. | |
| I.4 METODO PARA DESPLAZAR EL LODO POR AIRE. | 22 |
| I.5 PROBLEMAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR. | 23 |
| I.5.1 Insuficiente Volumen de Aire. | |
| I.5.2 Ensanchamiento del Agujero. | |
| I.5.3 Desviación del Pozo. | |
| I.5.4 Entrada de Agua. | |
| I.5.5 Daños a la Tubería. | |
| I.5.6 Pegadura de Tubería. | |
| I.5.7 Fuego y Explosiones dentro del Pozo. | |
| I.5.8 Medidas de Seguridad. | |
| <u>II.- REQUERIMIENTOS DE AIRE.</u> | 34 |
| II.1 GENERALIDADES. | 35 |
| II.2 MODELO MATEMATICO DE PRESTON L. MOORE. | 36 |
| II.2.1 Desarrollo del Modelo. | |
| II.3 MODELO MATEMATICO DE R.R. ANGEL. | 42 |
| II.3.1 Desarrollo del Modelo. | |
| II.4 MODELO MATEMATICO DE MC CRAY Y COLE. | 46 |
| II.4.1 Desarrollo del Modelo. | |
| II.5 MODELO MATEMATICO DE SCHOEPPPEL-SAPRE. | 54 |
| II.5.1 Desarrollo del Modelo. | |
| II.6 COMENTARIOS. | 60 |

| | | |
|-----------|--|----|
| III.- | <u>USO DEL AIRE EN FLUIDOS DE BAJA DENSIDAD.</u> | 62 |
| III.1 | PERFORACION CON ESPUMA. | 63 |
| III.1.1 | Características de la Espuma. | |
| III.1.2 | Aplicaciones. | |
| III.1.3 | Ventajas. | |
| III.1.4 | Desventajas. | |
| III.1.5 | Limitaciones de Operación. | |
| III.1.6 | Equipo Empleado. | |
| III.1.7 | Requerimientos de Volumen y Presión. | |
| III.1.8 | Remoción de Sólidos. | |
| III.2 | PERFORACION CON NIEBLA. | 73 |
| III.2.1 | Problemas Asociados. | |
| III.2.2 | Soluciones. | |
| III.2.3 | Equipo Utilizado. | |
| III.3 | PERFORACION CON LODO AIREADO. | 77 |
| III.3.1 | Ventajas y Desventajas. | |
| III.3.2 | Métodos de Aireación. | |
| III.3.2.1 | Método Convencional. | |
| III.3.2.2 | Método de la Tubería Parásita. | |
| III.3.2.3 | Método de la Tubería Concéntrica. | |
| IV.- | <u>EJEMPLO PRACTICO DE APLICACION.</u> | 90 |
| IV.1 | ANTECEDENTES. | 91 |
| IV.2 | OPERACION. | 92 |
| IV.3 | REGISTRO DE BARRENAS. | 96 |
| | <u>CONCLUSIONES.</u> | 97 |
| | <u>BIBLIOGRAFIA.</u> | 99 |

INTRODUCCION

La creciente necesidad de productos derivados del petróleo y las escasas reservas probadas de las zonas conocidas a la fecha, además de los altos costos derivados de la exploración, perforación, extracción y procesos petroquímicos, hace necesaria la investigación de nuevos métodos o procedimientos, equipos y herramientas más eficientes con el objetivo de reducir los costos y aumentar las posibilidades económicas de exploración y perforación de nuevos y más profundos yacimientos de hidrocarburos.

El presente trabajo es una recopilación de investigaciones teóricas y prácticas realizadas por varios autores acerca de un método eficiente y mucho más económico utilizado en la perforación de pozos petroleros. Dicho método es el de uso del aire como fluido de circulación en la perforación de pozos petroleros y su empleo en la preparación de otros fluidos de baja densidad (espuma, niebla, lodo aireado) utilizados para el mismo fin. Cada uno aplicado bajo ciertas condiciones de trabajo y en zonas o formaciones bien definidas.

La utilización del aire ha representado un avance significativo, pues se ha comprobado que la técnica proporciona mayores ritmos de penetración, mayor vida de las barrenas usadas, mejor evaluación de las formaciones y sus fluidos, ningún daño provocado a las mismas y sobre todo, un bajo costo de perforación por concepto de disminución de tiempo equipo

perforando, menos barrenas, menor tiempo y operación en el cambio de las mismas y nulo costo de materiales químicos usados en los lodos convencionales.

Por otro lado, como todo método, procedimiento o técnica empleada en la perforación de pozos, la del aire como fluido de perforación presenta también ciertas desventajas o problemas cuando no se lleva a cabo adecuadamente. Tales desventajas son el riesgo de incendios y explosiones, derrumbes de formaciones deleznales y baja eficiencia de perforación en zonas con alto contenido de agua. Sin embargo, todas estas limitantes pueden resolverse al utilizar los fluidos hechos a base de aire, como son las espumas y la niebla.

La perforación con aire se inició a finales de la década de 1940, teniendo como aspecto más importante el cálculo adecuado de los volúmenes requeridos para lograr un levantamiento efectivo de los recortes y una limpieza total del fondo del agujero. El Capítulo II expone los modelos matemáticos de cuatro autores y sus consideraciones para la determinación de volúmenes y presiones de aire requeridos para desarrollar la técnica.

Aún cuando las técnicas de perforación con aire han mejorado, la implantación del sistema ha sido escasa pues el hecho indispensable de estudios confiables de las zonas o formaciones donde se aplicará y el poco adiestramiento del personal de operación, hacen que los trabajos de perforación con aire no sean comúnmente usados.

CAPITULO I

PERFORACION CON AIRE

En las operaciones de perforación de pozos petroleros se hace necesario utilizar un fluido que sea el medio por el cual se desalojen los recortes o esquirlas de las rocas o formaciones que se atraviesan, de tal manera que lleguen a la superficie para analizarlas, estudiarlas y deshecharlas. Dentro de estos fluidos se puede mencionar al lodo, al agua, al gas, la espuma, la niebla y por supuesto al aire, que es el tema del presente trabajo.

Al igual que todo fluido de perforación, el aire debe cumplir los siguientes requerimientos:

- a) Que tenga la velocidad adecuada para levantar los cortes de perforación del fondo a la superficie y mantenga perfectamente limpio el agujero.
- b) Que mantenga estables las paredes del pozo en zonas blandas y deleznales.
- c) Que tenga la densidad y presión adecuadas para controlar las presiones de formación.
- d) Debe lubricar y enfriar la barrena para evitar su deterioro prematuro, pues la barrena trabaja por abrasión sobre las rocas sufriendo un calentamiento excesivo.
- e) Que no dañe las formaciones perforadas, puesto que serán estudiadas y evaluadas para obtener resultados más confiables.

- f) Que no sea corrosivo ni tóxico.
- g) En cuanto a economía, se puede decir que el aire es el fluido más económico que existe.

Para llevar a cabo un óptimo programa de perforación es necesario realizar un perfecto estudio del área por desarrollar mediante el uso del aire como fluido de perforación. Dicho estudio comprende los datos obtenidos por geología superficial y las correlaciones hechas con datos obtenidos de pozos vecinos de la misma zona. Toda la información obtenida debe ser lo más confiable posible, ya que de eso depende el éxito de la operación.

El contenido de la información debe ser basado en los siguientes puntos:

- a) Características litológicas de las formaciones por perforar.
- b) Formaciones con alto contenido de agua.
- c) " deleznable.
- d) " de alta permeabilidad donde ocurran pérdidas de circulación con lodo convencional.
- e) Correlaciones geológicas y operacionales con los pozos vecinos.
- f) Formaciones de presión anormal alta.

El aire se utiliza generalmente en la perforación de formaciones con baja presión y en formaciones donde se presentan pérdidas de circulación cuando se usa lodo, por lo que el mayor problema para la implantación de este sistema lo constituyen las

formaciones con alto contenido de agua y las formaciones deleznable, que reducen la eficiencia del método. Se hace imprescindible entonces que el programa de perforación del pozo considere estas limitantes y realice las medidas adecuadas de solución.

Cuando las formaciones son secas o si el flujo de agua es pequeño (menos de 75 bl/hr) y es absorbido por la corriente de aire, los cortes de perforación salen a la superficie en forma de polvo, obteniéndose un alto ritmo de penetración y mayor economía.

Si el sistema de perforación con aire se implanta en una zona adecuada y se observa una baja eficiencia, la causa más frecuente es la insuficiencia de volumen de aire requerido para limpiar el agujero a altas velocidades de penetración. Conforme se profundiza el pozo, es necesario aumentar, mediante los compresores, el volumen de aire para mantener una velocidad anular óptima y llevar los cortes hasta la superficie. En capítulos posteriores de este trabajo se analizan con más detalle dichos problemas.

1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Todo procedimiento o método de perforación presenta sus ventajas bajo ciertas condiciones y sus desventajas bajo otras diferentes. La técnica utilizando aire no es la excepción, por lo que se mencionan sus ventajas y desventajas.

1.2.1 VENTAJAS.

El desarrollo de este sistema de perforación de pozos petroleros, si se lleva en forma adecuada, proporciona las siguientes ventajas:

- a) Se obtiene principalmente un incremento en la velocidad de penetración debido a que, por la baja densidad y reducida carga hidrostática ejercida por la columna de aire, la roca perforada que se encuentra sometida a esfuerzos verticales y axiales, sufre un efecto de presión inversa explotando al momento que la barrena hace contacto con ella. Esto aumenta la perforabilidad de la roca y, por tanto, el ritmo de penetración, disminuyendo el tiempo de operación del equipo y reduciendo los costos.

Algunas pruebas de campo graficadas en la Fig.1 muestran el efecto que tiene la contrapresión ejercida por la columna de fluido sobre la velocidad o ritmo de perforación. En la Fig.2 se muestra la relación que tiene la presión diferencial (Diferencia que existe entre la presión ejercida por la columna de aire y la presión de formación) sobre la velocidad de penetración cuando se perfora con lodo.

En las Figs.3 y 4 se muestran comparaciones de los tiempos de perforación gastados utilizando gas, lodo, aire y agua como fluidos de perforación.

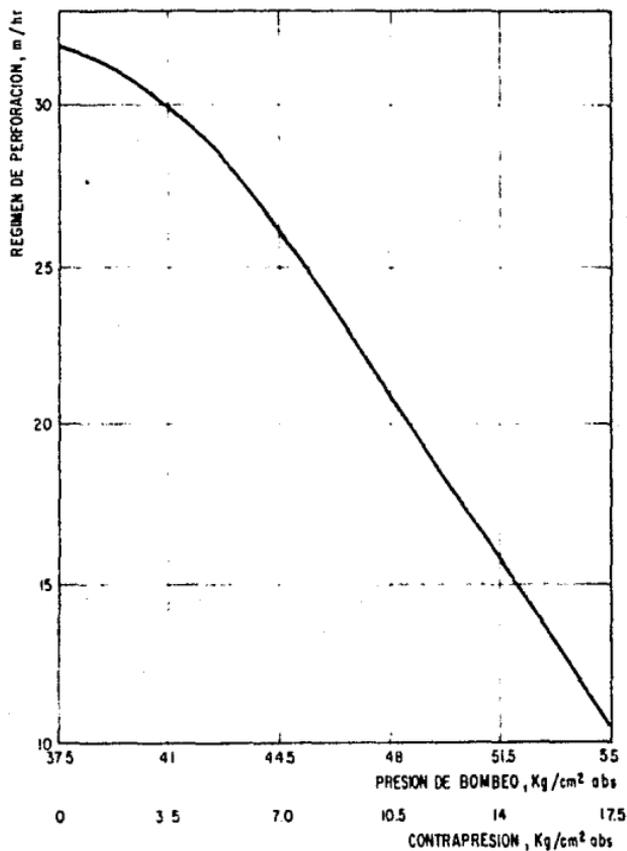


FIG. 1 EFECTO DEL AUMENTO DE LA CONTRAPRESION SOBRE LA VELOCIDAD DE PERFORACION

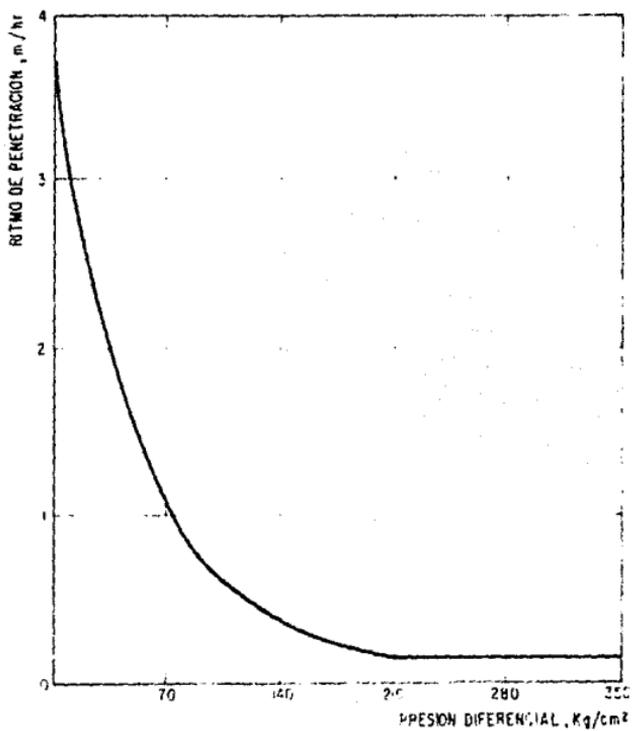


FIG. 2 EFECTO DE LA PRESION SOBRE EL RITMO DE PERFORACION

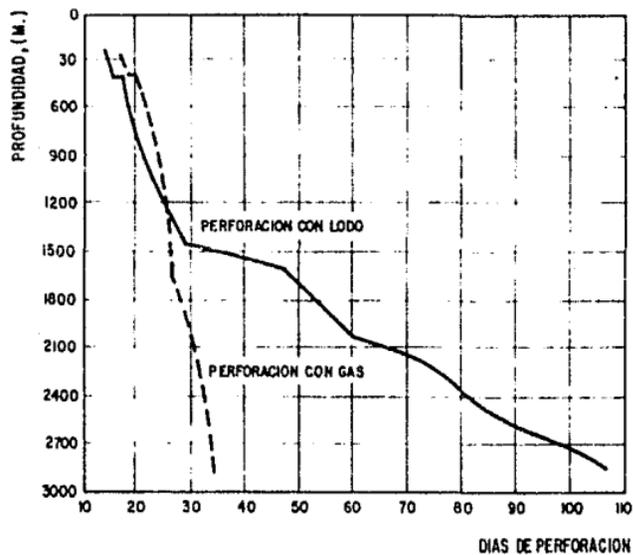


FIG. 3 COMPARACION DE LOS TIEMPOS DE PERFORACION UTILIZANDO GAS Y LODO

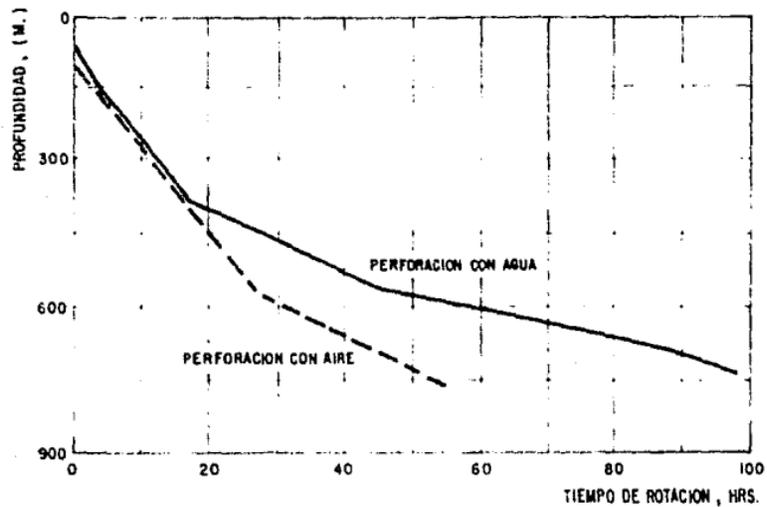


FIG. 4 COMPARACION DE LOS TIEMPOS DE PERFORACION UTILIZANDO AGUA Y AIRE

- b) Utilizando el aire como medio de circulación se obtienen mejores resultados de enfriamiento de la barrena, aumentando su vida útil y reduciendo el costo por menor número de barrenas usadas y por concepto de menor tiempo de operación de viajes al cambio de las mismas.
- c) Por la nula contaminación a los núcleos de perforación obtenidos del pozo, el aire permite su fácil estudio y análisis con resultados confiables. Dicho análisis tiene como objetivo la determinación de las características de las formaciones perforadas y los fluidos contenidos en ellas. Los resultados obtenidos utilizando aire como fluido de perforación serían mucho más representativos que si se utiliza lodo, debido a la contaminación de los productos químicos contenidos en el lodo.
- d) En zonas con formaciones de alta permeabilidad debido a su textura, a fracturas naturales o inducidas o debido a cavernas, se tiene generalmente pérdidas de circulación cuando se utilizan fluidos de perforación de alta densidad, haciendo necesario colocar tuberías de revestimiento para aislar esas zonas, aumentando los costos y reduciendo diámetro y profundidad programados para terminación del pozo. Para solucionar este problema de pérdida de circulación es necesario utilizar fluidos de baja densidad. El aire es el fluido indicado por su menor densidad y bajo costo.

- e) Cuando se perforan zonas o formaciones de muy baja presión, el uso del aire es el adecuado por su baja densidad y menor carga hidrostática, evitando mayor daño a la formación y aumentando su productividad.
- f) Con el uso del aire, los costos de perforación se abaten a un mínimo, ya que no requiere de productos químicos para su preparación y mantenimiento.

1.2.2 DESVENTAJAS.

Las desventajas también acompañan a este método. Del estudio confiable de las zonas a perforar depende su eliminación. Tales desventajas son:

- a) La posibilidad de explosiones e incendios al perforar formaciones que contengan gas. El gas, al mezclarse con el aire de perforación, forma un ambiente combustible que podría incendiarse o explotar en el caso de que se formen chispas al perforar las rocas con la barrena o al momento de la fricción del metal con metal de las herramientas usadas.
- b) El aire no es recomendable cuando se perforan formaciones con alto contenido de agua, pues provocaría que los cortes aumentaran de peso y se disminuyera la capacidad de acarreo de los cortes, cayendo estos al fondo y atrapando la tubería de perforación.

- c) Una velocidad elevada en el espacio anular ocasionaría erosión en las paredes del pozo aumentando su diámetro. Una velocidad baja disminuiría la capacidad de limpieza del agujero, cayendo los cortes al fondo, atascando la barrena y disminuyendo el ritmo de penetración y aumentando el tiempo de perforación.

1.3 EQUIPOS EMPLEADOS EN LA PERFORACION CON AIRE.

No existe una diferencia muy significativa entre los equipos de perforación que utilizan lodo y los que utilizan aire como fluido de circulación. El equipo convencional de perforación de pozos que usa lodo como fluido de circulación, es posible utilizarlo para perforar con aire si, además de todas sus partes integrantes, se le instalan los siguientes implementos y accesorios para habilitarlo a las operaciones del sistema.

1.3.1 COMPRESORES.

Al igual que las bombas de lodos son para los equipos convencionales, los compresores en este sistema son necesarios para suministrar los gastos de aire requeridos y a la presión necesaria para obtener una velocidad adecuada en el espacio anular y lograr acarrear los recortes limpiando el pozo. El número y capacidad de los compresores se determina en base a los requerimientos de volumen y presión de aire que se circulará al

pozo para obtener su limpieza. Generalmente se utilizan tres compresores de doble acción, reciprocantes de dos o tres etapas. Cada compresor debe proporcionar hasta 3000 pie³/min y de 150 a 1200 psia de presión máxima. Los compresores deberán colocarse en paralelo a una distancia mínima de 150 pies del pozo en posición favorable a los vientos dominantes y en la parte contraria a la línea de descarga.

Se utilizan además compresores secundarios cuando los principales no alcanzan a suministrar la presión requerida y es necesario recomprimir el aire. Dichos compresores deberán instalarse en serie con los compresores primarios.

En las Figs.5 y 6 se muestran los arreglos de los compresores y demás implementos del sistema de perforación con aire y su disposición en la localización del pozo.

Las líneas instaladas de los compresores al tubo vertical deberán cumplir los siguientes requisitos:

- a) Ser de un diámetro grande para minimizar las pérdidas de presión por fricción.
- b) Contener una válvula de alivio de presión para protegerse de presiones demasiado altas para los compresores y otros equipos.
- c) Llevar una válvula de retención para prevenir que cualquier líquido existente en la línea regrese y dañe al compresor.
- d) Estar equipada con manómetros de presión confiables y seguros.

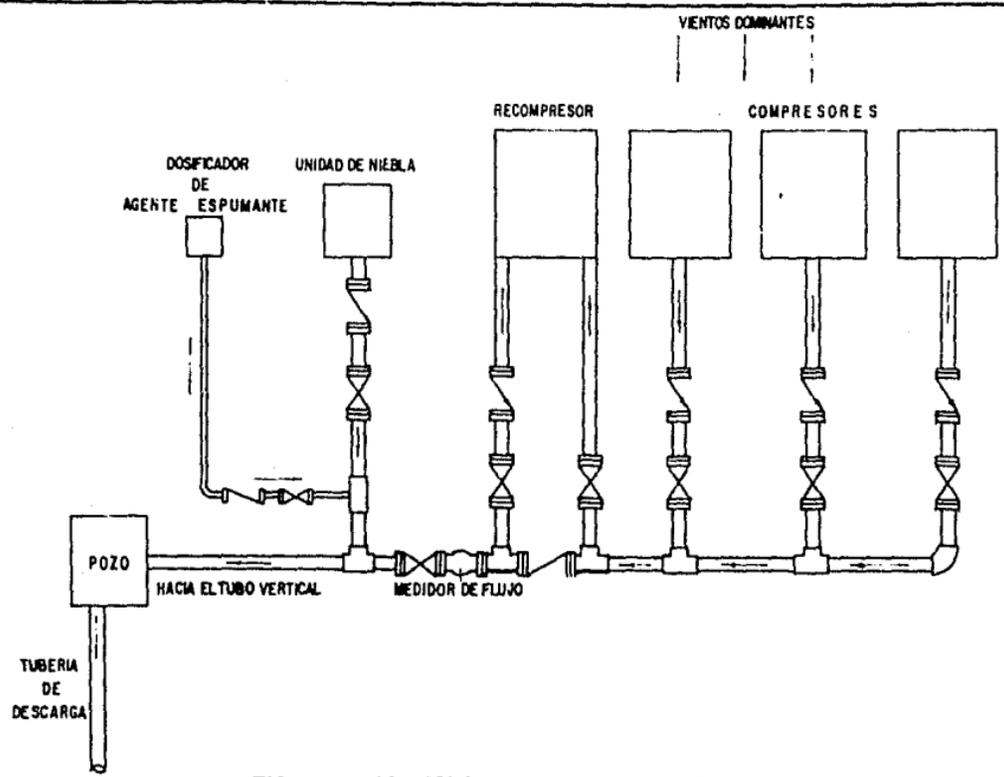


FIG. 5 ARREGLO DE COMPRESORES Y EQUIPO EN LA LOCALIZACION.

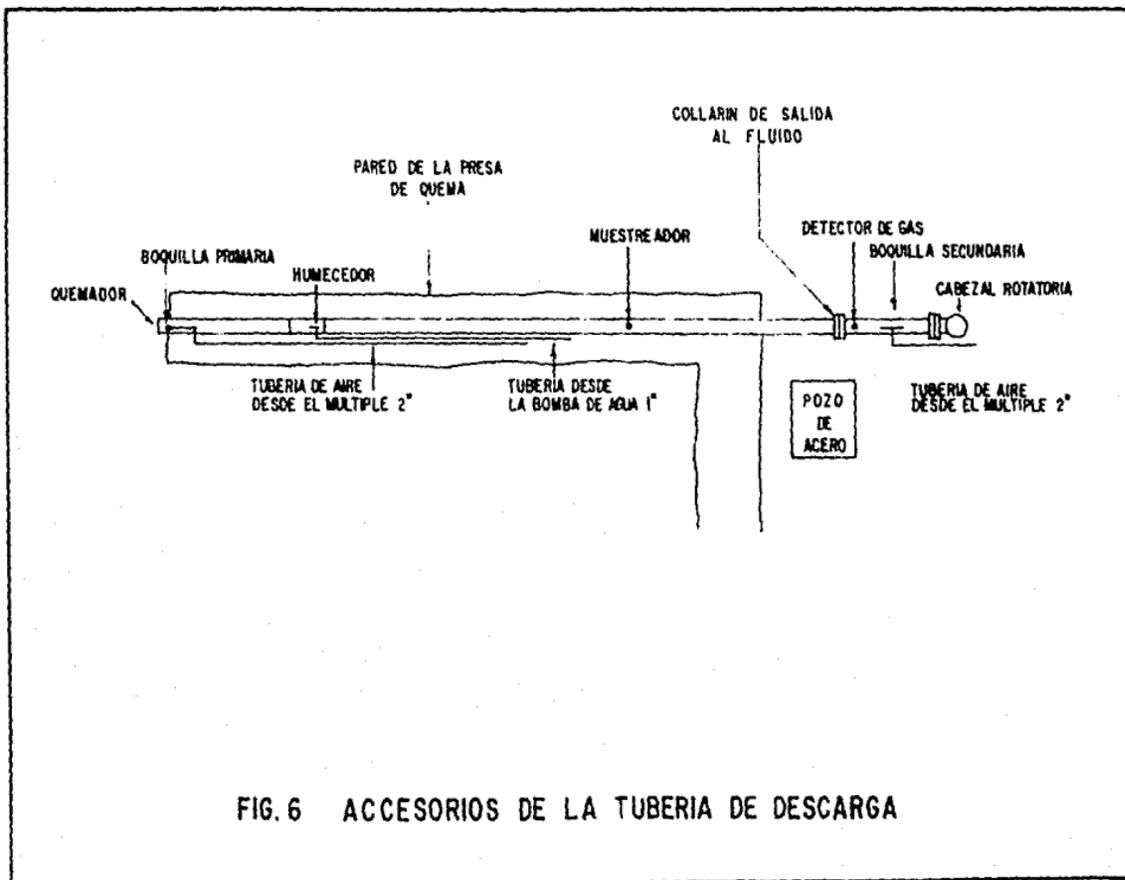


FIG. 6 ACCESORIOS DE LA TUBERIA DE DESCARGA

- e) Tener conexiones de la línea de salida hacia la cabeza de la tubería con prensaestopa para circulación inversa si es necesario.
- f) Incluir una válvula en el tubo vertical para que pueda bombearse lodo en caso necesario sin utilizar la línea de aire.
- g) Conectarse a través de una línea de alivio hacia la descarga cuando los compresores no sean necesarios durante cualquier operación de conexión. Una válvula de tres pasos o dos válvulas normales para éste propósito, permiten al personal controlar el flujo de aire desde el piso todo el tiempo.

1.3.2 CABEZAL ROTATORIO.

El uso de este implemento es de vital importancia ya que evita que el polvo y cortes provenientes del pozo invadan el piso de trabajo afectando al personal y al equipo de trabajo.

El cabezal rotatorio se instala entre la mesa rotaria y los preventores. Consiste de dos elementos:

- a) Un elemento rotatorio que permite girar conjuntamente con la tubería de perforación, Fig. 7.
- b) Otro elemento fabricado en hule que mantiene un sello constante alrededor de la sarta de perforación. No opera para herramientas de mayor diámetro como barrenas, lastrabarrenas o escariadores.

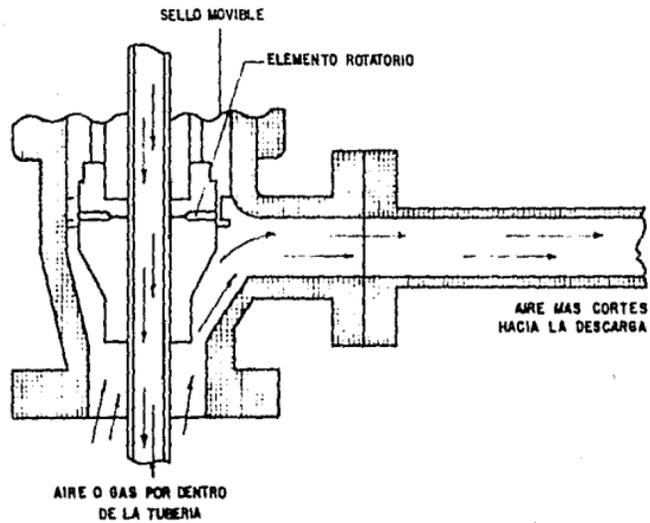


FIG. 7 CABEZAL ROTATORIO

Para aumentar la eficiencia y evitar que las partes de hule sean dañadas, es necesario alinear correctamente el cabezal rotatorio con la mesa rotaria. Además se hace necesario el uso de lubricantes aplicados sobre la tubería para facilitar su deslizamiento por los sellos de hule.

Al efectuar los viajes para cambio de barrena o de alguna otra herramienta, es necesario retirar el elemento de hule junto con los primeros tramos de tubería y volverlos a colocar una vez terminada la operación.

1.3.3 TUBERÍA DE DESCARGA.

El objeto de esta línea de descarga es el de conducir el polvo y los productos de perforación que salen del pozo, a una distancia tal del mismo, que no perjudique al personal ni al equipo. Además debe cumplir con las siguientes especificaciones de la AAODC:

- a) Debe ser de gran diámetro (7" a 10") para asegurar la descarga de los recortes.
- b) Deberá anclarse y soldarse con seguridad y sujetarse al terreno para evitar movimientos bruscos al aumentar los esfuerzos.
- c) Deberá extenderse con un mínimo de 300 pies fuera del pozo.
- d) Deberá ser lo recta posible para evitar daños por abrasión de la corriente de polvo.

e) Deberá tenderse en la misma dirección y sentido que los vientos predominantes, por lo tanto, al lado opuesto de los compresores.

A ésta tubería deberán instalarse los siguientes accesorios, como se muestra en la Fig.6:

1) Boquillas Primaria y Secundaria.

Las boquillas son utilizadas para suprimir el aire del piso de trabajo durante las operaciones de conexión y desconexión de las herramientas. El aire es suprimido creando un vacío dentro de la tubería de perforación con auxilio de los compresores. La boquilla primaria es la que opera normalmente, instalándose al final de la línea de descarga, a una distancia equivalente a 4 veces el diámetro externo de la tubería, medida a partir del extremo final de la misma, Fig.6.

La boquilla secundaria es utilizada solo en los casos en que la primaria sufra algún daño y no opere correctamente. Este dispositivo se coloca cerca del pozo, Fig.6.

Las válvulas que operan estas boquillas se encuentran colocadas en el múltiple del piso y se conectan mediante dos líneas. Ambas boquillas se presentan en la Fig.8.

2) Humedecedor.

Es un dispositivo atomizador de agua colocado para humedecer el polvo y cortes de perforación, evitando que se formen nubes de polvo que afecten al personal y al equipo, Fig.9.

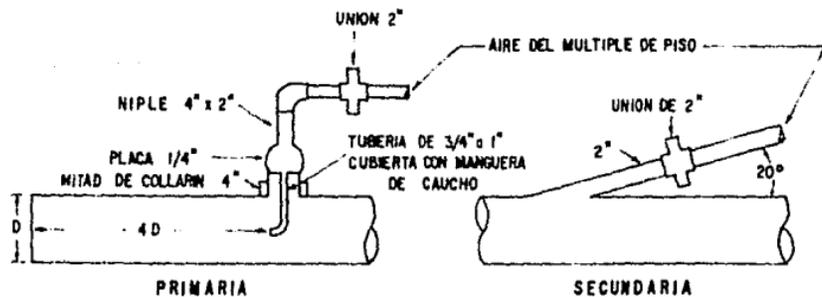


FIG. 8 BOQUILLAS PRIMARIA Y SECUNDARIA

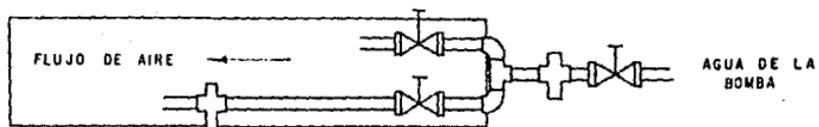


FIG. 9 HUMEDECEDOR

3) Muestreador.

Es un dispositivo con válvula macho de baja presión, de 3" de diámetro y 40 ó 50 cm de largo, con un corte a 60° que permite recoger muestras de recortes para su análisis y determinación de tipo y propiedades de la formación perforada, Fig.10. Se instala antes del humedecedor Fig.6.

4) Detector de Gas.

Es un dispositivo similar al utilizado en la perforación con lodo. Se instala en la tubería de descarga con el propósito de detectar hasta la más mínima cantidad de gas contenida en la corriente de polvo proveniente del pozo, Fig.6. Como ya se mencionó, una de las desventajas ó limitantes al uso del sistema de perforación con aire es la presencia del gas de formación, por lo que éste dispositivo es de suma importancia en la prevención de incendios y explosiones.

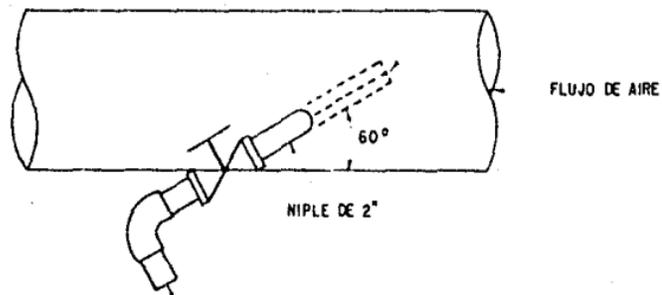
5) Quegador.

Se coloca al final de la tubería de descarga con el objetivo de quemar cualquier cantidad de gas que pudiera contener la corriente de polvo. Está provisto de un piloto que se mantiene encendido todo el tiempo que dure la operación y se apaga en cuanto ésta finaliza, Fig.6.

1.3.4 EQUIPO PREVENTOR DE REVENTONES.

Este equipo no difiere mucho de los que se utilizan en la perforación con lodo convencional. Generalmente se emplea un arreglo de preventores de doble ariete. En la Fig.11 se muestra el arreglo típico para TR de 13 3/8".

ANGULO DE ACERO EN EL INTERIOR
DE LA LINEA DE DESCARGA



DESCARGA SIMPLE

FIG.10 MUESTREADOR

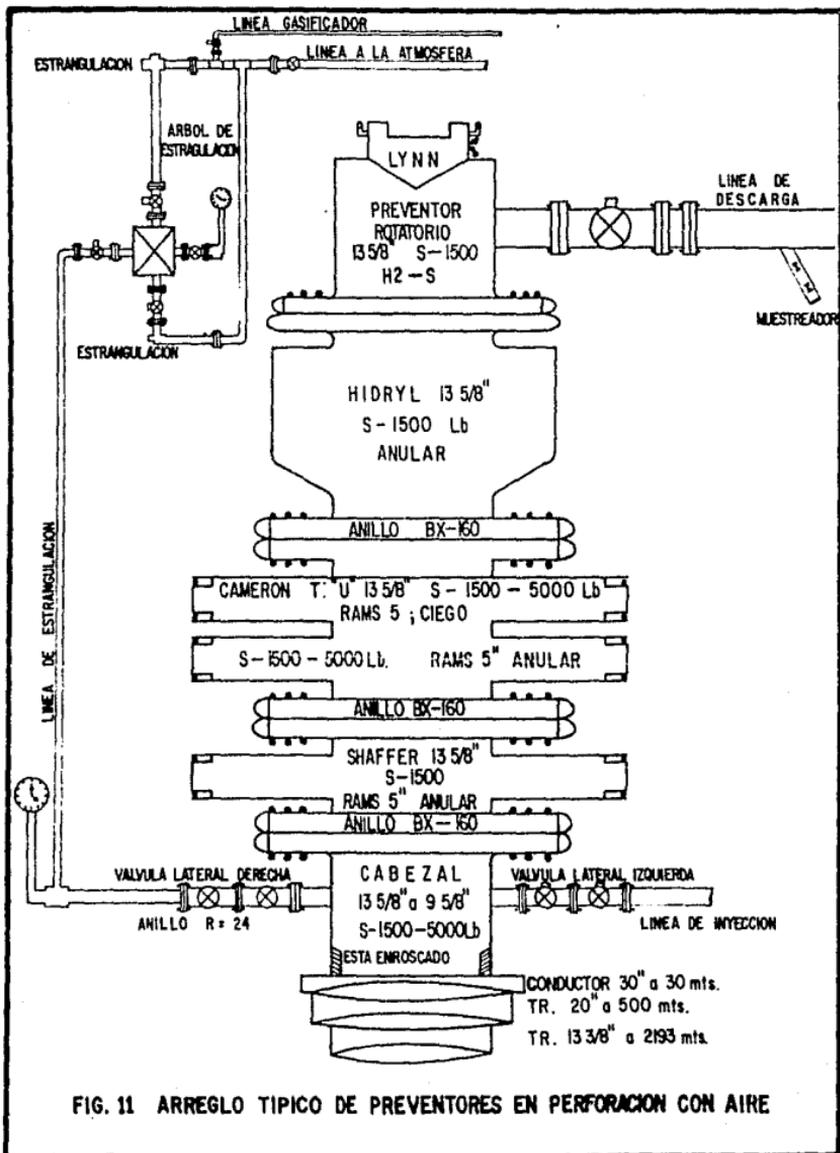


FIG. 11 ARREGLO TÍPICO DE PREVENTORES EN PERFORACION CON AIRE

1.3.5. BOMBA DOSIFICADORA DE ESPUMANTE.

Cuando al utilizar el aire como fluido se perforan zonas o formaciones con cierta cantidad de agua, se hace necesario la inyección de agente espumante a la corriente de aire, a fin de mejorar la capacidad de arrastre. Para ésto, se emplea una bomba triplex de 40 ó 50 HP capaz de manejar de 25 a 35 gal/min a una presión mayor que la del aire del sistema, Fig.5.

1.3.6 VALVULAS DE RETENCION.

Se hace uso de dos válvulas: una que se instala sobre la barrena y dentro de la doble-caja para prevenir alguna entrada imprevista de fluido de la formación hacia el interior de la tubería de perforación, evitando el depresionamiento del aire en el espacio anular. Para instalar esta válvula, se hace necesario maquinarse un rebaje a la doble caja porta-barrena. La otra válvula se coloca cerca de la superficie, a una profundidad del segundo o tercer tramo, con el objeto de evitar que el aire comprimido dentro de la tubería de perforación se descargue al momento de realizar operaciones de conexión y desconexión. Esta segunda válvula se instala en una combinación con rebaje maquinado, y el tramo superior de esta combinación deberá ser de diámetro menor que el diámetro exterior de la válvula, para evitar que salga de su lugar.

1.3.7 MEDIDOR DE FLUJO.

Es un dispositivo empleado para medir el gasto y volumen de aire que pasa por la línea de inyección al pozo. Consiste de una placa de orificio que se instala a una distancia de 20 veces el diámetro exterior de la línea a partir de los compresores Fig.5.

1.3.8 ALARMA DE PRESION.

Será necesario colocarla en un lugar visible del piso de trabajo del equipo y con señal audible. Dicha alarma deberá indicar cualquier incremento de presión de 5 a 10 psi al estar perforando.

1.3.9 MÚLTIPLE DE VALVULAS.

Se encuentra soldado al tubo vertical sobre el piso del equipo. Las válvulas y líneas deberán ser de diámetro y resistencia adecuadas, de tal manera que manejen gastos y presiones requeridas con la menor caída de presión por fricción. Este múltiple permite combinar las direcciones de flujo de los compresores al pozo, de las bombas de lodo al pozo (en caso necesario) y realizar cualquier otra operación de cambio de vías para alguna actividad específica Fig.12.

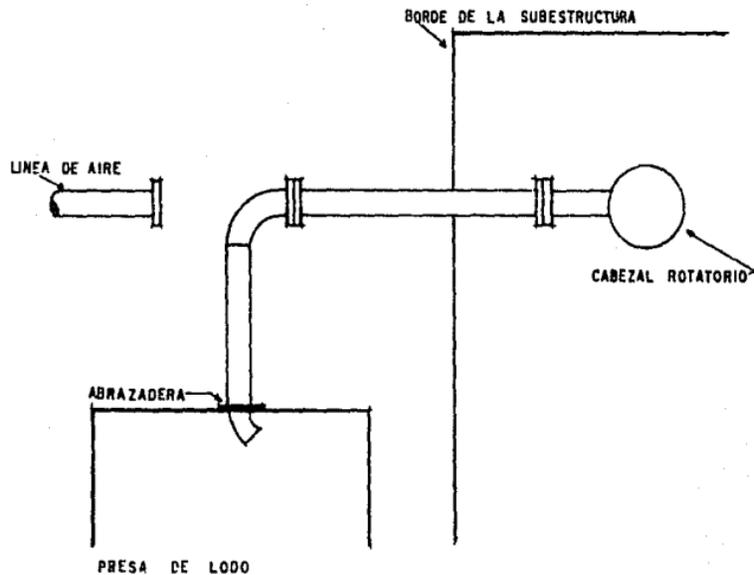


FIG. 12 CONEXIONES PARA CAMBIO DE AIRE A LODO

1.3.10 SEPARADOR DE LIQUIDOS.

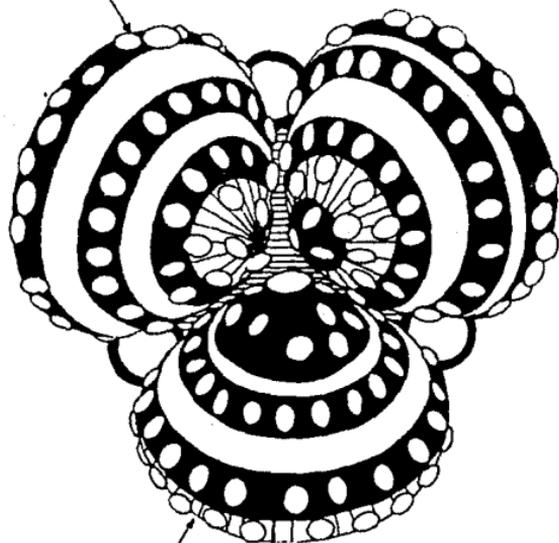
Se instala en los lugares donde el medio ambiente es húmedo, colocándose después de la salida de los compresores primarios, con el objeto de proporcionar a los compresores secundarios aire seco y libre de liquido que afecte las lecturas del medidor de flujo al determinar el volumen de aire inyectado al pozo.

1.3.11 BARRENAS.

Las barrenas utilizadas en el sistema de perforación con aire no difieren en mucho de las que se utilizan en los sistemas convencionales. Los tipos de barrenas son los siguientes:

- a) Barrenas con Insertos de Carburo de Tungsteno, de conos con baleros sellados que impiden que el polvo o los cortes entren a ellos, dañándolos y evitando el giro de los conos, Fig.13.
- b) Barrenas de Chumacera, también sellada y que ha resultado satisfactoria en la perforación con aire.
- c) Barrenas de Chorro de Aire, diseñadas específicamente para la perforación con aire. Este tipo de barrenas son utilizables también en la perforación con niebla o espuma como medio de circulación. Están provistas de conductos para circular el aire o niebla a través de los baleros no sellados para enfriarlos, lubricarlos y mantenerlos limpios. Se colocan filtros de tela metálica sobre la entrada de aire evitando que los cortes pasen hacia los baleros, Fig.14.

MEJOR CALIBRE PRINCIPAL



MEJOR CALIBRE SECUNDARIO

**FIG. 13 BARRENA DE INSERTOS PARA PERFORACION
CON AIRE.**

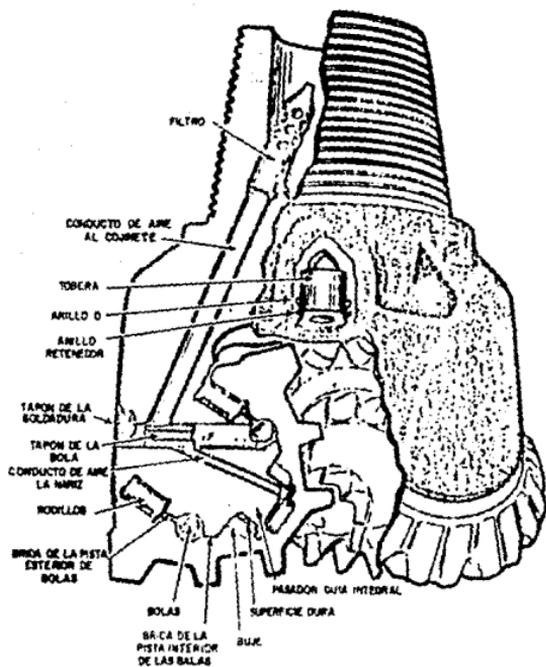


FIG.14 BARRENA PARA PERFORACION CON AIRE

La reducción del diámetro y calibre de las barrenas es el mayor problema que se presenta en su empleo para la perforación con aire. Esto significa que los dientes externos de la barrena, que son los que proporcionan el calibre, se desgastan y se perfora un diámetro menor que el deseado. Este hecho se presenta principalmente al perforar formaciones duras y abrasivas, cuando se emplea una barrena inadecuada, cuando se trabaja más tiempo del estimado para la barrena o cuando la velocidad de rotación es mayor que la que soporta la barrena.

Los problemas citados son fácilmente solucionados si se utiliza la barrena adecuada para la formación en particular, con el apropiado número de hileras exteriores de dientes o insertos de carburo de tungsteno. Puede además, colocarse un recubrimiento de carburo de tungsteno en la superficie de los conos y en la parte final de los faldones de la barrena. Cuando se usan barrenas de dientes maquinados el recubrimiento de carburo de tungsteno se hace sobre todo el cuerpo de los conos.

El uso apropiado de la barrena adecuada reduce los costos al utilizar menos barrenas y menor tiempo de operación al cambio de las mismas.

1.4 METODO PARA DESPLAZAR EL LODO POR AIRE.

El método para desplazar el lodo contenido en el pozo, secar el agujero y comenzar a perforar con aire es el siguiente:

- 1.- Bajar la barrena hasta el fondo del agujero.
- 2.- Iniciar la circulación bombeando lodo lentamente a gastos reducidos de $1\frac{1}{2}$ a 2 bl/min para reducir las caídas de presión por fricción.
- 3.- Utilizando un compresor, airear la columna de lodo contenida en el pozo en el pozo. El aire se inyectará lentamente para obtener una distribución homogénea del aire en el lodo.
- 4.- Puesto que la columna de lodo sufrirá una disminución en su peso, se registrará una baja presión en el manómetro; será necesario aumentar lentamente la inyección de aire mediante los compresores restantes con el objeto de mantener la presión requerida.

Otro procedimiento para lograr la aireación de lodo y mantener la presión es desplazando el lodo bombeando alternadamente lodo y aire al pozo, aumentando el gasto de aire y disminuyendo el de lodo a la vez, hasta que se logre completamente la circulación con aire y el control seguro del pozo.
- 5.- La bomba dosificadora de espumante deberá estar disponible para el caso necesario, cuando existan indicadores de agua en la formación.
- 6.- Una vez controlado el pozo, circular con aire y limpiarlo.

- 7.- Perforar de 20 a 100 pies para permitir que cualquier derrumbe de las paredes del agujero pueda limpiarse y se observe que no presenta alguna interrupción en la salida de cortes y polvo.
- 8.- Detener la perforación y limpiar el pozo circulando una mezcla de aire-espumante. El tiempo de ésta operación varía de 15 a 20 minutos hasta que la mezcla aire-espumante salga limpia a la superficie.
- 9.- Secar el pozo circulando aire por $\frac{1}{2}$ ó 1 hora. Los gastos requeridos para ésta operación son los mismos que se usarán durante la perforación.
- 10.- El pozo se encuentra en condiciones de operación con aire como fluido de perforación.
Dependiendo de la profundidad y condiciones de humedad del pozo, la duración de éste procedimiento es de 2 a 18 horas.

1.5 PROBLEMAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR.

Toda operación de perforación de pozos, ya sea utilizando lodo o aire como fluido, requiere del mayor cuidado para prevenir o detectar a tiempo los posibles problemas, logrando disminuir los riesgos y por consiguiente, reducir los costos de equipo y materiales usados para corregirlos.

Algunos de los problemas más comunes presentados en las experiencias de perforación con aire se mencionan a continuación.

1.5.1 INSUFICIENTE VOLUMEN DE AIRE.

Es el principal problema que hace que las operaciones de perforación con aire fracasen, ya que no se circula un volumen de aire a cierto gasto y no se logra la limpieza total del pozo. A medida que el pozo se hace más profundo, se hace necesario aumentar el gasto de aire para mantener la velocidad requerida de 3000 pie/min en el espacio anular para levantar los cortes a la superficie y evitar que se precipiten al fondo. Debido a que la capacidad del aire para levantar los recortes es proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad en el espacio anular, y como la densidad aumenta con el peso de los sólidos y la carga aumenta con la profundidad, la presión y el gasto de inyección de aire deben incrementarse. En caso de que los compresores disponibles en el pozo sean insuficientes para mantener gasto presión, se recomienda disminuir el área anular aumentando el diámetro de la tubería o disminuyendo el diámetro de la barrena.

El procedimiento para identificar si el gasto, presión y velocidad del aire son los adecuados es el siguiente:

- 1) Detener la perforación.
- 2) Circular aire y tomar el tiempo en que los últimos cortes llegan a la superficie.
- 3) Comparar el tiempo con el recomendado por los autores, que es de alrededor de 1 minuto cada 300 m de profundidad. Si éste tiempo se eleva, es indicador que se debe aumentar el gasto o que el pozo se agrandó por efecto abrasivo de los cortes sobre las paredes de pozo.

1.5.2 ENSANCHAMIENTO DEL AGUJERO.

Este grave problema se puede provocar de dos maneras:

- a) Por el efecto erosivo de los cortes o sólidos suspendidos en el aire circulado a alta velocidad, las paredes sufren una pulida, aumentando el diámetro del pozo.
- b) La baja presión hidrostática por la baja densidad del aire, aumenta la presión diferencial y provoca derrumbes en pozos de formaciones suaves y deleznales.

Para evitar el ensanchamiento del pozo debido a la abrasión de los cortes por alta velocidad del aire, es necesario calcular y determinar con precisión los gastos de aire adecuados para mantener la velocidad mínima recomendada en el espacio anular que permita la limpieza del agujero.

La ampliación del pozo provoca que los cortes se acumulen en las partes anchas, disminuyendo su salida a la superficie. La disminución de cortes en la superficie puede ser erróneamente atribuida a una posible entrada de agua al pozo, creyendo necesaria la inyección de agente espumante. Este hecho hace que se aumenten los requerimientos de aire, disminuya la velocidad de penetración y se aumenten los costos de perforación.

I.5.3 DESVIACION DEL POZO.

La desviación del pozo es un aspecto que requiere la constante vigilancia en las operaciones de perforación. Los métodos de control de la verticalidad del agujero son los mismos que se utilizan en la perforación convencional. Las herramientas usadas en la sarta de perforación y los aparatos de medición para la desviación del pozo son los mismos para cualquier método de perforación.

En la Fig.15 se muestran algunas herramientas empleadas para el control de la verticalidad del agujero.

I.5.4 ENTRADA DE AGUA.

Debido a la naturaleza de las formaciones perforadas en zonas que contienen agua, este problema se hace más severo. La magnitud del flujo de agua depende de la saturación y permeabilidad de las formaciones.

Cuando se perforan formaciones con aportación baja de agua (menos de 75 bl/hr), la operación continúa normalmente; tan solo con aumentar el gasto de aire se logra una alta velocidad anular y la consecuente limpieza del pozo. En este caso es necesario verificar continuamente en el manómetro la presión con el fin de detectar cualquier aglutinamiento de cortes alrededor de la sarta de perforación.

INDICE:

- 1. LASTRABARRENA REDONDO.
- 2. LASTRABARRENA CUADRADO.
- 3. ESCARIADOR.
- 4. ESTABILIZADOR CON HOM-
BROS SUSTITUIBLES.
- 5. LASTRABARRENA CUADRADO
CORTO.
- 6. SUSTITUTO DE CIRCULACION.
- 7. MARTILLO DE PERCUSION.

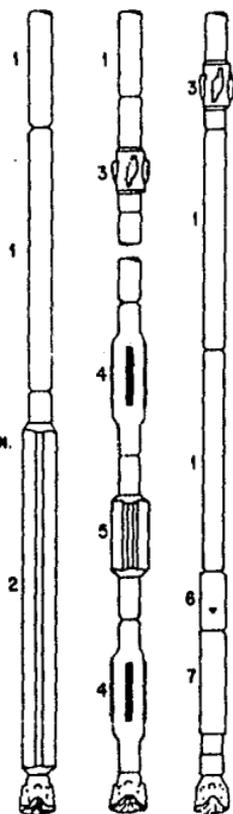


FIG. 15 HERRAMIENTAS DE FONDO PARA EL CONTROL DE LA DESVIACION.

Ahora, cuando el flujo de agua es considerable (de 75 a 100 bl/hr), se requiere la inyección de agente espumante a la corriente de aire. El agente viaja suspendido en el aire hasta el fondo, donde, debido a la turbulencia y al agua existente, se forma una espuma (aire, agua y agente espumante) logrando remover el agua y los cortes perforados.

La dosificación de agente espumante dependerá de la cantidad y composición del agua, del diámetro y la profundidad del pozo y de la estabilidad de la formación perforada.

Otra solución al problema de entrada de agua es el empleo de materiales obturantes tales como: cemento, plástico o materiales químicos. La correcta evaluación de la formación o zona que aporta el agua y la habilidad del operador en usarlos, son los parámetros para determinar la aplicación de dichos materiales obturantes. Además, para aplicarlos se hace necesario volver al sistema convencional de perforación con lodo.

Dentro de los principales aspectos que comprende la entrada de agua como un problema en la perforación con aire, se pueden mencionar los siguientes:

- 1) La entrada de agua hace necesario incrementar la velocidad anular aumentando el gasto, por lo que el equipo de compresión deberá ser de tal capacidad para cubrir esos requerimientos extras, aumentando su costo.

- 2) Cuando existan lutitas en formaciones superiores a la que aporta el agua, es posible que se ocasionen derrumbes provocando pegaduras y atrapamiento de tubería.
- 3) Una gran cantidad de agua y su composición puede resultar en serios problemas de corrosión de tubería y de accesorios. Para ésto, se hace necesario el uso de inhibidores de corrosión y en ocasiones se inyecta agua saturada con cal o con sosa cáustica, manteniendo un PH de 10.5 para proteger la tubería contra la oxidación.

1.5.5 DAÑOS A LA TUBERÍA.

El mayor daño que se provoca a la tubería de perforación lo causa el efecto erosivo de los cortes que viajan en la corriente de aire y se presenta principalmente en las juntas. Para evitar o disminuir dicho daño, es necesario recubrir las juntas con bandas de metal con capas de perdigones de aleación de acero o de carburo de tungsteno

Cuando los lastrabarreras sean dañados excesivamente por éste concepto, se puede tener peligro de crear el problema de desviación del pozo. Es recomendable, por tanto, la inspección de la sarta de perforación toda vez que se tenga oportunidad.

1.5.6 PEGADURA DE TUBERÍA.

Las causas principales de éste problema son las siguientes:

- 1) Aglutinamiento de los cortes alrededor de la tubería cuando se perforan formaciones húmedas.

- 2) Derrumbes de formaciones deleznales.
- 3) Desviaciones de alto grado, como las "patas de perro" o los "ojos de llave".

Una vez que se tiene el problema y para minimizarlo y/o eliminarlo, se debe jalar y soltar suavemente la tubería, sin exceder su resistencia, con movimientos alternados, circulando aire para liberarla. En ocasiones es necesario inyectar un agente espumante diluido en agua a la corriente de aire para limpiar el pozo.

Se debe tener cuidado, pues al liberar la tubería pegada puede caer bruscamente por no tener fluido que amortigüe el golpe.

1.5.7 FUEGO Y EXPLOSIONES.

Cuando se utiliza el aire como fluido de perforación en formaciones que contienen gas, se cumpliría que los tres factores necesarios para que ocurra el fuego estarían presentes, estos son el oxígeno, el gas y la chispa producto de la fricción. Lo importante para la solución de éste problema es el de evitar el factor de encendido (chispa), puesto que la mezcla aire-gas estará necesariamente presente. La formación de una mezcla gas-aire, que esté dentro del rango de 5% a 15% de gas por volumen de aire se considera explosiva. Las causas de encendido son las siguientes:

- 1) Acumulación de recortes húmedos alrededor de la tubería de perforación, que sellan u obstruyen el espacio anular y no permiten el paso o salida del gas. En este caso la presión se incrementa y consecuentemente la temperatura; si ésta llegara a ser la de ignición de la mezcla, se producirá entonces la explosión.
- 2) Presencia de chispas dentro del pozo. Estas se originan al hacer contacto las partes metálicas de la sarta de trabajo con las formaciones abrasivas.
- 3) Pequeños agujeros en la tubería. Se ha demostrado que cuando el aire fluye a presiones de 15 a 30 Kg/cm² a través de una pequeña perforación, la fricción ocasionada por la reducción, crea suficiente calor como para provocar la ignición de la mezcla.

Una medida para prevenir los problemas de fuego y explosiones dentro del pozo, es la inyección de nitrógeno a la corriente de aire para reducir su proporción de oxígeno. Si la concentración de nitrógeno es suficientemente alta elimina completamente los problemas. La concentración recomendada varía entre un 3% a 5% en volumen de aire.

Otro procedimiento de solución es el uso de niebla o espuma para perforar esas zonas. Este tema se tratará en capítulos posteriores.

La consecuencia principal al ocurrir una explosión dentro del pozo, es la necesidad de la pesca de las herramientas utilizadas al momento y en el peor caso, las operaciones de desvío del pozo. Obviamente, dichas operaciones son excesivamente costosas y consumen mucho tiempo adicional al programado. Por tanto, la prevención de los incendios y explosiones es de gran importancia.

1.5.8 MEDIDAS DE SEGURIDAD.

Las medidas de seguridad son las mismas que las tomadas en la perforación convencional. Sólo se toman otras precauciones en el caso de perforar con aire en zonas con alto contenido de gas. Dichas medidas precautorias serían las siguientes:

- 1) Todos los motores deberán estar equipados con sistemas a prueba de fuego y/o explosión y con sistemas de agua para el escape (matachispas). El tubo de escape deberá estar bien soldado para asegurar un sistema cerrado.
- 2) El sistema de alumbrado debe ser de vapor y/o a prueba de fuego y explosión. Los cabezales, preventores y contrapozo deberán iluminarse correctamente.
- 3) Las bombas deberán conectarse al tubo vertical y al cabezal, y las presas deberán tener lodo y agua suficientes para una emergencia.
- 4) Todas las guardacadenas o tolvas serán aseguradas y contarán con lubricante suficiente.

- 5) Usar herramientas de material antichispa. El buje de impulso la flecha y los embragues deberán lubricarse para evitar las chispas.
- 6) La subestructura deberá estar abierta o con la ventilación adecuada para evitar la acumulación de mezcla gas-aire.
- 7) Deberá contarse con suficiente equipo contra incendio.
- 8) Las señales deberán localizarse a 200 pies del pozo en caso de peligro; no se permitirán visitas y el personal deberá ser entrenado para el caso.
- 9) Se eliminarán todas las fuentes de fuego presentes.
- 10) El personal de control de accidente se alojará en pequeñas casas localizadas cerca del pozo y será instruido en las reglas de seguridad.
- 11) Los vehículos se estacionarían a una distancia segura fuera del pozo.
- 12) Los sistemas de comunicación serían localizados a 200 pies del equipo.
- 13) Los preventores deberán probarse para ser operados a la presión requerida. No deben usarse rams y anillos dañados ó inseguros.
- 14) Todas las válvulas del múltiple de estrangulación deberán probarse a la presión de trabajo y abrirse totalmente.
- 15) El estrangulador deberá estar colocado de manera que pueda cambiarse sin detener el flujo.
- 16) El preventor deberá tener dos controles, uno cerca del perforador y otro a una distancia segura, con tubería y conexiones de acero apropiadas a la presión de trabajo.

- 17) La válvula maestra del Hydrill es para caso de emergencia y no debe estar cerrada.
- 18) Todas las válvulas y preventores deberán tener dispositivo de cierre manual para caso necesario de falla del sistema automático.
- 19) La bomba que acciona el preventor deberá localizarse a una distancia segura.
- 20) La camisa inter-vertical del Hydrill sería ranurada.
- 21) Probar las líneas a la presión de prueba antes de cualquier operación.
- 22) Verificar los preventores después de cada viaje.
- 23) Usar flotadores en la sarta de perforación y verificarlos en cada viaje.
- 24) En caso de que entre gas al pozo, no cerrar los preventores hasta abrirse el estrangulador y no cerrar el pozo hasta llenarlo con algún fluido.
- 25) La línea suplementaria de gas será equipada con una válvula de cierre de alta presión localizada a una distancia mínima de 150 pies del pozo.
- 26) Los compresores deberán inspeccionarse y equiparse conforme a las normas de seguridad establecidas.
- 27) Todo el personal deberá cumplir con un programa de adiestramiento en rutinas de seguridad.
- 28) El chango deberá usar un cable de acero antichispa para escapar en caso de accidente.

CAPITULO 11

REQUERIMIENTOS DE AIRE

II.1 GENERALIDADES

Uno de los aspectos más importantes en el empleo del aire como fluido de perforación, es el cálculo de los volúmenes que se requieren para lograr un efectivo levantamiento de los cortes de la formación perforada. Los primeros métodos que se desarrollaron para éste cálculo se basaron en la suposición de que para tener una capacidad de levantamiento de cortes, se requiere una velocidad mínima de 3000 pies/min de aire a condiciones normales, es decir, a presión de una atmósfera y a una temperatura de 60°F, sin embargo, en la práctica estos volúmenes calculados han resultado insuficientes debido a que no se han tomado en cuenta todas las variables que intervienen.

El primer modelo para el cálculo de los volúmenes de aire fue presentado por Martin y reportado por la Hughes Tool Co.; este trabajo se basó en la aplicación de la fórmula de Weyemouth, quedando limitada su aplicación a profundidades someras y para flujo en tuberías verticales.

Posteriormente, al incrementarse la investigación de esta técnica, se desarrollaron una serie de modelos matemáticos que permiten calcular dicho volumen con mayor exactitud, debido a que en cada uno de ellos se han tomado en cuenta los diferentes factores que afectan la circulación del aire a través del sistema circulatorio del pozo.

Cabe hacer notar que cada uno de los modelos calcula el volumen de aire para ciertas condiciones de operación dadas; esto se debe a que cada autor establece diferentes consideraciones en lo que se refiere a: comportamiento PVT del aire, mezcla sólido-aire en el espacio anular, verticalidad del pozo, etc. Aún así, eso no significa que debido a los criterios establecidos, no sean aplicables sino que la eficiencia que se tenga al perforar no será la misma.

11.2 MODELO MATEMATICO DE PRESTON L. MOORE.

El cálculo de los volúmenes requeridos de aire o gas obtenidos en este modelo, se basa en las siguientes consideraciones:

- a) La mezcla sólido-aire en el espacio anular no se considera homogénea para el cálculo de las caídas de presión por fricción.
- b) No se establece una velocidad anular mínima.
- c) El aire se comporta como un gas ideal.
- d) Para propósitos de cálculo de los volúmenes requeridos, estos se calculan a partir de los hombros de los lastrabarreras.
- e) Las pérdidas de presión debidas al aire se calculan independientemente de los sólidos.

11.2.1 DESARROLLO DEL MODELO.

La ecuación que determina el balance general de energía para el aire, es la siguiente:

$$dp = \frac{Df \ q \ dh}{gc} + \frac{Df \ V^2 \ f \ dh}{2gc \ (Da-Dt)} \quad \text{_____} \quad 1$$

Para el análisis de la fase sólida, se tiene la siguiente ecuación de balance de energía:

$$dp = \frac{M_p \ q \ dh}{V_a \ gc} + \frac{F_d}{A_a} \quad \text{_____} \quad 2$$

Aún cuando los recortes varían en su forma, se han determinado valores empíricos para los coeficientes de arrastre, tales coeficientes son:

- 0.805 para arenas y formas similares.
- 1.40 para calizas y formas similares.

De aquí se obtiene una expresión para la fuerza de arrastre como sigue:

$$Cd = \frac{P'}{(Df \ V_s^2 / 2gc)} = \frac{2 \ P' \ gc}{Df \ V_s^2} \quad \text{_____} \quad 3$$

Donde :

$$P' = \frac{Cd \ Df \ V_s^2}{2gc} \quad \text{_____} \quad 4$$

Multiplicando por A_p resulta la fuerza de arrastre para una partícula :

$$F_d = \frac{Cd \ A_p \ Df \ V_s^2}{2gc} \quad \text{_____} \quad 5$$

La fuerza de arrastre en todas las partículas será:

$$F_d = \frac{Cd \ A_p \ Df \ V_s^2 \ N}{2gc} \quad \text{_____} \quad 6$$

El número total de partículas puede expresarse como sigue:

$$N = \frac{A_a \ dh \ (1 - E)}{V_p} \quad \text{_____} \quad 7$$

Sustituyendo 7 en 6, se tiene:

$$\frac{F_d}{A_a} = dp = \frac{C_d A_p D_f V_s^2 (1 - E) dh}{2gc V_p} \quad \text{_____ 8}$$

Para una esfera:

$$A_p = \frac{\pi dp^2}{4} \quad \text{_____ 9} \quad V_p = \frac{\pi dp^3}{6} \quad \text{_____ 10}$$

$$V_s^2 = \frac{4g dp (D_p - D_f)}{3 C_d D_f} \quad \text{_____ 11}$$

De la ecuación 8 se tiene :

$$\frac{F_d}{A_a} = dp = \frac{C_d A_p D_f V_s^2 (1 - E) dh}{2 gc V_p} \quad \text{_____ 12}$$

Sustituyendo 9, 10 y 11 en 12 se tiene :

$$dp = \frac{6 C_d dp (1 - E) 4 g dp (D_p - D_f) dh}{4 2g dp^3 3C_d} \quad \text{_____ 13}$$

Simplificando:

$$dp = (D_p - D_f) (1 - E) dh$$

Como la densidad del aire (D_f) es despreciable comparada con la de la partícula (D_p), entonces la ecuación se reduce a:

$$dp = D_p (1 - E) dh \quad \text{_____ 14}$$

Determinando E :

$$E = \frac{V_f - V_p}{V_f} = 1 - \frac{V_p}{V_f} \quad \text{_____ 15}$$

Por definición de la densidad:

$$V_p = \frac{M_p}{D_p} \quad \text{y} \quad V_f = \frac{M_f}{D_f}$$

Entonces:

$$E = 1 - \frac{M_p D_f}{D_p M_p}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en 14 se tiene :

$$1 - E = \frac{M_p D_f}{M_f D_p} \quad \text{_____ 16}$$

Sustituyendo 16 en 14 se obtiene :

$$dp = \frac{Df M_p dh}{Mf} \quad \text{_____} \quad 17$$

Sustituyendo 17 en 2 se tiene:

$$dp = \frac{Df M_p dh}{V_a} + \frac{Df M_p}{Mf} \quad \text{_____} \quad 18$$

Con la ecuación 1 se calculan las pérdidas de presión debidas al aire y con la ecuación 18 las debidas a los sólidos.

Sumando ambas se encuentra la caída de presión total:

$$dp = Df \left(1 + \frac{M_p}{Mf} \right) dh + \frac{Df V_s^2 f}{2 gc (D_a - D_t)} dh + \frac{Df M_p dh}{Mf} \quad \text{_____} \quad 19$$

Como $V_a = V_f$:

$$V_f = \frac{Mf}{Df}$$

Simplificando, nos queda :

$$dp_T = Df \left(1 + \frac{2 M_p}{Mf} \right) dh + \frac{Df V_s^2 f}{2gc (D_a - D_t)} dh \quad \text{_____} \quad 20$$

De donde :

$$dh = - \frac{P dp_T}{Df \left(1 + \frac{2 M_p}{Mf} \right) + \frac{f V_s^2 f}{2gc (D_a - D_t)}} \quad \text{_____} \quad 21$$

Sustituyendo valores y simplificando se obtiene :

$$dh = \frac{dp_T}{\frac{S P^2 \left(1 + \frac{2 M_p}{Mf} \right)}{5.53 T_a} + \frac{7.84 \times 10^{-3} S Q_s^2 T_a f}{(D_a^2 - D_t^2) (D_a - D_t)}} \quad \text{_____} \quad 22$$

Donde :

$$a = \frac{7.84 \times 10^{-3} S Q_s^2 T_a f}{(D_a^2 - D_t^2) (D_a - D_t)}$$

$$b = \frac{S \left(1 + \frac{2 M_p}{Mf} \right)}{53.3 T_a} \quad \frac{M_p}{Mf} = \frac{0.47972 D_h^2 k}{S Q_s}$$

En términos de diferencial e integrando :

$$dh = \frac{P dp}{a P^2 + b} \quad \int_0^h dh = \frac{1}{2 a}$$

$$\int_{P_c}^{P_f} \frac{P \, dp}{aP^2 + b}$$

$$2 a h = \ln \left(\frac{a P_f^2 + b}{a P_c^2 + b} \right)$$

Despejando P_f de la ecuación anterior queda:

$$P_f = \sqrt{\left(P_c^2 + \frac{g}{b} \right) e^{\frac{2bh}{a}} - \frac{a}{b}} \quad \text{_____} \quad 23$$

La ecuación 23 contiene dos incógnitas, la presión en cualquier punto y el volumen de flujo de aire requerido para levantar los recortes, por esta razón es necesario determinar la masa del aire requerida para levantar una partícula, dadas las condiciones de presión y temperatura.

De la ecuación de Rittinger:

$$V_s = \sqrt{\frac{4 \, g \, d_p \, D_p}{3 \, C_d \, D_f}}$$

Multiplicando por A_a ambos miembros:

$$D_f \, A_a \, V_s = A_a \sqrt{\frac{4 \, g \, d_p \, D_p \, D_f}{3 \, C_d}}$$

Llamando G al término $(D_f \, A_a \, V_s)$ y sustituyendo se tiene:

$$G = A_a \sqrt{\frac{4 \, g \, D_p \, D_p \, P \, S}{3 \, C_d \, R \, T}} \quad \text{_____} \quad 24$$

La masa de aire puede ser convertida a volumen de aire requerido a condiciones estándar por el uso de una ecuación de continuidad dimensional.

Despejando a P de la ecuación anterior:

$$P = \frac{0.752 \times 10^{-4} \, G^2 \, T_a \, C_d}{(D_a^2 - D_t^2)^2 \, S \, d_p} \quad \text{_____} \quad 25$$

Finalmente igualando las ecuaciones 23 y 25 se tiene :

$$\frac{0.752 \times 10^{-4} Q^2 T_a C_d}{(D_a^2 - D_t^2)^2 S dp} = \sqrt{\frac{(P_c^2 + \frac{a}{b}) 2bh - \frac{a}{b}}{b}} \quad 26$$

Esta igualdad nos permite conocer el gasto que deberá circularse en el pozo durante su perforación.

LISTA DE VARIABLES

- Df = Densidad del aire, lb/pie³ .
 g = Aceleración de la gravedad, 32.2 pie/seg² .
 gc = Constante de conversión de Newton, 32.2 $\frac{\text{lbm-pie}}{\text{lbf-seg}^2}$.
 V = Velocidad del fluido, pie/seg .
 Vs = Velocidad de deslizamiento, pie/seg .
 f = Factor de fricción de Fanning.
 Da = Diámetro del agujero, pie .
 Dt = Diámetro de tubería, pie .
 P = Presión, lb/pie² .
 h = Profundidad, pie .
 Mp = Masa de las partículas, lbm .
 Va = Volumen anular, pie³ .
 Fd = Fuerza de arrastre de una partícula, lbf .
 Aa = Área del espacio anular, pie² .
 Cd = Coeficiente de arrastre .
 Ap = Área de arrastre de una partícula, pie² .
 N = Número total de partículas .
 P' = Caída de presión por unidad de área de arrastre .
 alrededor de las partículas, lbf/pie² .
 Vp = Volumen de una partícula, pie³ .
 E = Grado de desviación de las partículas a partir .
 de la forma elegida, fracción decimal .
 Dp = Densidad de la partícula, lb/pie³ .
 Vf = Volumen del aire, pie³ .
 Pf = Presión en cualquier punto, lb/pie² .
 Pc = Presión de descarga, lb/pie² .
 G = Masa del aire, lbm/seg .
 dp = Diámetro de la partícula, pie .
 S = Densidad relativa del aire.
 Ta = Temperatura anular, °R .
 Q = Gasto requerido, pie³/min .
 Pc = Presión en la parte superior, lb/pie² .
 k = Velocidad de perforación, pie/hora .
 PM = Peso Molecular del aire.

11.3 MODELO MATEMATICO DE R.R. ANGEL

Las principales consideraciones que tomó R.R. Angel para su modelo son las siguientes:

- a) Los volúmenes requeridos para perforar con aire, dependen de las siguientes variables: Ritmo de penetración, profundidad del pozo, flujo de agua, diámetro del agujero y de tubería, tipo de formación perforada y tamaño de los recortes.
- b) El factor de compresibilidad para el aire se considera igual a la unidad ya que se comporta como un gas ideal.
- c) Aunque en este método se incluye el efecto hidrostático del fluido, se desprecia la resistencia de la pared de las partículas, así como el cambio de energía potencial de los sólidos y el aire.
- d) La temperatura se considera constante.
- e) La velocidad para remover los recortes es de 3000 pie/min.

11.3.1 DESARROLLO DEL MODELO.

Partiendo de la ecuación de Rittinger, se tiene:

$$D_s V_s^2 = D_f V_f^2 \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 1$$

De la definición de densidad y de velocidad en cualquier punto, se obtiene:

$$D = \frac{S P}{53.3 Z T} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 2$$

$$V_f = \frac{5.19 Z Q T}{(D_a^2 - D_t^2) P} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 3$$

Sustituyendo 2 y 3 en 1 se obtiene:

$$D_s V_s^2 = \frac{S P}{53.3 Z T} \frac{5.19 Z Q T}{(D_a^2 - D_t^2) P} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 4$$

$$D_s V_s^2 = \frac{50.53 \times 10^{-2} S Q^2 T}{(D_a^2 - D_t^2) P} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 5$$

Despejando la presión y sustituyendo valores, se tiene:

$$P = \frac{6.61 S Q^2 T}{(D_a^2 - D_t^2) V_s^2} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 6$$

En la ecuación 6 se tienen dos incógnitas (P) y el gasto (Q) por lo tanto, será necesario obtener otra ecuación que contenga ambas incógnitas, para poder resolverlas simultáneamente.

De la ecuación de balance de energía se tiene:

$$dp = \left[D_m \left[\frac{g}{gc} + \frac{f V^2}{2gc (D_a - D_t)} \right] \right] dh \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 7$$

Asumiendo la mezcla sólido-aire homogénea en el espacio anular :

$$D_m = D_f (1 + M_p/M_f) \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 8$$

La relación M_p/M_f se calcula como sigue:

$$M_p = D_p V_p \quad \text{y} \quad V_p = A_a k$$

$$M_p = \pi/4 D_p D_a^2 k \quad \text{y} \quad M_f = D_f Q$$

$$M_f = S D_s Q$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$\frac{M_p}{M_f} = \frac{28.8 D_a^2 k}{S Q} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 9$$

De la ecuación 7 se tiene:

$$dp = \left[D_m \left[\frac{g}{gc} + \frac{f V^2}{2gc (D_a - D_t)} \right] \right] dh \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 10$$

De donde por la ecuación de Weymouth, el factor de fricción es igual a :

$$f = \frac{0.008}{1.333 (D_a - D_t)} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 11$$

Sustituyendo 3, 8 y 11 en 7 se tiene :

$$dp = \left[\frac{S P}{53.3 T} \left[1 + \frac{M_p}{M_f} \frac{g}{g_c} \frac{0.008 (5.19 Q)}{2g (D_a^2 - D_t^2)^2} \frac{T^2}{(D_a - D_t)} \frac{1.333}{P^2} \right] \right] dh$$

Llamando:

$$a = \frac{S}{53.3} \left(1 + \frac{M_p}{M_f} \right)$$

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

Entonces :

$$dp = \left[\frac{a P}{T} + \frac{b a T}{P} \right] dh$$

$$T dp = \left[a \left[P + \frac{b T^2}{P} \right] \right] dh$$

$$dh = \frac{T dp}{a P + b T^2/P}$$

Multiplicando numerador y denominador por P :

$$dh = \frac{T P dp}{a (P^2 + b T^2)}$$

Integrando :

$$\int_0^h dh = T \int_{P_s}^{P_f} \frac{P dp}{a (P^2 + b T^2)}$$

Llamando $u = a P^2 + a b T^2$:

$$du = 2 a P dp$$

$$h = \frac{T}{2 a} \int_{P_s}^{P_f} \frac{P dp}{a (P^2 + b T^2)}$$

$$\frac{2 a h}{T} = \ln (a P^2 + a b T^2) \Bigg]_{P_c}^{P_f}$$

$$\frac{2 a h}{T} = \ln \frac{a (P_f^2 + b T^2)}{a (P_s^2 + b T^2)}$$

Despejando Pf, se tiene :

$$P_f = \sqrt{\frac{2ah/T}{(P_s^2 + b T^2) e - b T}} \quad \text{_____ 12}$$

Iguando las ecuaciones 6 y 12 se tiene finalmente:

$$\frac{6.61 S T Q^2}{(D_a^2 - D_t^2)^2 V_s^2} = \sqrt{\frac{2ah/T}{(P_s^2 + b T) e - b T}} \quad \text{_____ 13}$$

Para el cálculo del gasto requerido en la ecuación 13 se utiliza el método de ensaye y error.

LISTA DE VARIABLES

- Ds = Densidad de aire medida a condiciones estandar, 0.0764 lbm/pie³ .
- Df = Densidad del aire en el espacio anular, lb/pie³.
- Vs = Velocidad del aire medida a condiciones base, 3000 pie/min .
- Vf = Velocidad equivalente en cualquier punto, pie/min .
- P = Presión, lb/pg² .
- Da = Diámetro de agujero, pie .
- Dt = Diámetro de tubería, pie .
- T = Temperatura promedio, °R .
- Q = Gasto de aire a condiciones base, pie³/min .
- S = Densidad relativa del aire.
- dp = Presión en cualquier punto.
- Dm = Densidad media de la mezcla, lbm/pie³ .
- h = Profundidad de pozo, pie.
- f = Factor de fricción .
- V = Velocidad de flujo, pie/min .
- gc = 32.17 lbm-pie/lbf-sec² .
- g = Aceleración de la gravedad, 32.17 pie/seg² .
- Mp = Masa de la partícula, lbm .
- Mf = Masa del fluido, lbm .
- Dp = Densidad de la partícula, lbm/pie³ .
- Vp = Volumen de las partículas, pie³ .
- k = Velocidad de perforación, pie/hora .
- Pf = Presión de fondo, lb/pie² .
- Ps = Presión superficial de descarga, lb/pie² .
- Ine = 2.71828 .

11.4 MODELO MATEMATICO DE MC CRAY Y COLE .

Este método establece que el volumen de aire que fluye por el espacio anular está relacionado con la velocidad de asentamiento de los recortes.

Las consideraciones en este método son :

- a) La velocidad ascendente del aire deberá ser de 3000 pie/min a condiciones atmosféricas por ser satisfactoria para levantar los recortes de perforación.
- b) La densidad del aire en el fondo del agujero es afectada por:
 - La presión superficial de descarga.
 - La temperatura de fondo.
 - Las pérdidas de presión por fricción.
 - La presión generada por la columna de aire.
 - Los recortes en el espacio anular.
- c) El ritmo de perforación influye en el gasto de circulación requerido, debido a la carga hidrostática de la columna fluyendo por el espacio anular.
- d) Contempla el cálculo de los volúmenes de aire tanto para pozos verticales como para inclinados.

11.4.1 DESARROLLO DEL MODELO .

Partiendo de la ecuación de Rittinger para calcular la velocidad de asentamiento de las partículas, la fórmula se puede utilizar tanto para condiciones atmosféricas (a), como para condiciones de fondo (b).

$$V_{sa} = C \sqrt{\frac{D_s - D_a}{D_a}} \quad \text{_____} |$$

$$V_{sb} = C \sqrt{\frac{D_s - D_b}{D_b}} \quad \text{_____} \quad 2$$

Si suponemos que existe un porcentaje constante de velocidad de asentamiento en ambas condiciones (de fondo y atmosféricas), se tiene lo siguiente:

$$\frac{V_{sa}}{V_a} = \frac{V_{sb}}{V_b} \quad \text{_____} \quad 3$$

De esta ecuación se tiene:

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_{sb}}{V_{sa}} \quad \text{_____} \quad 4$$

De 1 y 2 se tiene :

$$\frac{V_{sb}}{V_{sa}} = \frac{C \sqrt{(D_s - D_b)/D_b}}{C \sqrt{(D_s - D_b)/D_a}} = \sqrt{\frac{D_a (D_s - D_b)}{D_b (D_s - D_a)}} \quad \text{_____} \quad 5$$

Como la densidad del aire es despreciable comparada con la densidad de los recortes, la relación se reduce a :

$$\frac{V_{sb}}{V_{sa}} = \sqrt{\frac{D_a}{D_b}} \quad \text{_____} \quad 6$$

De donde se tiene :

$$V_{sb}^2 D_b = V_{sa}^2 D_a \quad \text{_____} \quad 6'$$

$$V_b^2 = \frac{V_a^2 D_a}{D_b} \quad \text{_____} \quad 6''$$

Como R (constante universal de los gases) no varía, se tiene :

$$R @ \text{ c.s.} = R @ \text{ c.f.}$$

$$R @ \text{ c.s.} = \frac{D_a P_a}{T_a Z_a} \quad \text{_____} \quad 7$$

$$R @ \text{ c.f.} = \frac{D_b P_b}{T_b Z_b} \quad \text{_____} \quad 8$$

Igualando :

$$\frac{D_a P_a}{T_a Z_a} = \frac{D_b P_b}{T_b Z_b} \quad \text{_____} \quad 9$$

De aquí que :

$$D_b = \frac{D_a P_a Z_b T_b}{T_a Z_a P_b} \quad \text{_____} \quad 10$$

Por definición de gasto :

$$Q_b = V_b A_b$$

Sustituyendo en 10 y despejando V_b , se obtiene:

$$V_b = \frac{Q_a P_a Z_b T_b}{A_b T_a P_b Z_a} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 11$$

Utilizando :

$$D_b = \frac{144 P_b M_g}{Z_b R T_b} \quad \text{y} \quad D_a = \frac{144 P_a M_a}{Z_a R T_a}$$

Sustituyendo en 6" se obtiene :

$$\frac{D_a}{D_b} = \frac{144 P_a M_a Z_b R T_b}{144 P_b M_g Z_a R T_a} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 12$$

Simplificando :

$$\frac{D_a}{D_b} = \frac{P_a M_a Z_b T_b}{P_b M_g T_a} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 13$$

Sustituyendo 13 en 6" :

$$V_b^2 = \frac{V_a^2 P_a M_a Z_b T_b}{P_b M_g T_a} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 14$$

Elevando al cuadrado la ecuación 11 :

$$V_b^2 = \frac{Q_a^2 P_a^2 T_b^2 Z_b^2}{A_b^2 T_a^2 P_b^2} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 15$$

Iguando 14 y 15 :

$$\left[\frac{Q_b P_a T_b Z_b}{A_b T_a P_b} \right]^2 = V_a^2 \frac{P_a M_a Z_b T_b}{P_b M_g T_a} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 16$$

Despejando Q_a^2 :

$$Q_a^2 = V_a^2 A_b^2 \frac{T_a^2 P_b^2 P_a M_a Z_b T_b}{T_a P_b P_a^2 M_g Z_b^2 T_b^2}$$

Simplificando :

$$Q_a^2 = V_a^2 A_b^2 \frac{M_a}{M_g} \frac{T_a P_b}{P_a T_b Z_b} \quad \underline{\hspace{10em}} \quad 17$$

$$P_b^2 = \left[\frac{Q_a}{V_a A_b} \right]^4 \left[5 \frac{P_a T_b Z_b}{T_a} \right]^2$$

Las ecuaciones anteriores llevan a la determinación de la cantidad de aire @ c.s..

Para obtener la ecuación para flujo vertical de aire se

parte del Teorema de Bernoulli :

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{V dv}{g} + Df + dh = 0 \quad \text{_____} \quad 18$$

A partir de la ley de los gases :

$$D = \frac{PM}{ZRT} (1 + W) \quad \text{_____} \quad 19$$

Donde :

$$W = \frac{\text{Peso de los fragmentos de roca (recortes)}}{\text{Peso del aire}}$$

$$PV = ZRT \quad \text{_____} \quad 20$$

Considerando a V como un volumen por unidad de tiempo:

$$P_0 Q = Z_0 R T_0 \quad \text{_____} \quad 21$$

$$P V_a = Z R T \quad \text{_____} \quad 22$$

$$R = \frac{Q P_0}{Z_0 T_0} \quad \text{de la ecuación 21 .}$$

$$R = \frac{P V_a}{Z T} \quad \text{de la ecuación 22 .}$$

Igualando :

$$\frac{Q P_0}{Z_0 T_0} = \frac{P V_a}{Z T}$$

Despejando V :

$$V = \frac{Q P_0 Z T}{A T_0 P} \quad \text{_____} \quad 23$$

Obteniendo la diferencial :

$$dv = - \frac{g T P_0 Z}{A T_0 P^2} dp \quad \text{_____} \quad 24$$

De la ecuación de Fanning :

$$F = \frac{2 f V^2 L}{g d}$$

Diferenciando :

$$dF = \frac{2 f V^2}{g d} dL \quad \text{_____} \quad 25$$

$$\text{sen } \theta = h/L \quad ; \quad h = \text{sen } \theta L$$

$$\text{Diferenciando } dh = \text{sen } \theta dL \quad \text{_____} \quad 26$$

Sustituyendo 19, 23, 24, 25 y 26 en 18 se tiene:

$$\frac{PM}{ZRT} \frac{dp}{(1+W)} + \frac{Q T P_o Z}{A T_o P_g} - \left[\frac{Q T P_o Z}{A T_o P^2} \right] dp + \frac{2f}{g d} \left[\frac{Q T P_o Z}{A T_o P} \right]^2 dL + \text{sen } \theta dL = 0$$

Sustituyendo y desarrollando estas ecuaciones se obtiene:

$$dL = \frac{dp}{\frac{2f}{d} + \left[\frac{A T_o}{Q T P_o Z} \right]^2 g P^2 \text{sen } \theta} - \frac{P dp}{\frac{2f M (1+W) Z T}{R g d} \left[\frac{Q P_o}{A T_o} \right]^2 + P M (1+W) \text{sen } \theta}$$

Integrando se tiene:

$$\int_{P_t}^{P_b} \frac{P dp}{\frac{2f M (1+W) Z T}{R g d} \left[\frac{Q P_o}{A T_o} \right]^2 + \frac{P M (1+W) \text{sen } \theta}{Z R T}} - \int_{P_t}^{P_b} \frac{dp}{\frac{2f}{d} + \left[\frac{A T_o}{Q T P_o Z} \right]^2 g P^2 \text{sen } \theta P} = \int_0^L dL \quad \text{--- 27}$$

Desarrollando :

$$\frac{1}{2b} \log \left[\frac{b P_b^2 + a''}{b P_t^2 + a''} \right] - \frac{1}{2C} \log \left[\frac{P_b^2 (C + k P_t^2)}{P_t^2 (C + k P_b^2)} \right] = L$$

Ahora se tiene:

$$\frac{d P_b^2 + a''}{b P_t^2 + a''} = e^{2bL} \left[\frac{P_b^2 (C + k P_t^2)}{P_t^2 (C + k P_b^2)} \right]^{b/C}$$

De donde :

$$\frac{2+a''}{d P_b} = \frac{2bL}{e^{2bL} (b P_t^2 + a'')} \quad \text{--- 28}$$

Despejando P_b^2 :

$$P_b^2 = e^{2bL} P_t^2 + (e^{2bL} - 1) a''/b \quad \text{--- 29}$$

Ecuación para flujo ascendente.

Tomando a Q positivo o sea para flujo descendente se tiene:

$$P_b^2 = e^{2bL} P_t^2 - (e^{2bL} - 1) a''/b \quad \text{--- 30}$$

Si $m = 2 b L$ se tiene :

$$b = \frac{m \operatorname{sen} \theta (1+W)}{2 R T}$$

Pero $dh = \operatorname{sen} \theta L$

$$\text{Integrando } \int_0^h dh = \operatorname{sen} \theta \int_0^L dL \text{ se tiene que } \operatorname{sen} \theta = \frac{h}{L}$$

Sustituyendo :

$$b = \frac{m h (1+W)}{2 R T L} = \frac{2 (29) h (1+W)}{1544 Z T} \quad \text{--- 31}$$

$$2 b L = \frac{h (1+W)}{26.62 Z T} \quad \text{--- 32}$$

$$\text{Pero } a = \frac{2 f m (1+W) Z T}{g d R} \left[\frac{Q P_o}{A T_o} \right]^2 \quad \text{--- 33}$$

Entonces :

$$\frac{a}{b} = \frac{2 f L}{g d h} \left[\frac{2 Q P_o T}{A T_o} \right]^2 = \frac{2 f L}{300 g d h} \left[\frac{Q P_o Z T}{A T_o} \right]^2 \quad \text{--- 34}$$

La relación del peso de los cortes y el peso del aire (W):

$$W = \frac{\text{peso de los cortes}}{\text{peso del aire}}$$

$$W = \frac{\text{vel. de roca perforada} \times \text{densidad de la roca}}{\text{vel. del aire} \times \text{densidad del aire}}$$

Tomando un valor promediado de la densidad de la roca igual

a 2.718 gr/cm³, se tiene:

$$W = \frac{\pi \times 2.718 \rho h^2 k}{4 Q_a D_g} \quad \text{--- 35}$$

Sustituyendo 34 y 29 , se tiene:

$$P_b^2 = e^m P_t^2 + (e^m - 1) \frac{2 f L}{300 g d h} \left[\frac{T Z Q_a P_a}{A T_a} \right]^2 \quad \text{--- 36}$$

Pero :

$$Pb^2 = \left[\frac{Qa}{Va^2 Ab^2} \right]^2 \left[\frac{D Pa Tb Zb}{Ta Pb} \right]^2 \quad \text{--- 37}$$

Iguando 36 y 37 :

$$\frac{Qa^4}{Va^4 Ab^4} \left[\frac{Pa Ta Zb}{Ta Pb} \right]^2 - \frac{(e-1) Z f L}{300 dh} \left[\frac{T Z Pa}{A Ta} \right] Qa^2 - e Pt^2 = 0 \quad \text{--- 38}$$

La ecuación anterior es del tipo cuadrático :

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad \text{donde } x = Qa^2$$

La solución será :

$$Qa^2 = \sqrt{\frac{-b}{2a}} \pm \sqrt{\frac{b^2 - 4ac}{2a}}$$

$$Qa = \frac{1}{2a} \left[(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) \right]^{1/2}$$

$$Qa = -\frac{b}{2a} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4ac}{b^2}} \right]^{1/2}$$

Llamando :

$$x = -\frac{b}{2a} \quad y = \sqrt{-\frac{4ac}{b^2}}$$

$$Qa = x \left[1 + \sqrt{1 + y} \right]^{1/2}$$

Sustituyendo valores :

$$Qa = \sqrt{\frac{(e-1) f L}{300 g dh} \frac{Z Ta Va^2}{S Zb Tb} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{e Zb^2 (300 g dh)^2 Ta^2 Tb^2 Pt^2}{(e-1) Z (Va^2 f L)^2 T Po^2}} \right]^{1/2}}$$

Para el cálculo del gasto necesario se emplea el método de ensayo y error.

II.5 MODELO MATEMATICO DE SCHOEPEL - SAPRE.

En este modelo los volúmenes de aire son mayores que los otros tres modelos mencionados anteriormente.

El enfoque presentado permite la predicción de los volúmenes requeridos para elevar los recortes hacia la superficie desde el punto crítico de diseño, justamente en los hombros de los lastrabarrenas.

Para este método, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones :

- a) Se consideran los efectos de fricción entre las paredes y los recortes y entre el aire y las paredes del pozo.
- b) Considera el comportamiento de los gases reales y otras variables como son :
 - Cambios en la temperatura debido a la profundidad.
 - Efecto del flujo paralelo de los sólidos y el aire.
 - La velocidad de penetración.
- c) Las presiones en el fondo del agujero se calculan con el punto crítico.

II.5.1 DESARROLLO DEL MODELO.

Partiendo de las velocidades :

$$V_s = V - V_m \quad \text{_____} 1$$

Considerando la densidad del aire casi nula en comparación con la de los recortes:

$$D_s - D_g = D_s \quad \text{_____} 2$$

Pero :

$$D_g = \frac{PM}{ZRT} \quad \text{_____} 3$$

Sustituyendo 1 en la ecuación de Rittinger :

$$V - V_m = \sqrt{\frac{4 D_s g ds Z R T}{3 f d P M}} \quad \text{_____} 4$$

Aplicando el subíndice (1) al punto de levantamiento crítico, y utilizando $Z = 0.00203 T$ se tiene :

$$V_1 = \sqrt{\frac{4 (0.00203 T)^2 D_s g ds R}{3 f d P_1 M}} \quad \text{_____} 5$$

La masa de aire fluyente puede expresarse como :

$$M_g = D_g l A_l V_1 \quad \text{_____} 6$$

Despejando V_1 :

$$V_1 A_l = \frac{M_g}{D_g l} \quad \text{_____} 7$$

Sustituyendo 7 en 1 se obtiene:

$$M_g = A_l D_g l \sqrt{\frac{4 \times 0.00203 T^2 D_s g ds R}{3 f d P_1 M}} \quad \text{_____} 8$$

Pero :

$$A_l = \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_t^2)$$

Sustituyendo en 3 , finalmente se tiene :

$$M_g = \pi (D_a^2 - D_t^2) \sqrt{\frac{D_s g ds P_1 M}{12 \times 0.00203 R T^2 f d}} \quad \text{_____} 9$$

La ecuación 8 nos permite calcular la masa de aire mínima por unidad de tiempo que se requiere para acarrear la partícula de diámetro crítico de ds .

La segunda ecuación se desarrolla partiendo de la ecuación de Bernoulli en forma diferencial.

$$V dp + dz + u du + d(Lw) + dW_s = 0 \quad \text{_____} 10$$

Como no se realizó ningún trabajo en el aire $W_s = 0$:

$$V dp + dz + u du + d(Lw) = 0 \quad \text{_____} 11$$

Considerando un flujo estacionario y que para un fluido compresible la velocidad de la masa es constante :

$$V dp + dz + \frac{G^2 V dv}{gc} + d(Lw) = 0 \quad \text{12}$$

Dividiendo entre V^2 :

$$\frac{dp}{V} + \frac{dz}{V^2} + \frac{G^2 dv}{V gc} + \frac{d(Lw)}{V^2} = 0 \quad \text{13}$$

Como :

$$Lw = \frac{2 f G^2 V^2 L}{gc (D_a - D_t)} \quad dLw = \frac{2 f G^2 V^2 d(L)}{gc (D_a - D_t)}$$

$$\frac{1}{V} = Dg = \frac{PM}{Z_1 R T_1}$$

Sustituyendo :

$$Dg dp + Dg^2 dz + \frac{G^2}{gc} \frac{dv}{V} + \frac{2 f G^2}{gc (D_a - D_t)} dL = 0 \quad \text{14}$$

Integrando los límites superior e inferior (hombros de los lastrabarreras) a superficie y sustituyendo ZRT para V , se tiene:

$$\frac{M}{Z_1 R T_1} \int_{P_1}^{P_2} dp + \frac{g Dg^2}{gc} \int_{z_1}^{z_2} dz + \frac{G^2}{gc} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dv}{V} + \frac{2 f G^2}{gc (D_a - D_t)} \int_0^L dL = 0 \quad \text{15}$$

$$\frac{M}{Z_1 R T_1} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{g}{gc} Dg^2 Z + \frac{G^2}{gc} \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{2 f G^2 L}{gc (D_a - D_t)} = 0 \quad \text{16}$$

$$\text{Pero : } V_1 = \frac{Z_1 R T_1}{P_1} ; \quad V_2 = \frac{Z_2 R T_2}{P_2}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_2 R T_2 P_1}{Z_1 P_2 R T_1} = \frac{T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} \quad \text{17}$$

Por lo tanto :

$$\frac{M}{2 Z R T_1} (P_2 - P_1)^2 + \frac{q}{gc} Dg^2 Z + \frac{G^2}{gc} \ln \frac{T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} + \frac{2 f G^2 L}{gc (D_a - D_t)} = 0 \quad \text{18}$$

Definiendo r como la relación de masa de los sólidos que está siendo acarreada por unidad de masa de aire fluyente, se obtiene :

$$r = \frac{\text{masa de los sólidos}}{\text{masa del aire}}$$

$$ms = w/4 \quad Da^2 \quad k \quad Ds \quad \text{19}$$

Ahora :

$$r V dp + r \frac{u du}{gc} + r \frac{q}{gc} dz + r dLw = 0 \quad \text{20}$$

Integrando y factorizando se tiene:

$$r \left[\frac{P_2 - P_1}{Ds} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 gc} + \frac{r q Z}{gc} + dLw \right] = 0 \quad \text{21}$$

Pero $V_1^2 = 0$ y el factor de fricción dLw sus valores se tomarán del estudio hecho por Write y Voght.

El factor de fricción de Moody para una mezcla aire-sólido está dada por :

$$B - 1 = Ar \left[\frac{D}{d} \right]^2 \left[\frac{P}{Ds} \frac{r}{Re} \right]^K \quad \text{22}$$

Siendo A y K constantes empíricas del grupo adimensional y para el caso de este estudio $A = 800$ y $K = 0.62$.

$$Re = \sqrt{\frac{(Ds - Dg) Dg d^3}{2}} \quad \text{23}$$

Combinando las ecuaciones 18 y 21 se tiene:

$$\frac{M}{2 Z_1 R T_1} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{q}{gc} Dg^2 Z + \frac{G^2}{gc} \ln \left[\frac{T_2 P_1}{Z_1 P_1 P_2} \right] + \frac{2 f G^2 L}{gc D} + r \left[\frac{(P_2 - P_1)}{Ds} + \frac{V_2^2}{2 gc} + \frac{q}{gc} Z + dLw \right] = 0 \quad \text{24}$$

Simplificando :

$$P_1^2 = \frac{2 Z_1 R T_1}{M} \left[\frac{P_2^2 M}{2 Z_1 R T_1} + \frac{q}{gc} (Dg^2 + r) H + \frac{r V_2^2}{2 gc} + \frac{r (P_2 - P_1)}{D_s} + \frac{G^2}{gc} \ln \frac{T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} + \frac{2 B f G^2 H}{gc (D_a - D_t)} \right] \quad 25$$

Dividiendo entre P_1 :

$$P_1 = \frac{2 Z_1 R T_1}{M} \left[\frac{P_2^2 M}{P_1 R T_1 Z_1} + \frac{q H}{gc P_1} (Dg^2 + r) + \frac{r (P_2 - P_1)}{D_s P_1} + \frac{G^2}{gc P_1} \ln \left[\frac{T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} \right] + \frac{2 f G^2 H B}{P_1 gc (D_a - D_t)} + \frac{r V_2^2}{2 gc P_1} \right] \quad 26$$

El volumen del aire será :

$$V = 60 \frac{M_g}{D_g}$$

Medido a condiciones base :

$$V @ c.b. = \frac{V (P_1) (T_2)}{P_2 T_1}$$

En este método se supone una P_1 y se sustituye en la ecuación 26, de esta manera se calcula otra P_1 y se comparan, si están dentro del rango, se procede a calcular M_g y luego el volumen a condiciones base.

LISTA DE VARIABLES

| | | |
|----|---|--|
| Vs | = | Velocidad de asentamiento, pie/min . |
| V | = | " de aire , pie/min . |
| Vm | = | " de los recortes, pie/min . |
| Ds | = | Densidad de los sólidos, lbm/pie ³ . |
| Dg | = | " del aire, lb/pie ³ . |
| Z | = | Factor de compresibilidad . |
| Da | = | Diámetro del agujero, pie . |
| Dt | = | " de la tubería, pie . |
| g | = | Aceleración de la gravedad, pie/seg . |
| ds | = | Diámetro de los sólidos, pie . |
| M | = | Peso molecular . |
| fd | = | Coefficiente de arrastre . |
| T | = | Temperatura, °R . |
| R | = | Constante universal de los gases, $\frac{\text{pie-lbf}}{\text{lb-mol } ^\circ\text{R}}$. |
| P | = | Presión, lbf/pie ² . |
| Mg | = | Masa del aire fluyente, lbm/seg . |
| k | = | Velocidad de perforación, pie/hora . |
| Ms | = | Masa de los sólidos, lbm/seg . |
| D | = | Densidad del fluido, lbm/pie ³ . |
| Re | = | Número de Reynolds . |
| A | = | Área anular, pie ² . |
| f | = | Factor de fricción de Fanning . |
| gc | = | Factor de conversión Newton, $\frac{\text{pie-lb}}{\text{lb-sec}^2}$ |
| h | = | Profundidad, pie . |
| B | = | Caída de presión relativa, lb/pg ² . |

II.6 COMENTARIOS

Después de haber efectuado el análisis de cada uno de los modelos para calcular los volúmenes requeridos de aire, se observa que para una velocidad de penetración, profundidad y densidad del aire, cada modelo calcula gastos diferentes, esto se debe a que cada autor emplea diferentes criterios en su desarrollo.

Durante la perforación de un pozo, varían la presión y la temperatura, dando como resultado que el volumen del fluido que se esté empleando (en este caso aire) sufra cambios, es por esto que al aire no se le debe considerar como un gas ideal, ya que va a estar sujeto a cambios de temperatura generados tanto por la fricción como por el gradiente geotérmico, por lo que deberá de considerarse como un gas real (R.R. Angel y P.L. Moore consideran el aire como un gas ideal). Por otro lado, se considera una velocidad mínima anular del aire de 3000 pie/min medida a condiciones base para levantar la partícula, pero no se toma en cuenta el diámetro de éstas y conforme la profundidad aumenta, la capacidad de acarreo se verá disminuida, por lo que no deberá de mantenerse constante.

Al considerar la mezcla sólido-aire homogénea en el espacio anular, equivale a tener una sola fase que en este caso es la gaseosa, por lo que los cálculos de pérdida de presión por fricción son sólo los generados por el aire. Ahora bien, sabiendo que los sólidos también generan pérdidas, éstos deberán tratarse de manera separada del gas.

En el modelo de Mc Cray-Cole se toman en consideración algunas variables que se apegan más a la realidad, como son: variación de la temperatura con la profundidad, considera el aire como un gas real, la mezcla en el espacio anular no es homogénea, en el ritmo de perforación se consideran la carga hidrostática de la columna fluyendo por el espacio anular, etc.

Desafortunadamente este método no se ha desarrollado completamente en el campo.

En el modelo de J. Schoepel-A.R. Sapre, consideran en sus cálculos mayor número de variables que se apegan más a la realidad obteniendo mayores gastos de circulación que los anteriormente expuestos, lo que elimina la necesidad de utilizar un factor de seguridad como se hace realmente en la práctica.

De lo anteriormente expuesto, se concluye que el modelo de J. Schoepel-A.R. Sapre es el más conveniente para el cálculo de los volúmenes de aire.

Sin embargo, cabe señalar que los modelos restantes también son aplicables a la perforación con aire, aunque su eficiencia es menor.

CAPITULO III

USO DEL AIRE EN FLUIDOS DE BAJA DENSIDAD

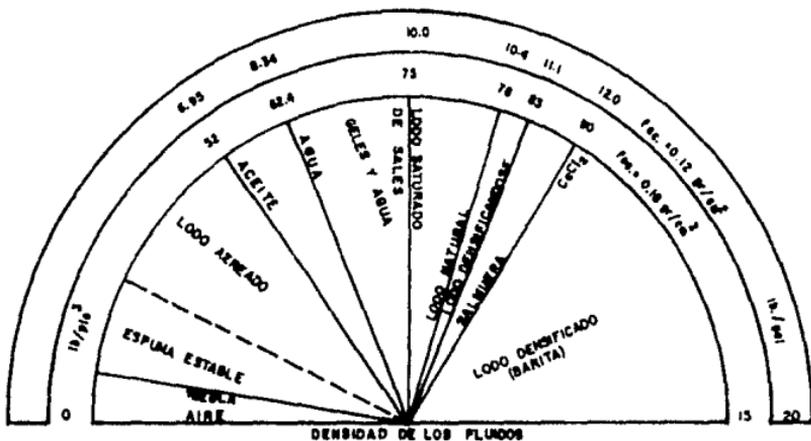
III.1 PERFORACION CON ESPUMA.

La espuma es una variedad del uso del aire en fluidos de baja densidad para perforación de pozos. Inicialmente, la espuma fue utilizada para perforar formaciones no consolidadas que provocaban derrumbes en el pozo; posteriormente y debido al alto rendimiento de la misma, se usó en pozos de gran diámetro reduciendo los altos gastos de fluido convencional. Además proporciona buenos resultados en la perforación de zonas donde la entrada de agua y el contenido de gas son un problema y que no se resuelven perforando con aire debido a las razones expuestas en el Capítulo I.

III.1.1 Características de la Espuma.

La espuma estable es un fluido de baja densidad Fig. 1, de alta viscosidad Fig.2 y de gran capacidad de acarreo de cortes Fig.3.

Los componentes básicos de una espuma estable consisten de agua (salmuera, cloruro de potasio o dulce), un agente espumante y gas (aire, natural o nitrógeno). Estos componentes son combinados y bombeados dentro del sistema de circulación. En este caso, el líquido es la fase continua de la espuma y el aire la discontinua. Para mantener la homogeneidad de la espuma, la proporción de líquido-aire debe estar dentro de límites específicos generalmente entre 2% y 16% en la superficie.



1 lb/ft³ = 0.12 gr/cm³

MULTIPLICAR 0.12 POR EL VALOR EN lb/ft³ Y OBTENEMOS gr/cm³

MULTIPLICAR 0.16 POR EL VALOR EN gr/cm³ Y OBTENEMOS lb/ft³

**FIG.1 RANGOS DE DENSIDADES DE LOS DIFERENTES
FLUIDOS DE PERFORACION**

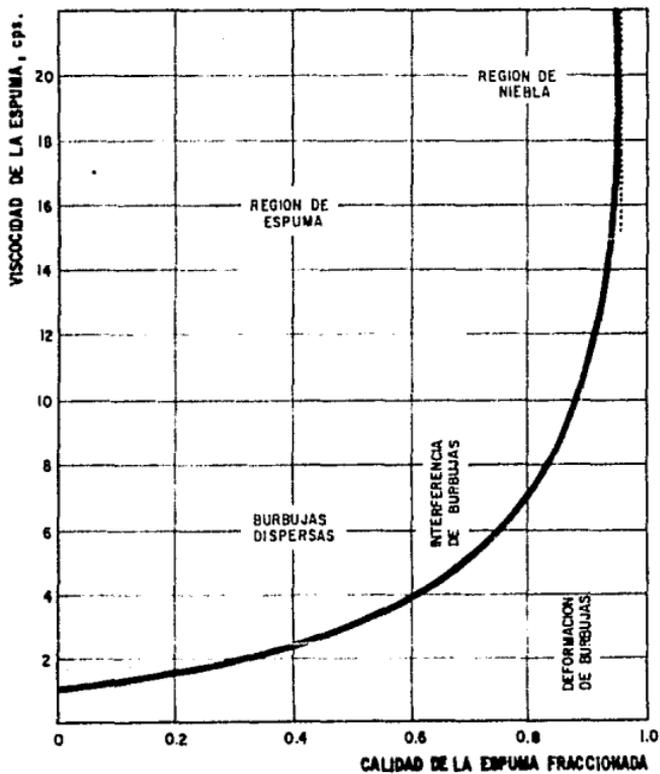


FIG. 2 VISCOSIDAD DE LA ESPUMA

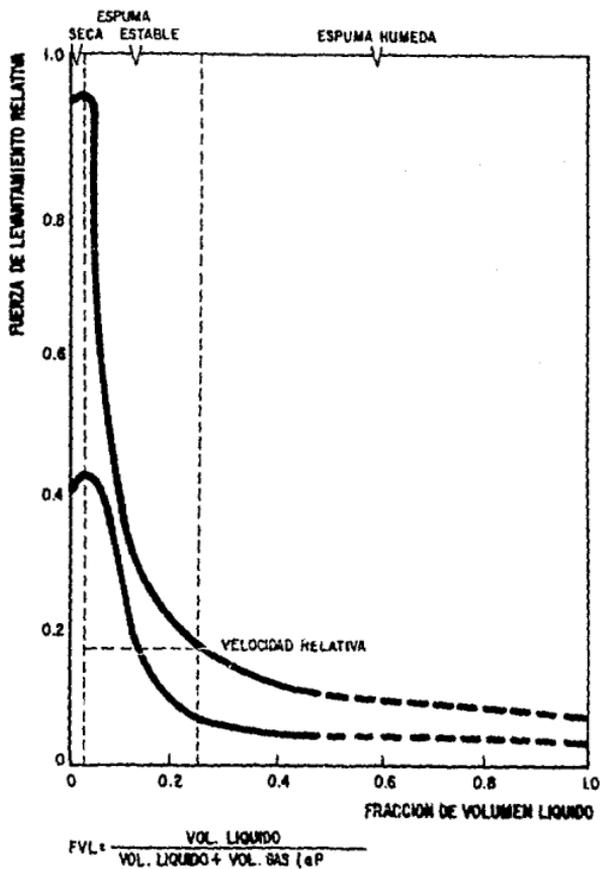


FIG. 3 FUERZA DE LEVANTAMIENTO VS FRACCION DE VOLUMEN LIQUIDO

Como ya se mencionó, la espuma posee gran capacidad de acarreo de cortes; sin embargo, si la entrada de agua aumenta, pierde viscosidad y la capacidad de acarreo disminuye. Las bolsas de aire que ingresaran a la espuma reducirían también la capacidad de acarreo de los cortes.

Una buena calidad de la espuma requiere generalmente solo la mitad de la velocidad anular del lodo convencional y un décimo de la del aire para levantar y limpiar perfectamente el agujero. Ahora, a diferencia del líquido, la espuma si es compresible, por lo que cambia sus propiedades con el cambio de temperatura y presión. Debido a esto, en algún punto la espuma puede cambiar de niebla a líquido y su capacidad de acarreo de sólidos disminuye notablemente.

Para perforación de yacimientos depresionados deben existir las siguientes condiciones:

- a) La espuma no debe ser contaminante ni corrosiva.
- b) La estabilidad de la espuma debe proporcionar la máxima capacidad de acarreo.
- c) La carga hidrostática de la columna de espuma no debe exceder la presión de formación, tal que los sólidos o el líquido no invadan la zona productora.

Debido a las altas temperaturas y su efecto sobre el cambio de propiedades en la espuma, ésta debe estar idealmente compuesta por lo siguiente:

- a) Gas nitrógeno que elimine la posibilidad de explosiones y del efecto corrosivo de otro gas o aire.

- b) Agente espumante para alta temperatura, probado para asegurar su estabilidad a 400°F por 6 horas.
- c) Inhibidor de corrosión para protección tubular.
- d) Secuestrante de oxígeno para eliminar el oxígeno libre.
- e) Agua dulce, tratada con sosa cáustica (NaOH) para mantener un pH de 9.5 a 10.0.

Todos los componentes deben ser combinados y probados para su compatibilidad.

III.1.2 Aplicaciones.

Dentro de las aplicaciones de la espuma cuando se usa como fluido de perforación se mencionan las siguientes:

- a) En agujeros de gran diámetro donde se utilizarían grandes volúmenes de aire, haciendo poco económica la perforación con aire.
- b) Para perforar formaciones no consolidadas, arenas, lutitas, gravas o conglomerados. Una espuma con una adecuada mezcla de lodo tiene una excelente capacidad para estabilizar este tipo de formaciones.
- c) Para prevenir fuegos en zonas de aceite o gas cuando se utiliza aire para perforar.
- d) Para perforar en zonas productoras no consolidadas o de baja presión. La espuma sólo pesa de 2 a 4 lb/pie³ ejerciendo el mínimo de presión hidrostática, teniendo además poca o nula pérdida de fluido a la formación.
- e) Para limpiar de arena los pozos invadidos por arena de la formación.

- f) Para perforar lutitas sensibles al agua.
- g) Para perforar zonas de pérdida de circulación.
- h) Para enfrentar situaciones donde la disposición de aire no es económica, en localizaciones remotas, etc.

III.1.3 Ventajas.

Usando adecuadamente el sistema de perforación con espuma estable, proporciona las siguientes ventajas:

- a) Ejerce una presión hidrostática reducida, disminuyendo los daños a las formaciones de baja presión.
- b) Tiene una gran capacidad de acarreo proporcionada por su alta viscosidad, lo cual proporciona una limpieza efectiva del pozo. Se llega a obtener de 7 a 8 veces la capacidad de levantamiento de los fluidos convencionales acarreamo cortes hasta de 5 cm de diámetro.
- c) Se obtienen mayores ritmos de penetración, sobre todo en formaciones duras.
- d) Evita derrumbes de las paredes del pozo donde existen formaciones no consolidadas.
- e) Permite la perforación de pozos de gran diámetro donde se requeriría gran volumen de aire o gran capacidad de bombeo de lodo al perforarlos, haciendo más costosa la operación.
- f) Disminuye los riesgos de incendio pues atrapa en forma aislada las burbujas de gas contenidas en el pozo.
- g) Permite perforar acuíferos de baja aportación de agua.

III.1.4 Desventajas.

Se tienen las siguientes:

- a) Por la baja presión hidrostática aplicada al pozo debido a su baja densidad, no puede utilizarse en pozos con una presión de formación desconocida, pues se correría el riesgo de un descontrol.
- b) La eficiencia de la espuma disminuye cuando se contamina con agua salada o aceite propio de la formación, bajando su viscosidad y su capacidad de acarreo de cortes.
- c) La inversión sobre equipo adicional al convencional es muy alta.
- d) Cuando se requiera tomar registros eléctricos en los que se especifique lodo para su ejecución, no será posible obtenerlos.

III.1.5 Limitaciones de Operación.

Podemos mencionar las siguientes:

- a) Cuando se intente establecer una columna de espuma al inicio de la inyección, y se observe que tan solo con la mano se puede interrumpir el aire en la línea de descarga indica que no ha sido formada una espuma estable. Debe entonces incrementarse el volumen de fluido o disminuirse el de aire por poco tiempo. Un suave soplido del aire en la línea de descarga indica que la estabilidad de la espuma se ha iniciado en el fondo.

- b) Al salir la espuma a la línea de descarga se observaría como una columna constante.
- c) Una suave acción agitada, observada en la línea de descarga, es deseable y parece esencial para una buena capacidad de acarreo de los cortes. Si la espuma es muy espesa, la acción de agitación no ocurre. Si la espuma sale violentamente, indica una gran cantidad de aire. Este tipo de descarga puede someter al pozo a presiones irregulares innecesarias.
- d) La economía asociada normalmente con la profundidad limita la aplicación de la espuma (con bajo volumen de aire) a un rango de 5000 a 6000 pies.
Altos volúmenes de agua o aceite limitan el correcto aprovechamiento de la espuma. Frecuentemente pocas cantidades de gas pueden causar problemas. Debido a que la espuma no se recircula, el problema económico inicia asociado con la profundidad y el tiempo.
- e) En altos volúmenes de gas, agua salada o aceite encontrados, la asociación de problemas puede resolverse mediante el incremento de aire.

III.1.6 Equipo Empleado.

Además del equipo inherente a la perforación convencional usando lodo, se debe instalar los siguientes implementos auxiliares y mostrados en la Fig.4:

- 1) Compresores de aire. Son necesarios para suministrar el aire a la presión requerida para preparar la espuma. Puesto que los requerimientos son de solo 1500 pie³/min a 1200psi, son suficientes tres compresores de 4 etapas para asegurar suficiente aire en caso de problemas.
- 2) Bomba de Inyección de bajo volumen que maneje un promedio de alrededor de 14 gal/min a 250 psi.
- 3) Cabezal Rotatorio similar al usado en la perforación con aire.
- 4) Línea de Descarga sin accesorios.
- 5) Sustituto de Circulación constante para mantener la circulación cuando se hagan las conexiones.
- 6) Unión Giratoria. Utilizada en caso de que no se puedan hacer las conexiones. Va conectada al sustituto para mantener circulación en las conexiones.
- 7) Medidor de Aire tipo orificio.
- 8) Medidor de Flujo para la solución de agente espumante capaz de registrar gastos de 10 a 20 gal/min con aproximación de ½ gal/min.
- 9) Tanque de Inyección de 20 bls de capacidad.
- 10) Tanque de Lodo con bomba mezcladora y tolva.

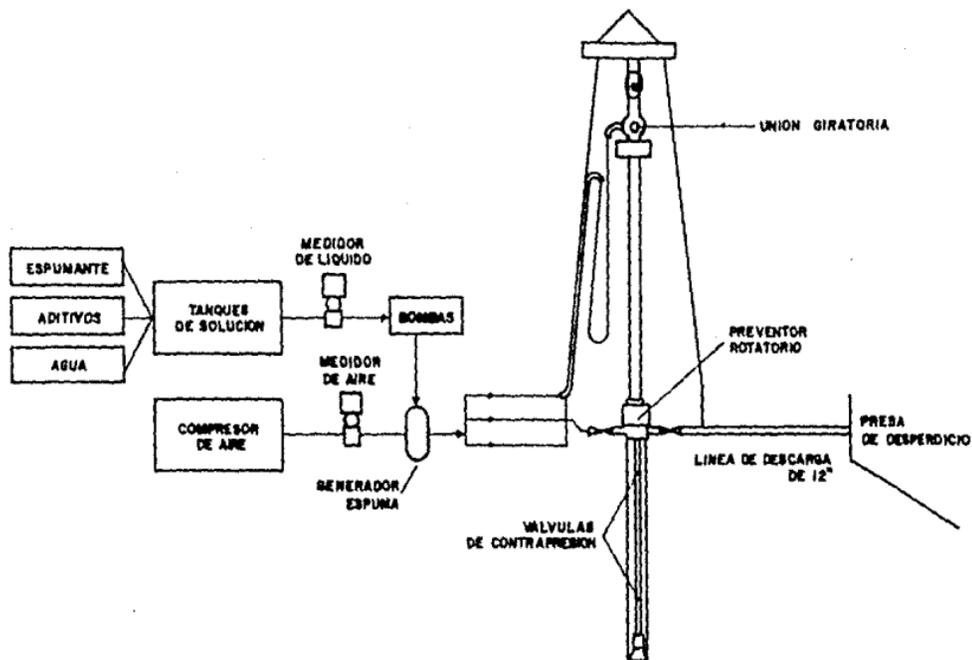


FIG. 4 OPERACION DEL SISTEMA DE ESPUMA

11) Generador de Espuma.

Donde la espuma es creada mezclando el agente espumante y el aire. Consiste de un recipiente con tubo Venturi para introducir el agente espumante y con una o varias entradas de aire. Está provisto de un empaque de arena clasificada malla 20/30, fibra de vidrio, acero u otro material de alta porosidad donde se provoca la mezcla. A la salida tiene una malla de acero con aberturas más pequeñas 20/80. La turbulencia que se crea dentro del recipiente da lugar a la formación de la espuma Fig.5.

12) Válvulas de Contrapresión. Una localizada arriba de la barrena y otra metros abajo de la superficie. Se usan para evitar que al realizar las operaciones de conexión o desconexión, la espuma se depresione y pierda sus propiedades.

13) Presa de Desperdicios, usada para deshechar la espuma de retorno que no debe ser recirculada.

III.1.7 Requerimientos de Volumen y Presión.

a) Aire.

El cálculo del volumen de aire requerido para proporcionar una velocidad anular de 200 pie/min no es tolerable por la compresibilidad. El peso de la espuma comprimiría algo de aire y la velocidad anular sería de 100 a 150 pie/min suficiente para la operación.

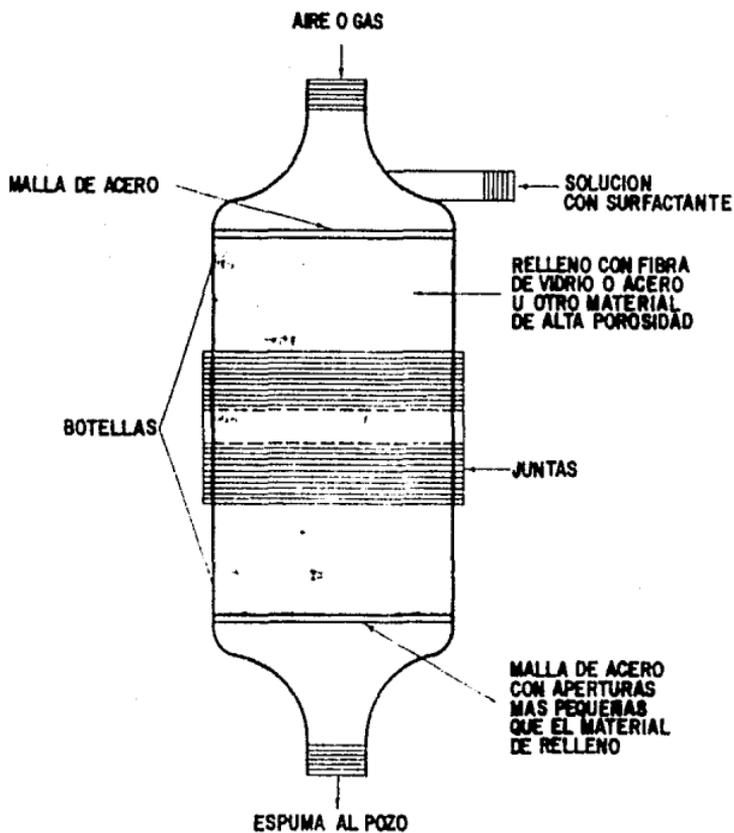


FIG. 5 GENERADOR DE ESPUMA

Mucho aire rompería la espuma y disminuiría su capacidad de acarreo. El volumen normal de aire necesario varía de 100 a 150 pie³/min para pozos de 6" y de 250 a 500 pie³/min para pozos de 15". La presión necesaria del aire varía mucho, de 50 a 500 psi, pero el rango general es de 200 a 300 psi.

b) Fluido.

Los requerimientos normales del fluido serían de 7 a 12 gal/min para pozos de 6" a 15". La experiencia ha demostrado que no es práctico inyectar menos de 6 a 7 gal/min en pozos más pequeños. En un pozo más grande a un alto ritmo de penetración, se necesitan más de 12 gal/min. Se requiere de un mínimo de 8 gal de fluido de mezcla base por cada pie³ de agujero perforado.

- c) Cuando existe una caída de presión súbita indica que la espuma es intermitente, el aire no formaría burbujas presentándose como fase continua impidiendo la formación de la espuma. Para solucionar este problema se incrementaría la inyección de líquido y/o disminuiría la inyección de aire.
- d) Un incremento gradual de la presión indicaría aumento de cortes o fluidos de la formación, solucionándose tan solo con incrementar lentamente el gasto de inyección de aire.

- e) Un incremento súbito de presión indicaría taponamiento de la barrena o reducción del área correspondiente al espacio anular causado por la depositación de cortes. Se soluciona parando la perforación y circular bajando y subiendo la sarta hasta observar la salida de cortes a la superficie.

III.1.B Remoción de Sólidos.

En condiciones normales, en la tubería de descarga se observaría una espuma semejante a la crema para rasurar. Las muestras que se han tomado indican un contenido de 3 % de líquido y 2 % de sólidos, lo cual indica que la espuma se dilata hasta en 30 veces su volumen original.

A causa de las bajas velocidades anulares (± 250 pie/min) el estado de la espuma de descarga es un indicio retardado de lo que sucede en el fondo del agujero. Los contaminantes de la espuma (aceite y agua salada) y las formaciones (arena, lutita y arcilla) se identifican observando el estado de la espuma en la descarga. Con espuma estable se han acarreado cortes que varían del tamaño de la arena (como la harina) hasta cortes de 2" de grueso.

Como ya se mencionó, regulando el régimen de inyección, el retorno de la espuma a la descarga puede ser continua o intermitente. En muchos casos, la intermitencia no indica que el pozo no ha sido limpiado satisfactoriamente.

La intermitencia ocurre cuando no se usan sustitutos de circulación mientras se hacen las conexiones. Mientras el retorno de la espuma sea regular y no tarde más de 15 minutos entre periodos de descarga, el sistema estará funcionando debidamente.

III.2 PERFORACION CON NIEBLA.

La niebla es la segunda variedad de uso del aire como medio de circulación de baja densidad. La niebla se forma de aire, agua y un agente tensoactivo. La fase continua la constituye el aire y una solución de agua-agente tensoactivo que se encuentra como fase dispersa en pequeñas gotas.

Cuando al estar perforando con aire se presentan flujos de agua, se procederá a la inyección de agente tensoactivo con agua dentro de la corriente de aire.

Para perforar con niebla y al prepararla, se requiere del 30% al 40% más de aire del que se usa normalmente en la perforación con aire, debido a tres razones principalmente:

- 1) La columna en el espacio anular es más pesada debido al peso del agua de formación.
- 2) Los recortes se mueven hacia arriba del agujero con su correspondiente peso.
- 3) Debido a la mezcla, algunos recortes se adhieren uno con otro, requiriéndose más volumen para alcanzar la velocidad adecuada en el espacio anular para levantar dichos recortes mayores.

Aún cuando las presiones de inyección de aire a 200 psi son normalmente suficientes, presiones de 350 psi son necesarias para perforar con niebla. Los agentes tensoactivos disminuyen los requerimientos de aire comparados con el aire fluyendo con el agua, sin embargo, la presión deberá incrementarse conforme aumente el manejo de agua que entra al pozo.

Se requiere una capacidad de presión de los compresores de aire de 200 a 1000 psi o más, sobre todo cuando aumente el manejo de agua. Se usan más de 1000 psi para descargar el pozo de agua acumulada durante los "viajes".

III.2.1 Problemas Asociados.

La corrosión de la tubería de perforación es siempre un problema cuando se encuentra agua de formación, para lo cual, se protegerá a la tubería saturando el agua con cal. En cuanto a la corrosión por sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, es difícil pronosticarla, por lo que se hace necesario aplicar una película de inhibidor del tipo amina junto con agua de cal.

Quizás el 75% de los problemas en la perforación con niebla se debe al insuficiente gasto de inyección de aire.

Cuando la tubería se pega en el agujero, la razón primordial es que el agujero no ha sido correctamente limpiado antes de efectuar una conexión. Cuando se presenta este problema, se recomienda circular suficiente aire dentro del pozo hasta que la niebla salga sin cortes en la superficie.

Las formaciones deleznable o con presencia de cavernas por derrumbes, causan grandes dificultades. Conforme se amplia el diámetro del agujero la velocidad en el espacio anular disminuye, disminuyendo a la vez la capacidad de levantamiento de los cortes. Por esto se hace necesario el aumento de volumen de aire inyectado para contrarrestar la velocidad de asentamiento de los cortes. La ausencia de cortes en la descarga y un aspecto lodoso de la niebla indican seguramente que el pozo se está agrandando.

III.2.2 Soluciones.

En la perforación con niebla, una buena bomba de inyección es importante. Pero no se debe suponer que cualquier gasto de inyección y cualquier mezcla de agua-agente tensoactivo son correctos. Una buena relación de requerimiento son 8 bl/hora de gasto con una mezcla de ¼ de agente tensoactivo/bl de agua.

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones cuando se presente el problema del agua:

- 1) Mantener el agujero tan seco y limpio como sea posible.
- 2) Un aumento en la concentración de agente tensoactivo da a la niebla más cuerpo e incrementa la capacidad de acarreo de cortes.
- 3) Incrementando el gasto de inyección se incrementa la capacidad de acarreo de la mezcla de niebla en el aire.

- 4) El agujero puede ser limpiado con 4 o más barriles de agente tensoactivo con agua. Este bache fluye a la superficie limpiando el agujero. Esto identificaria las cavernas y los anillos de lodo.
- 5) Debe inyectarse siempre un inhibidor de corrosión cuando se perfora con presencia de agua.
- 6) Debe limpiarse el pozo perfectamente antes de hacer cualquier conexión.

III.2.3 Equipo Utilizado.

El equipo utilizado en la perforación con niebla es esencialmente el mismo que el usado con aire. Su diferencia radica en el requerimiento de mayor capacidad de los compresores.

Es necesario además, contar con una bomba para inyectar la solución agua-agente tensoactivo a la corriente de aire.

III.3 PERFORACION CON LODO AIREADO.

Cuando el flujo de agua de la formación aumenta al manejarse mediante niebla de perforación, o cuando la pérdida de circulación es un problema, el fluido o lodo aireado de perforación es utilizado para reducir la densidad de la columna de fluido de retorno y la presión hidrostática sobre la formación, mediante la inyección de aire y lodo simultáneamente al múltiple del piso.

Los volúmenes de aire para la aireación son más pequeños que los usados en la perforación con aire o con niebla y son medidos en pie³/bl de lodo.

El volumen de aire para la correcta aireación de una columna de lodo puede controlarse mediante toberas y reguladores.

Un fluido o lodo aireado ideal combina aire y lodo en una espuma estable y homogénea que no rompa abajo y se separe hasta que regrese a las presas en la superficie antes de llegar a las bombas de lodos.

III.3.1 Ventajas y Desventajas.

Además del uso del lodo aireado en zonas de pérdida de circulación y en zonas de relativa aportación de agua, el método presenta otras ventajas adicionales, tales como:

- a) Incremento en el ritmo de penetración.
- b) " en la vida de las barrenas.
- c) Disminuye los riesgos de explosión.

- d) Es más seguro, pues si se llegara a manifestar el pozo con presión, la densidad sería aumentada rápidamente tan solo con dejar de inyectar aire a la corriente de lodo.
- e) Pozos menos desviados.

Aún cuando no se tiene información de su uso en operaciones de reparación, no se descarta esta posibilidad.

La principal desventaja de este sistema es la económica, pues se requiere un elevado costo de inversión en equipo adicional al convencional.

Otras desventajas son el conocimiento inadecuado del método por parte de la gente de operación, pues según la experiencia de fracasos mencionados por la literatura, estos se deben a que se planea erróneamente como perforación con aire. En realidad la función del aire es solo aligerar la columna hidrostática; la función de control y limpieza del pozo corresponde al lodo.

La corrosión es otro problema en la sarta de perforación cuando se presenta flujo de aire y agua de la formación. El uso de fluido aireado con PH mayor de 10 y de agua saturada con cal ha disminuido daños excesivos a la tubería.

III.3.2 Métodos de Aireación.

Respecto a las técnicas de aireación del lodo, se distinguen dos clases: superficial o subsuperficial, dependiendo del lugar donde se lleve a cabo la inyección del aire. A continuación se describen tres métodos utilizados: El Convencional, el de Tubería Parásita y el Método de Tubería Concéntrica. Además se mencionan algunos aspectos importantes de cada uno.

La elección del método se hace después de un estricto análisis económico de cada uno, comparándolos por ventajas y costos. El Método Convencional es el de mayor uso pues es de menor costo y requiere de menos tiempo para instalarse. Los otros métodos son más caros, su instalación requiere de más tiempo y se descartan para efectuar trabajos aislados o de perforación exploratoria.

III.3.2.1 Método Convencional.

En este procedimiento el lodo y el aire se mezclan en la superficie, manejándose cada fase por separado tal como se muestra en la Fig.6. El aire se inyecta en el tubo vertical. La relación aire-lodo se controla incrementando o disminuyendo el gasto de alguno de los dos fluidos.

Además del equipo empleado en la perforación convencional, se requieren implementos adicionales para el desarrollo de esta técnica. Tales implementos o dispositivos especiales son:

a) Compresor. Que se utiliza para aplicarle al aire una presión suficiente para inyectarse a la línea de lodo. Generalmente se ha utilizado un compresor de tres o cuatro etapas de una potencia alrededor de 250 HP y que entreguen una presión del orden de 1500 lb/pg².

b) Válvulas de Contrapresión. Se agregan dos válvulas de contrapresión para prevenir el contraflujo de lodo hacia el compresor. Una se instala cercana al tubo vertical y debe ser de cierre rápido y la otra, instalada cerca de los tanques de aire o compresor y debe ser de tipo amortiguadora.

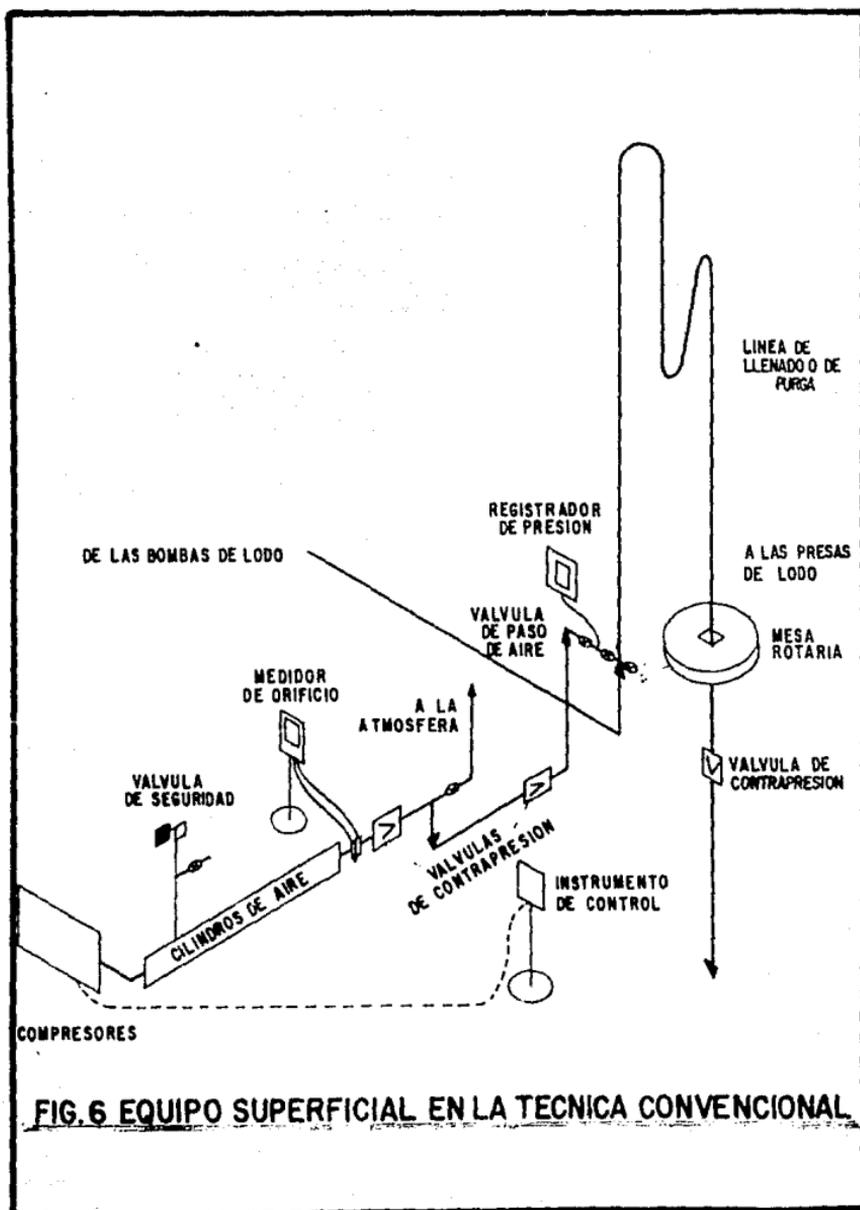


FIG. 6 EQUIPO SUPERFICIAL EN LA TECNICA CONVENCIONAL

Además, se agrega una tercera válvula de contrapresión o de retención en la tubería de perforación para evitar el contraflujo durante las operaciones de conexión y contener el fluido comprimido de la sarta. Debe ser diseñada para permitir el paso de un cordón explosivo, en caso de ser necesario, y se instala inmediatamente bajo la flecha.

c) Tanques de Aire. Se usan con el fin de proteger los cilindros de los compresores cuando se cierra la válvula de paso que comunica al tubo vertical. Se han usado tanques adicionales para dar tiempo a los instrumentos de control a que paren el compresor y descarguen sus cilindros, ya que continúa proporcionando aire hasta alcanzar la presión de descarga de diseño.

d) Barrenas. Generalmente se usan las mismas barrenas convencionales.

e) Cabezal Rotatorio. Se usa para evitar el derrame de fluido sobre y/o debajo del piso, así como para controlar el flujo de gas. Se instala generalmente sobre los preventores y sella contra la tubería.

f) Tubería de Descarga. Con objeto de propiciar la separación del aire y del lodo, así como reducir la velocidad del aire, es conveniente usar una tubería de diámetro grande (20" para manejar los cortes y fluidos provenientes del pozo. Esta tubería debe inclinarse en ángulo suficiente para evitar el asentamiento de los cortes. Al extremo final de la tubería se colocan tramos con inclinación de 45° para disminuir la turbulencia del flujo.

g) Desgasificador. Se usa para evitar problemas de operación cuando ocurre un flujo en baches de líquido seguido de bolsas de aire. Su diseño se hace de acuerdo a las necesidades de cada pozo. Se han utilizado como el mostrado en la Fig.7.

h) Presa de Almacenamiento. Al introducir aire al sistema hidráulico, tiene lugar un desplazamiento del lodo por el aire, por lo que se necesita una presa adicional para recibirse el volumen desplazado de líquido.

i) Sustitutos de Inyección. El sustituto de inyección es un dispositivo provisto de una tobera dirigida hacia arriba, con el objeto de permitir la salida del aire y además es auxiliar en la limpieza de pozo. Se utilizan para descargar el pozo colocando uno de ellos inmediatamente arriba de la zona de pérdida y otro 150 o 300m abajo de dicha zona, o bien, a 500 y 800m de la superficie dependiendo de la profundidad. Se ha determinado que las dimensiones de los orificios de los sustitutos deben permitir el paso de todo el aire a la presión de 1000 lb/pg² y solo una pequeña parte del lodo aireado en la operación manual.

Operación.

Para iniciar la técnica mediante el método convencional, el lodo es circulado hasta obtener un gasto mínimo necesario para limpiar el pozo, ajustando el control automático del compresor a una presión mayor a la de inyección del aire.

Se abre entonces la válvula de comunicación de la compresora al tubo vertical permitiendo el paso del aire a la corriente de lodo, igualando presiones.

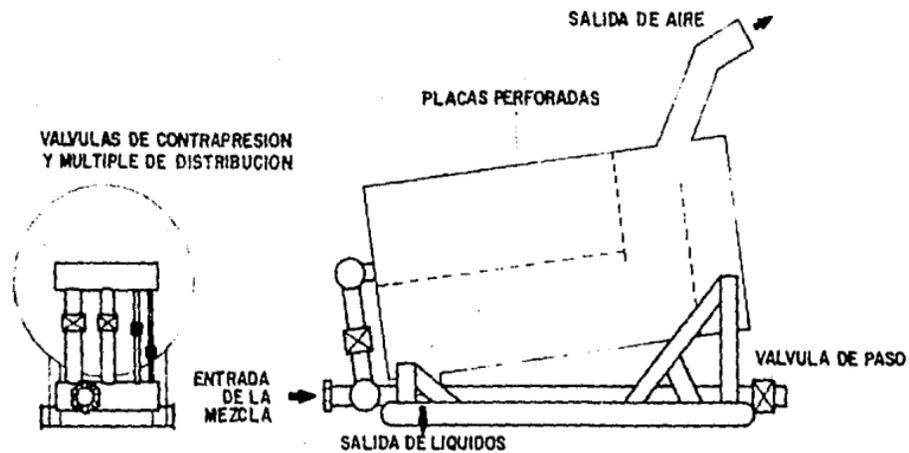


FIG. 7 SEPARADOR DE FLUIDOS EN LA TECNICA CONVENCIONAL

Se revisará el indicador de peso y se reajustará el peso sobre barrena después que el lodo aireado alcance la superficie, puesto que aumentará por efecto de la aireación.

Antes de conectar algún tramo a la sarta, debe suspenderse la inyección de aire y circularse lodo el tiempo necesario para desplazar el fluido contenido arriba de la válvula de contrapresión de la sarta. Se abre la línea de llenado para purgar cualquier presión atrapada.

Cuando se saca todo el aparejo por cambio de barrena o por alguna razón, es necesario desplazar el lodo aireado contenido en el pozo debido a que:

- Es posible que se presente cabeceo de fluido al sacar la tubería.
- Se puede controlar mejor la verticalidad del agujero con la toma de lecturas.
- Puede probarse la resistencia de la formación perforada.

Diseño del Sistema.

La estimación de los gastos de aire y lodo que deben manejarse con objeto de obtener una presión requerida en el fondo, se hace mediante las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{(P-P_o) + \frac{B}{A+C} (A-C)}{2(A-C)^2} \log_e \left[\frac{(A+C)P^2 + 2CBP + CB^2}{(A+C)P_o^2 + 2CBP_o + CB^2} \right] - \frac{2B}{(A+C)^2} \left[\frac{\tan^{-1} \frac{(A+C)P + CB}{B(A+C)}}{B(A+C)} - \frac{\tan^{-1} \frac{(A+C)P_o + CB}{B(A+C)}}{B(A+C)} \right] \quad 1$$

$$A = 0.00708 [(Q_a/Q_m) D_a + D_m]$$

$$B = 15 [(Q_a/Q_m) + 0.02]$$

$$C = \frac{0.00063 Q_m^2 [(Q_a/Q_m) D_a + D_m]}{(D_2 - D) (D_2^2 - D^2)^2}$$

Donde:

- Qa = Gasto de aire, pie³/min.
Qm = " " lodo, "
Da = Densidad del aire, lb/pie³.
Dm = " " lodo, "
D2 = Diámetro del agujero, pg.
D = " de tp, pg.
X = Profundidad, pie.
P = Presión a la profundidad X, lb/pg² abs.
Po = Presión superficial, lb/pg².

De los estudios técnicos, Poettmann y Bergman determinaron ecuaciones para estimar la relación aire-lodo requerida, a fin de obtener la reducción de la densidad del lodo.

Para una columna de lodo en condiciones estáticas:

$$\Delta h = \frac{5.61 (P_1 - P_2) + 4.071 \bar{T} S \ln P_1/P_2}{350.06 G' + 0.0764 S} \quad \text{---} 2$$

Donde:

- P = Presión absoluta, lb/pie².
 Δh = Diferencia de profundidades, pie.
G = Densidad relativa deseada.
G' = " " del lodo.
S = Relación aire-lodo, pie³ @ 14.7 psia 60°F/bl lodo.
 \bar{T} = Temperatura promedio del lodo, °R.

También presentan ecuaciones para la predicción del comportamiento del fluido en el espacio anular:

$$\Delta h = \frac{5.61 (P_1 - P_2) + 4.071 \bar{T} S \ln P_1/P_2}{(350.06 G' + 0.0764 S) \left[1 + \frac{f D V_m^2}{10 S} \right]} \quad \text{---} 3$$

$$S = \frac{D^2 (D_1 + D_2)^2 (D_1 - D_2)}{4} \quad \text{---} 4$$

$$V_m = 5.61 + \frac{4.071 \bar{T} S \ln P_1/P_2}{P_1 - P_2} \quad \text{---} 5$$

Donde:

- D = Diámetro equivalente, pie.
D1 = " interior de TR, pie.
Vm = Valor integrado de Vm entre las presiones P1 y P2.
Vm se define como el volumen de la mezcla aire-lodo por barril de lodo.
D2 = Diámetro exterior de la TP, pie.

Para estimar la presión de fondo, encontraron la siguiente ecuación:

$$P_1 = P_2 + h (62.4) G$$

En la que se supone una condición estática del lodo, siendo P_2 la presión en la cabeza del pozo.

De las experiencias de campo y mencionadas en la literatura para esta técnica convencional, se han manejado en promedio relaciones aire-liquido que varían en el rango de 10 a 60 m³/m³. Los gastos de lodo son del orden de 100 a 400 gal/min y el aire suministrado a gastos promedio de 500 a 2000 pie³/min.

III.3.2.2 Método de la Tubería Parásita.

Este método fue desarrollado en 1968 por Murray para reducir la presión hidrostática del lodo en zonas con pérdida de circulación.

El método consiste en inyectar aire a una profundidad del pozo mediante una tubería delgada unida a la TR intermedia con unas abrazaderas, como se muestra en las Figs. 8 y 9. La TR se cementa normalmente llevando consigo la tubería parásita integrada.

Equipo Requerido.

El aparejo subsuperficial se muestra en la Fig. 9, donde la TR no se encuentra centrada pues deja un espacio para la colocación de la tubería parásita. Se instala un estrangulador a la tubería parásita con el objeto de crear una caída de presión y mantener un gasto constante de inyección.

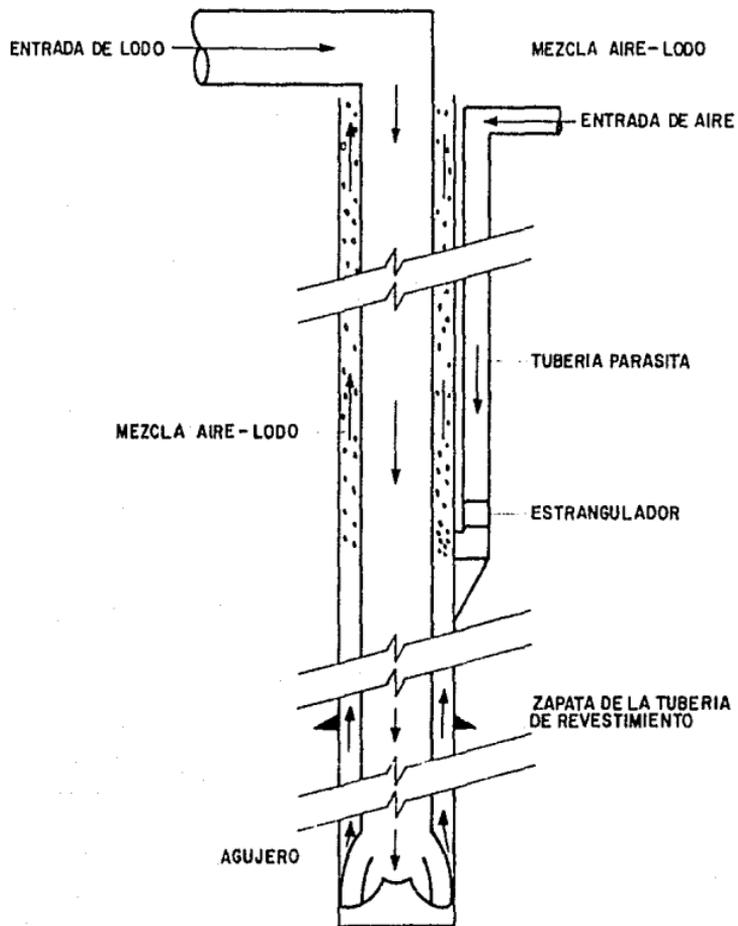


FIG. 8 METODO DE LA TUBERIA PARASITA

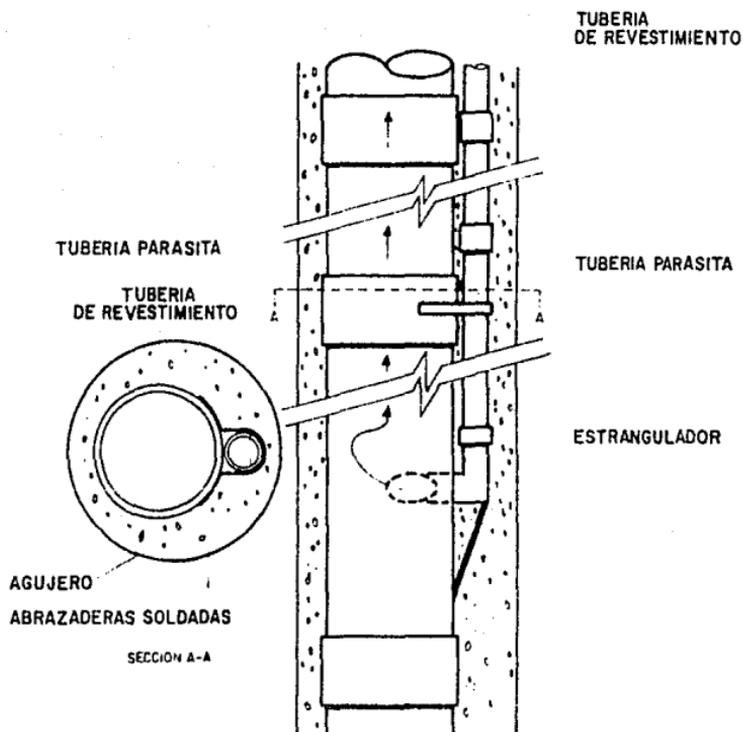


FIG.9 SARTA DE LA TUBERIA PARASITA

Se utiliza el mismo equipo superficial que el usado en el convencional, con la diferencia de que el fluido retorna directamente a la presa de asentamiento, que debe ser cerrada, sin antes pasar por un desgasificador, debido a que se manejan pocas cantidades de aire.

Operación.

Las tuberías parásita y de revestimiento se corren simultáneamente y después de cementarlas, es necesario circular agua por la tubería parásita para asegurar su limpieza.

Mediante este método no se requiere suspender la inyección de aire durante las conexiones, porque toman poco tiempo y se manejan bajos volúmenes de aire.

La profundidad del punto de inyección de la tubería parásita está determinada por la máxima reducción en la presión para disminuir las pérdidas de circulación. La reducción usada es una función de la profundidad de la tubería parásita, de la relación de gastos aire-lodo y de la densidad del lodo.

Para este método se dedujo una relación práctica de 25 m³/m³ como la más conveniente. Se utilizaron gastos de aire del orden 4000 pie³/min a una presión de descarga de 800 lb/pg².

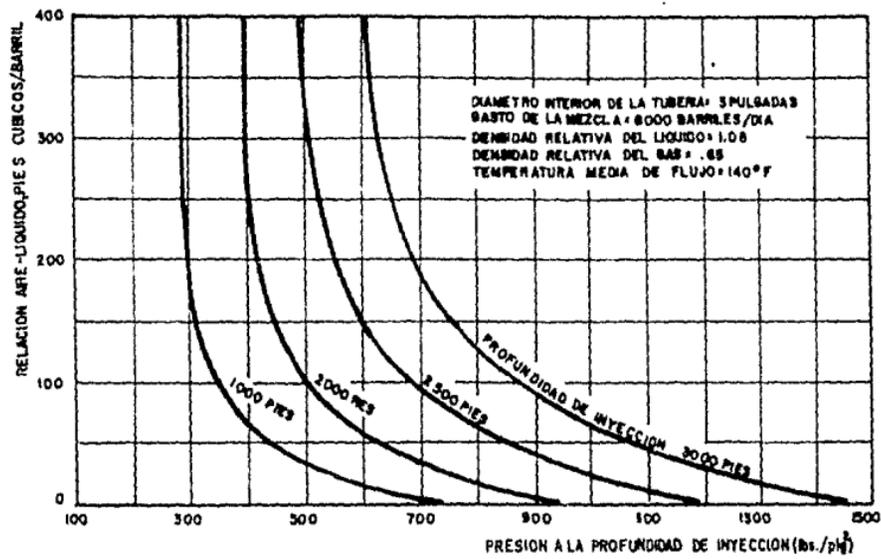
Cuando se ha interrumpido la circulación por mucho tiempo, se supone al aire separado del lodo, por lo que se inyecta aire antes que bombear lodo. Cuando se detecta un movimiento de lodo, manifestado como caída de presión del aire, se inicia el bombeo de lodo hasta balancear la relación aire-lodo.

Selección del Punto de Inyección.

Para definir el punto de inyección se utilizan curvas como las mostradas en las Figs.10,11 y 12, que describen el comportamiento de la presión del lodo con la profundidad para diferentes profundidades de inyección.

En el caso particular del área donde se aplicó este método y para el cual se desarrollaron las curvas, se consideraron dos probables profundidades de inyección, 2500 y 3000 pies, suponiendo un nivel estático de 1000 pies desde la superficie. Se observa que para reducir la presión hidrostática del lodo a la profundidad de 3000 pies, es necesario que la relación aire-líquido sea mayor de 100 pie³/bl. Con esta relación la presión sería de 925 lb/pg² y de 870 lb/pg² a 3000 pie de profundidad si los puntos de inyección se localizaran a 2500 y 3000 pie, respectivamente.

De la gráfica anterior se concluyó que la relación aire-líquido debe ser mayor de 100 pie³/bl. Para determinar el punto de inyección y la relación aire-líquido definitiva, se elaboró la gráfica de la Fig. 12 donde se muestra la variación de la presión a la profundidad de 300 pie respecto a la profundidad de inyección, para diferentes valores de relación aire-líquido. Con esta gráfica se dedujo que mediante una relación aire-líquido de 140 pie³/bl inyectando aire a 2500 pie, puede obtenerse la misma presión que con un valor de 100 pie³/bl cuando se inyecta a 300 pies.



**FIG-10 VARIACION DE LA PRESION A LA PROFUNDIDAD DE INYECCION
 CON LA RELACION AIRE - LODO**

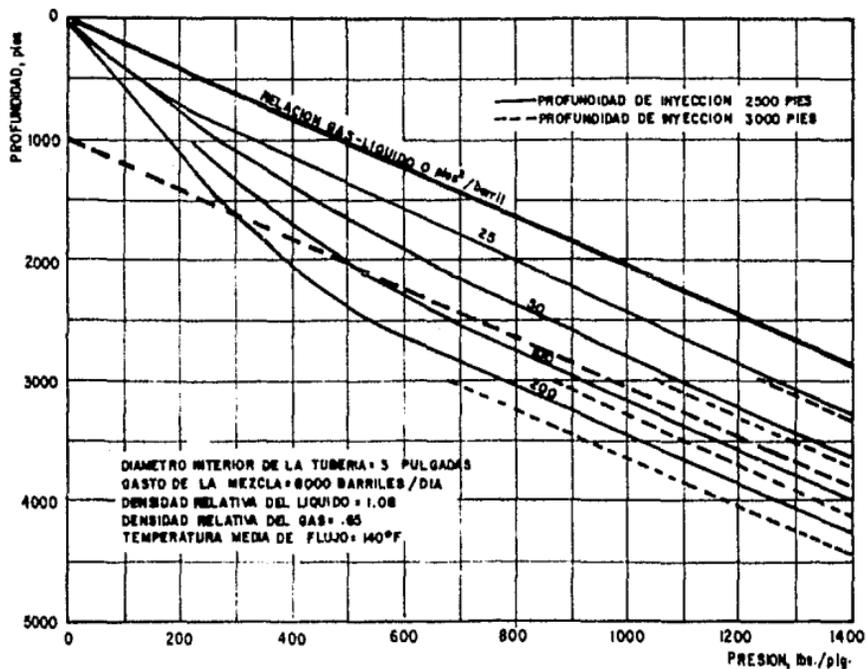


FIG. II VARIACION DE LA PRESION CON LA PROFUNDIDAD PARA
 DIFERENTES RELACIONES GAS-LIQUIDO

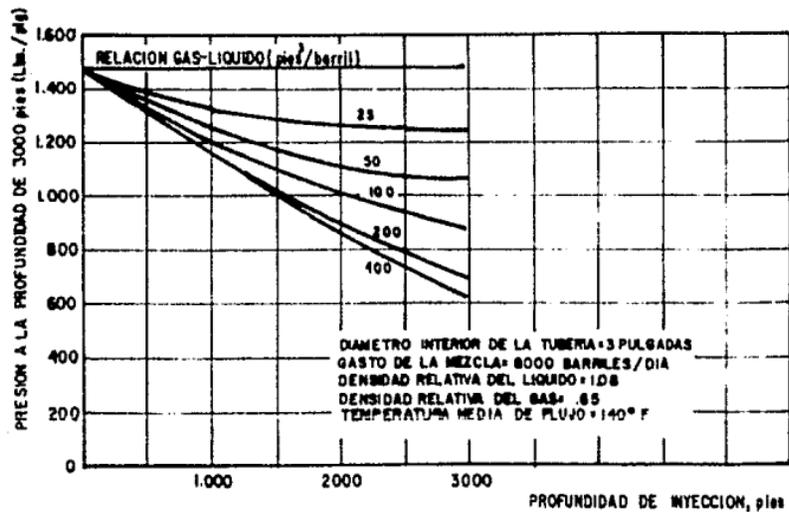


FIG.12 VARIACION DE LA PRESION A LA PROFUNDIDAD DE 3000 PIES

En este caso particular se decidió inyectar aire a una profundidad de 2500 pies con una relación aire-liquido de 140 pie³/bl porque significaba una inversión menor al emplear 500 pies menos de tubería; además las necesidades de compresión eran casi las mismas que a 3000 pies con relación de 100 pie³/bl.

Para obtener las curvas de las Figs. 10, 11 y 12 se utilizaron curvas de gradientes de presión elaboradas para diseñar aparejos de bombeo neumático, donde se tenían condiciones similares de densidad, gastos de flujo y diámetros de tuberías.

III.3.2.3 Método de la Tubería Concéntrica.

De igual forma al de la tubería parásita, a una profundidad determinada se inyecta aire a la corriente de lodo. Para esto se utiliza un equipo especial denominado CON-COR, que consiste de dos conductos por donde circulan el aire y el lodo en forma separada, hasta una cierta profundidad donde se mezclan, como se muestra en la Fig. 13.

Se observa que el aire puede ser inyectado por el interior o por el espacio anular de la tubería CON-COR.

Equipo Empleado.

En la Fig. 14 se muestra el arreglo del equipo superficial adicional y que consiste de lo siguiente:

- a) Cabezal Rotatorio para sellar el paso de la mezcla aire-lodo.
- b) Flecha y Unión Giratoria CON-COR que tienen dos conductos.

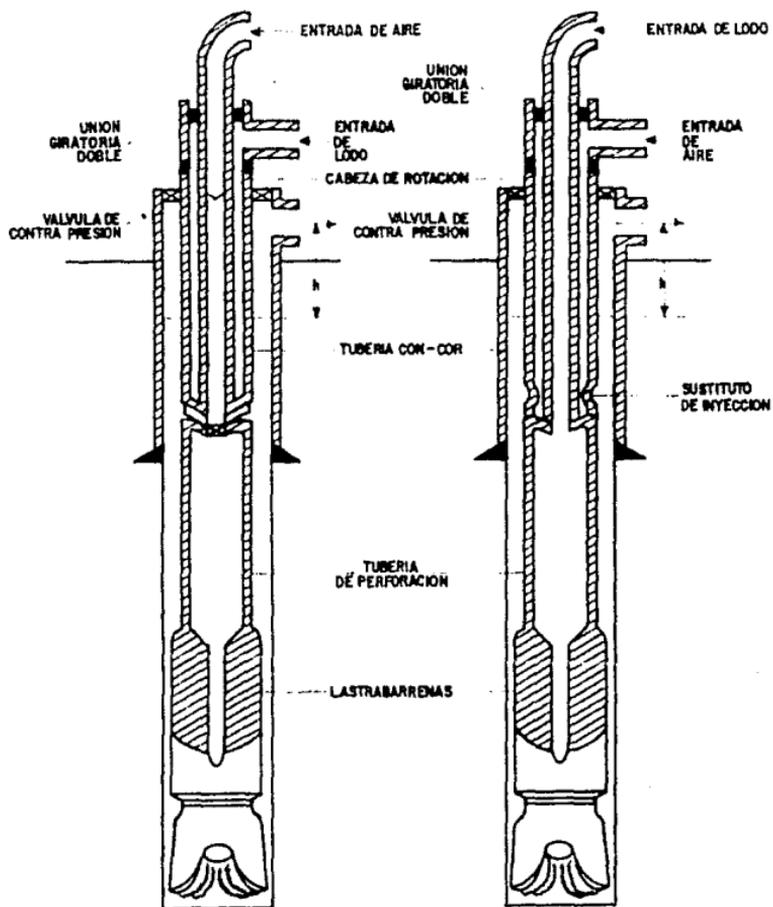


FIG. 13 METODO DE LAS TUBERIAS CONCENTRICAS

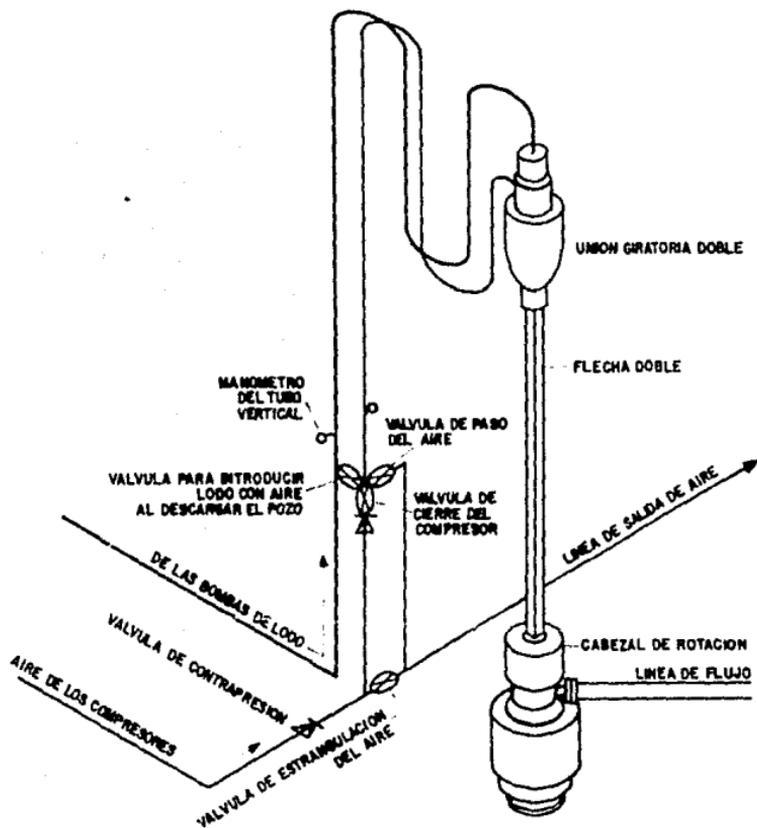


FIG.14 INSTALACIONES SUPERFICIALES EN EL METODO DE TUBERIAS CONCENTRICAS

- c) Manueras, una para el aire y otra para el lodo.
- d) Compresores de Aire. Generalmente de 100 a 250 HP con presión de descarga de 1500 psi.

La Fig. 15 muestra el aparejo subsuperficial, integrado por tubería CON-COR, un sustituto de inyección, TP normal de perforación, tubería pesada y la barrena.

La tubería CON-COR tiene dos conductos y se debe acoplar a la flecha de transmisión. Mediante el sustituto de inyección, el aire se incorpora al lodo a una profundidad predeterminada.

También se requiere de una válvula de contrapresión que se instala en el conducto de aire una junta después de la flecha, con el fin de conservar el aire a presión durante las operaciones de conexión.

Quando el aire se introduce por el interior de la tubería CON-COR, debe colocarse un tapón recuperable abajo del sustituto de inyección para mantener las fases separadas.

Operación.

Con el objeto de disminuir la presión de arranque de circulación del pozo, es conveniente inyectar simultáneamente aire y lodo por el conducto donde posteriormente se inyectará gas o aire a través de la tubería CON-COR. El gasto de lodo debe ser el necesario para que la velocidad del fluido en el espacio anular del agujero sea la programada y la compresora debe suministrar los volúmenes de aire que se inyectarán durante la operación normal.

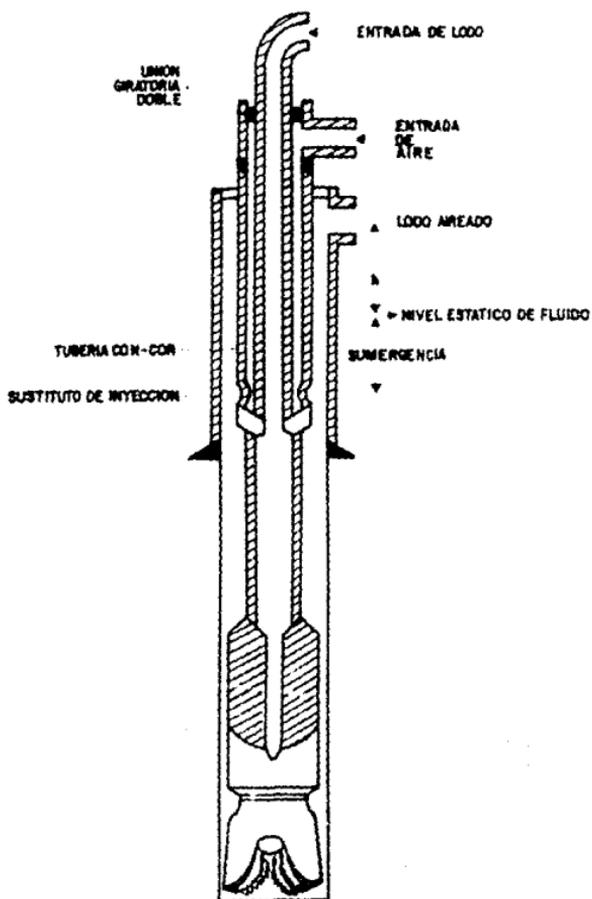


FIG. 15 PERDIDAS DE CIRCULACION

Una vez que se obtengan retornos de lodo aireado, se disminuye gradualmente el gasto de líquido a través del conducto de aire hasta llegar a cero. En esta última condición debe ajustarse el gasto de aire para que no se gane ni se pierda lodo en las presas.

Antes de llevar a cabo conexiones en la sarta de perforación se debe parar la bomba de lodo y cerrar la válvula de paso de aire. Enseguida se purga el aire de la manguera y de la flecha.

Para reintegrar la circulación de fluidos después de efectuar una conexión, se deja pasar el aire y se reinicia la inyección de lodo para continuar la perforación.

Con el fin de cambiar la barrena se debe extraer toda la sarta. Antes de hacer esto, debe purgarse la presión que se encuentra dentro de la tubería CON-COR, para lo cual se utiliza un dispositivo especial que se atornilla en la parte superior de la válvula de contrapresión colocada inmediatamente después de la flecha.

Durante la perforación con una sola barrena, tanto la válvula de contrapresión como el sustituto de inyección son desplazados de su posición original, por lo que deben ser relocalizados en cada viaje, ya que se puede conservar un mayor volumen de aire a presión dentro de la sarta y el punto de inyección debe permanecer a la misma profundidad, mientras no cambie el nivel del lodo.

CAPITULO IV

EJEMPLO PRACTICO DE APLICACION

IV.1 ANTECEDENTES.

Como se mencionó al inicio de este trabajo, la técnica de perforación con aire requiere de estudios confiables de las formaciones por perforar y de la capacitación del personal de operación en el manejo de los equipos y herramientas especiales para dicha técnica.

La perforación con aire en México ha sido escasa, sin embargo, los pocos casos en que se logró desarrollar el trabajo dieron resultados satisfactorios. En general, el principal problema presentado fue la falla de los equipos y herramientas especiales, debido al desconocimiento del personal en cuanto a mantenimiento y operación de las mismas se refiere.

A continuación se presenta una breve historia del pozo Raudales 1 perteneciente a la Zona Sureste, Distrito Villahermosa y perforado en su intervalo de 2934-3148m con agua aireada.

El intervalo de perforación de este pozo corresponde a una dolomía gris, compacta perteneciente al Cretácico Medio, que por su inestabilidad mecánica, se presentaban pérdidas de circulación con lodo de baja densidad. Se decidió entonces, probar la técnica de perforación con aire.

La instalación del equipo y accesorios necesarios, adicionales al equipo convencional, se realizó en 15 días, dificultándose por falta de espacio.

IV.2 OPERACION.

Primera Etapa. Con pozo perforado a 2934m, metió barrena de 12" nueva, repasó y estabilizó agujero de 2415m a 2934m con agua aireada, con 40 lt de espumante y 10 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bls de agua por hora, con una presión inicial de 150 lb/pg² y de 300 lb/pg² durante la operación, no observando circulación. Se instaló el preventor rotatorio inyectando aire a 550 lb/pg² sin lograr aún circulación. Se bombeó un bache de 12 m³ de agua para eliminar la burbuja de aire y poder quitar preventor rotatorio. Levantó barrena a 500 m reinstalando preventor rotatorio e inyectando aire a 550 lb/pg², rompiendo circulación a los 60 min. Bombeó 6 m³ de agua para eliminar burbuja de aire, eliminó preventor rotatorio y metió barrena a 1524m, quedando eyector 6 1/4" con tobera 3/16" a 500 m. Inyectó agua aireada a 550 lb/pg² agregando 40 lt de espumante cada 10 bls por hora, rompiendo circulación a los 60 min. Bombeó 18 m³ de agua para eliminar burbuja de aire y eliminó preventor rotatorio. Sacó barrena a 1000 m, cambió sustituto y metió a 2934 m, quedando mismo a 697 m. Trató de circular con 750 kg/cm² de aire sin éxito. Bombeó bache de 28 m³ de agua, eliminó preventor rotatorio y saco a 2432 m. Instaló segundo inyector 6 1/4" con tobera 6/16" a 501 m. Metió barrena al fondo e inyectó aire a 750 kg/cm² con 2 compresores y 40 lt de espumante cada 10 bls de agua por hora, rompiendo circulación a los 60 min.

Perforó de 2934m a 2952m estabilizando agujero cada 2 horas con 20 lt de espumante por cada 10 bls de agua por hora. Bombeó 28 m³ de agua para eliminar la burbuja de aire y quitar el preventor rotatorio. Saco la barrena a la superficie.

Segunda Etapa. Metió barrena nueva de 12" a 1500 m, colocó preventor rotatorio e inyectó aire a 600 lb/pg² con 20 lt de espumante cada 10 bls de agua por hora, rompiendo circulación a los 45 min. Levantó a 957 m para eliminar sustituto inyector. Metió barrena a 2921 m encontrando resistencia. Quedaron sustitutos de inyección a 714 y 520 m. Restableció circulación con 700 lb/pg² de aire, inyectando 40 lt de espumante cada 10 bls de agua por hora. Repasó resistencia y perforó hasta 2985 m. Bombeó 100 m³ de agua para eliminar burbuja de aire, quitar preventor rotatorio y sacar barrena. Sacó barrena a superficie con 55 insertos rotos y una tobera tapada.

Tercera Etapa. Cambió barrena por nueva de 12" y metió a 2922 m. Colocó sustituto inyector a 600 m. Instaló preventor y bombeó agua aireada a 900 lb/pg² con 30 lt de espumante cada 10 bls de agua por hora, observando circulación a las tres horas. Bajó a 2930 m encontrando resistencia, repasó e inyectó agua aireada sin restablecer circulación. Bombeó 44 m³ de agua para eliminar burbuja y quitar preventor. Bajó barrena a 2940 m y repasó a 2954 m con 30 lt de espumante y 2 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bls de agua por hora, persistiendo la resistencia. Repasa a 2985 m con las mismas condiciones.

Perforó a 3006 m con lodo bentonítico de 1.02 x 40 aireado y con 40 lt de espumante y 2 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bl de agua por hora, con una presión de aire de 900 lb/pg². Perforó a 3007 m, circuló e intentó perforar sin éxito por incrementarse la torsión. Bombeó 90 m³ de agua para eliminar burbuja de aire y quitó preventor. Sacó barrena a superficie con 40 insertos rotos y sin dos aletas. Bajó canasta colectora y recuperó mismos 100%.

Cuarta Etapa. Metió barrena nueva 12" a 2067 m circulando agua aireada a 750 lb/pg² con 60 lt espumante y 4 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bls de agua por hora. Cambió preventor rotatorio y bombeó 20 m³ de agua eliminando burbuja de aire. Metió barrena a 2983 m y colocó sustituto inyector a 2400 m. Con barrena a 3001 m bombeó agua aireada a 900 lb/pg² con 60 lt de espumante y 4 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bls de agua por hora. Perforó a 3020 m suspendiendo por observar aumento de torsión. Restableció circulación con mismas condiciones, observando pérdida de peso. Bombeó bache de 200 lt de espumante y 100 m³ de agua para eliminar burbuja de aire. Quitó preventor rotatorio y sacó sarta, quedando de pez barrena y lastrabarrenas. Operó en pesca recuperando pez 100%.

Quinta Etapa. Cambió barrena por nueva de 12" y metió a 1530 m, colocó válvula de contrapresión. Aireó pozo con 900 lb/pg² con 40 lt de espumante cada 10 bl de agua por hora. Observó circulación a los 105 min. Bombeó 15 m³ de agua para eliminar burbuja de aire, cambió preventor y metió barrena a 2979 m.

Aireó pozo con mismas condiciones sin lograr circulación. Sacó a superficie saliendo eyector tapado. Metió barrena a 3006 m, colocó válvula de contrapresión y preventor rotatorio. Aireó pozo con 900 lb/pg² y 60 lt de espumante cada 10 bl de agua por hora. Perforó a 3105 m con eyectores a 750 y 500 m. Circuló con 30 lt de espumante y 5 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bl de agua por hora. Bombeó bache de 30 m³ para eliminar burbuja de aire y quitar preventor. Sacó barrena con 25 insertos rotos. Bajó canasta colectora y recuperó mismos 100%.

Sexta Etapa. Metió barrena nueva 12" a 1542 m, instalando preventor rotatorio y válvula de contrapresión. Aireó pozo con 900 lb/pg² de aire y con 65 lt de espumante y 5 lt de inhibidor de corrosión cada 10 bl de agua por hora. Bajó barrena a 3105 m y perforó a 3138 m con 900 lb/pg² con 2 compresores, 30 lt de espumante cada 10 bl de agua por hora. Bombeó bache de 30 m³ para eliminar burbuja. Sacó barrena con 63 insertos rotos. Bajó canasta colectora recuperando mismos.

Séptima Etapa. Cambió barrena por nueva de 12" y aireó pozo con 850 lb/pg² con 2 compresores y 60 lt de espumante y 8 lt de inhibidor de corrosión por cada 10 bl de agua por hora. Perforó hasta 3148 m con eyectores a 769 y 516 m. Suspendió por cambio de programa. Bombeó 100 m³ de agua para eliminar burbuja y preventor rotatorio.

Desmanteló equipo empleado para perforar con aire en 6 días. Corrió y cementó TR de 9 5/8" a la profundidad perforada de 3148 m.

IV.3 REGISTRO DE BARRENAS.

Profundidad inicial de perforación = 2934 m.

Fluido de perforación = Agua Aireada.

| | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Diámetro (pg) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Tipo | 527 | 527 | 527 | 527 | 527 | 527 | 527 |
| Toberas | s/t |
| Profundidad Final (m) | 2952 | 2985 | 3006 | 3020 | 3105 | 3137 | 3148 |
| Metros Perforados | 18 | 33 | 21 | 14 | 85 | 32 | 11 |
| Horas | 17 | 22 | 11 | 9 | 27 | 15 | 7 |
| Promedio metros/hora | 1.06 | 1.50 | 1.91 | 1.55 | 3.15 | 2.13 | 1.57 |
| Peso Sobre Barrena (ton) | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Velocidad de Rotaria (rpm) | 60 | 70 | 70 | 60 | 70 | 60 | 50 |
| Presión de Bomba (kg/cm ²) | 45 | 50 | 60 | 60 | 65 | 65 | 60 |
| Gasto de Agua (gal/min) | 120 | 120 | 107 | 107 | 86 | 86 | 90 |
| Observaciones (insertos rotos) | 2 | 55 | - | - | 25 | 63 | - |

CONCLUSIONES

De lo anterior expuesto puede concluirse que:

- La perforación con aire y con fluidos aireados es más económica que la perforación con fluidos convencionales.
- El uso de estas técnicas se desarrollan en casos particulares y bajo condiciones específicas, por lo que es necesario elaborar un buen estudio de la zona por perforar.
- La aplicación de estas técnicas tiene como limitantes la presencia de agua, de gas, zonas deleznable, etc. Sin embargo, los problemas que se presenten pueden eliminarse ajustando los parámetros de perforación para el caso particular que se trate.
- Debido al alto costo del equipo especial para perforar con aire, adicional al equipo convencional, es necesario evitar cualquier suspensión de la operación, pues se eliminaría el gasto economizado en la preparación del lodo convencional de perforación.

Por lo anterior y en base a los trabajos prácticos realizados se han considerado las siguientes recomendaciones:

- 1.- Debe tenerse especial cuidado en el buen funcionamiento de todo el equipo, incluyendo el equipo convencional, para evitar demoras que incrementen el costo.
- 2.- Es importante que todo el personal de operación esté bien capacitado en aspectos tanto técnicos como de seguridad y con mayor énfasis en los de operación y mantenimiento del equipo para perforar con aire.

- 3.- Debe disponerse de suficiente capacidad en los compresores no solo para gastos necesarios, sino para afrontar situaciones imprevistas. Disponer de solo el equipo justo por razones de economía puede hacer fracasar el proyecto.
- 4.- Debe prepararse equipo para realizar los cambios de sistema (lodo, aire, espuma, niebla, lodo aireado) en cualquier momento, en caso de presentarse situaciones adecuadas para cada sistema.
- 5.- Si se perfora con aire seco, debe asegurarse que la última TR esté correctamente cementada para evitar presencia de agua o de zonas de pérdida, obteniéndose mayor beneficio del sistema.
- 6.- Cuando existe presencia de agua, es importante la rapidez al efectuar las maniobras de operación, ya que permitiría la acumulación del agua y se requeriría mayor gasto de energía para generar una alta presión, necesaria para eliminar el agua acumulada.
- 7.- Cuando se perfora con aire o niebla debe usarse un amortiguador sobre la barrena, que permitiría el poder cargarle mayor peso.
- 8.- En zonas con tendencia al desvío, un alto ritmo de perforación con aire o niebla puede advertirnos tarde de cambios bruscos en la verticalidad, por lo que esta se debe registrar con mayor frecuencia.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Angel R.R.: "Volume Requirements For Air or Gas Drilling". Transactions of AIIME, Vol.210, 1957.
- 2.- Bobo R.A.: "New Aereated-Mud Equipment Can Control Lost Circulation". Oil and Gas Journal, April 29, 1968.
- 3.- Bobo R.A., G.S. Drasby and Hoch R.S.: "Phillips Tests Air-Mud Drilling". Oil and Gas Journal, Jan-Feb 1955.
- 4.- Cooper L.W., Hook R.A. and Payne B.R.: "Air Drilling Techniques". SPE 6435, 1977.
- 5.- Cortés Ponce de León A.: "Gráficas de Campo y Presiones de Aire Requeridas para Perforación de Pozos Petroleros". IMP-Perforación, 1973.
- 6.- Gauto A.R.: "Inyección Aireada en el Neuquén". Petróleo Internacional, Julio 1979.
- 7.- Howell J.N.: "Air-Liquid Drilling Fluids". The Drilling Contractor, 1966.
- 8.- Ikoku C.U., Azar J.J. and Williams C.R.: "Determining Volume Requirements For Air and Gas Drilling". World Oil, December 1980.
- 9.- Lincicome J.D.: "Using Foam to Drill Deep, Underpressured Zones". World Oil, February 1984.
- 10.- McCray A.W. and Cole F.W.: "Oil Well Drilling Technology". University of Oklahoma Press. Norman, Okla. 1958.
- 11.- Moore L.P. and Cole W.F.: "Drilling Operations Manual". The Petroleum Publishing Co. Tulsa, Oklahoma.
- 12.- Murray J.W.: "Parasite Tubing Method of Aereation". API Drilling Productions Practices, 1968.
- 13.- Pinks A.H.: "Aereated Fluid Drilling Can Be Effective". World Oil, August 1965.
- 14.- Ramírez J., Solano A.J. y León J.G.: "Estudio de Técnicas de Perforación con Aire". IMP-Perforación, Agosto 1980.
- 15.- Shoepfel R.J. and Sapre A.R.: "Volume Requirements In Air Drilling". SPE 1700, 1967.
- 16.- Solís G. y Romero R.: "Estudio Bibliográfico Sobre Lodos Aireados". IMP-Perforación, febrero 1983.
- 17.- Urrutia Luis: "Perforación con Fluidos Aireados en los Yacimientos Agotados del Campo La Paz". 3er. Congreso Latinoamericano de Perforación, Brasil 1982.
- 18.- Valdez R.: "Perforan con Aire en Vez de Lodo". Petróleo Internacional, Noviembre 1977.
- 19.- "Air and Gas Drilling". Drilling Operations Manual.
- 20.- "Air Drilling Handbook". Magcohar Division, August 1976.
- 21.- "Experiencias Sobre Perforación con Aire". 3er. COLAPER, Brasil 1982.