



29
2 ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PERFORACION DE POZOS PETROLEROS CON FLUIDOS DE MUY BAJA
DENSIDAD A BASE DE AIRE.

MODELOS MATEMATICOS PARA LA DETERMINACION DE LOS GAS-
TOS Y PRESIONES PARA LA PERFORACION CON AIRE.

T R A B A J O E S C R I T O

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

CARLOS ALEJANDRO REYES LOPEZ



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 esta 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.

INDICE

	PAG.
INTRODUCCION.	
I PERFORACION CON AIRE.	1
I.1 Utilización del aire como fluido de perforación.	2
I.2 Ventajas de la perforación con aire.	3
I.3 Equipo empleado en la perforación con aire.	5
I.4 Tipo de barrenas utilizadas.	9
I.5 Método para desplazar lodo por aire.	11
I.6 Problemas que se presentan durante la perforación y algunas soluciones que se recomiendan.	12
I.7 Medidas de seguridad que se utilizan en la perforación con aire.	19
II PERFORACION CON ESPUMA Y NIEBLA.	21
II.1.1 Características generales.	22
II.1.2 Ventajas y desventajas con el uso de este sistema.	23
II.1.3 Propiedades de las espumas.	25
II.1.4 Equipo empleado para la perforación con espuma estable.	29
II.1.5 Preparación de la espuma estable.	31
II.1.6 Operación del sistema de espuma.	32
II.1.7 Tipo de regimenes de flujo.	34
Comentarios.	34
II.2 PERFORACION CON NIEBLA.	35
II.2.1 Características generales.	35
II.2.2 Control de la corrosión.	36
II.2.3 Gastos y presiones requeridos.	36
II.2.4 Cuidados en la perforación con niebla.	37
II.2.5 Equipo.	38
II.2.6 Niebla y lodo de perforación.	38

	PAG.
III PERFORACION CON LODO AEREADO.	40
III.1 Consideraciones generales.	41
III.2 Método y equipo utilizados en la aplicación del lodo aereado en perforación rotatoria.	44
III.3 Técnica de perforación con lodo aereado.	49
IV MODELOS MATEMATICAS PARA CALCULAR LOS GASTOS REQUERIDOS PARA PERFORACION CON AIRE.	52
IV.1 Desarrollo de los modelos matemáticos para la perforación con aire o gas como fluido de circulación.	53
IV.2 Modelo de Preston L. Moore.	53
IV.3 Modelo de R. R. Angel	54
IV.4 Modelo de Mc. Cray and Cole.	54
IV.5 Modelo de A. R. Sapre-R. J. Schoeppel.	55
Comentarios	56
Apéndice 1 Desarrollo del modelo de Preston L. Moore.	58
Apéndice 2 Desarrollo del modelo de R. R. Angel	66
Apéndice 3 Desarrollo del modelo de Mc. Gray and Cole.	71
Apéndice 4 Desarrollo del modelo de A. R. Sapre-R. J. Schoeppel.	79
Referencias	86

INTRODUCCION.

La utilización del aire o gas como fluido de circulación en la perforación rotatoria de yacimientos petrolíferos es actualmente una práctica común en la perforación de zonas fracturadas ó con pérdidas de circulación severas; además de ofrecer ciertas ventajas en la perforación de formaciones duras o de baja aportación de líquidos.

La práctica ha demostrado que el emplear aire como fluido de perforación en ciertas áreas representa mayores ventajas con respecto a los fluidos convencionales. Con el uso de este sistema se obtiene una disminución de los costos, lograda al tener mayores ritmos de penetración al perforar con muy baja presión hidrostática, menor tiempo de viajes al durar mas las barrenas y ningún costo por preparación del fluido ya que el aire como materia prima se encuentra a disposición en el medio ambiente.

Uno de los principales problemas de la perforación con aire son los flujos de agua de las formaciones. Al realizar algunos estudios sobre este problema se ha logrado establecer una técnica con la cual se proporciona un medio para excluir el agua del pozo esta técnica es la perforación con espuma. El estudio continuo de esta ha resultado en la elaboración de espumas mas estables cada día.

Otro factor importante en la perforación con aire fué el cálculo de los gastos de aire o gas necesarios para lograr la velocidad suficiente para acarrear los cortes resultados de la perforación. Los primeros métodos que se desarrollaron se basan en la fórmula de Weymouth (para flujo en tuberías horizontales) acondicionandola para flujo verticales. Como resultados de dichas investigaciones se estableció la velocidad mínima que debe tener el aire medido a condicione estandar para poder levantar los cortes, dicho valor es de aproximadamente 1000 m/min. Sin embargo en la práctica estos gastos han resultado insuficientes debido a que no se han tomado en cuenta todas las variables que intervienen.

En la actualidad se cuenta con modelos matemáticos que proporcionan resultados más exactos que el anterior, dichos modelos pertenecen a R. R. Angel, Preston L. Moore, Mc. Cray-Cole y A. - R. Sapre-R. J. Schoepfel, respectivamente.

Aun cuando las técnicas de perforación con aire han mejorado, la implantación de este sistema ha sido escasa ya que son pocas las áreas que cumplen las condiciones requeridas.

PERFORACION CON AIRE.

I.1.- UTILIZACION DE AIRE COMO FLUIDO DE PERFORACION.

Al perforar bajo ciertas condiciones es posible usar -- aire o gas comprimido como el fluido de circulación para eliminar los cortes de la barrena en vez del lodo utilizado normal-- mente. Por ejemplo, se utiliza para perforar rocas en las que - el control de presión no representa un problema serio.

Con un gasto adecuado (el necesario para originar la velocidad requerida), y suficiente presión de aire o gas los cortes de la barrena son fácilmente arrastrados por el espacio anular y llevados hasta la superficie. En algunas regiones el gas natural se toma de pozos cercanos, se circula en el pozo en perforación y se quema cuando sale por la línea de descarga. En las - áreas donde no se tiene gas natural a presión disponible, se - utilizan compresores de aire para forzarlo hacia abajo por dentro de la tubería de perforación. Tanto el gasto como la pre -- sión de entrega requeridos dependen esencialmente de la profundidad del pozo y del diámetro de la tubería de perforación.

Para llevar a cabo un óptimo programa de perforación, es necesario contar con información del área en la cual se utilizará el aire como fluido de circulación. Dicha información debe - ser de tipo geológico y de datos obtenidos de pozos vecinos. - Cuando el pozo sea exploratorio la información geológica deberá ser lo más confiable posible.

Los principales puntos con los que debe contar la información son:

- .- Características litológicas de las formaciones por -- atravesar.
- .- Zonas con derrumbes
- .- Zonas con pérdidas de circulación.
- .- Zonas de baja presión.
- .- Zonas con flujo de agua.
- .- Correlaciones con pozos vecinos.

Los derrumbes, las zonas con flujo de agua y las formaciones blandas y deleznales constituyen los mayores problemas en este tipo de perforación reduciendo así mismo la eficiencia de este método; razón por la cual en el programa de perforación - se debe prever las medidas adecuadas para enfrentar estos problemas.

I.2.- VENTAJAS DE LA PERFORACION CON AIRE.

El empleo de este sistema en una forma adecuada, proporciona las siguientes ventajas:

a).- Incremento en el ritmo de penetración, ocasionado - por la baja densidad del fluido de control. Debido a la reducida carga hidrostática ejercida por la columna de aire, la roca se ve relevada de los esfuerzos vertical y axiales dando origen a un efecto de presión inversa, el cual incrementa la perforabilidad de la formación. A causa de este efecto la formación tiende a explotar al contacto de la barrena.

Muchas teorías se han propuesto para explicar el fenómeno del aumento en la velocidad de penetración; la causa principal es, seguramente la reducción de la presión hidrostática.

Pruebas de campo (fig.1) muestran el efecto del aumento de la contrapresión sobre la velocidad de perforación. Un aumento de la contrapresión de 0 a 20 Kg/cm² determinó una disminución en la velocidad de penetración de 10 a 25 m/hr.

Eso muestra claramente el efecto del aumento de presión en el espacio anular y confirma el efecto de la presión hidrostática sobre la velocidad de perforación. Aparentemente, la presión hidrostática actúa como mecanismo retenedor de la velocidad de remoción de los cortes situados debajo de la barrena. De eso se deduce que las ventajas económicas de la perforación con aire y gas se reducen substancialmente cuando se tiene que usar espuma y agua.

En la (fig.2), el efecto de la presión de una columna de fluido sobre el ritmo de penetración está ilustrado. La diferencial de presión en este ejemplo es la diferencia entre la presión ejercida por la columna de fluido y la presión de poro

del fluido, todo ello cuando se perfora con lodo.

Finalmente, las (fig.3 y 4) muestran una comparación de los tiempos de perforación utilizando gas y lodo, aire y agua.

b).- El uso de aire o gas proporciona un mayor enfriamiento a la barrena, por lo que aumenta la vida efectiva de esta; y debido a ello son necesarios menos viajes para el cambio de barrenas lo que reduce considerablemente los costos de perforación.

e).- Identificación de zonas con contenido de hidrocarburos
A pesar del tamaño reducido de los cortes de perforación, estos pueden constituir una buena ayuda en la indentificación de zonas con contenido de hidrocarburos, ya que el aire permite que estos aparezcan en la superficie sin contaminación alguna, detectándose de esta manera la presencia de hidrocarburos.

d).- Control de pérdidas de circulación. En ocasiones al perforar ciertas zonas, tales como formaciones no consolidadas o altamente permeables, formaciones fracturadas naturales o inducidas o formaciones cavernosas, pueden presentarse pérdidas severas del fluido de circulación, lo cual puede traducirse en excesivos costos y graves problemas de control del pozo. Por lo que se recomienda el uso de aire o gas como fluido de control al perforar dichas zonas, por su reducido costo y porque permite el control del pozo.

c).- Otra ventaja de este sistema es que se pueden perforar zonas de baja presión debido a su reducida carga hidrostática con lo que se evitan daños a la formación. Se puede utilizar también para evitar mayores daños a la formación cuando esta ya ha sufrido un daño menor por el uso de fluido convencionales.

Cuando en la perforación de un pozo se hace necesaria la extracción de núcleos, es ventajoso efectuar las operaciones utilizando aire como fluido de control ya que se obtienen núcleos sin contaminación.

f).- Ahorro en materiales químicos utilizados en la preparación de lodos convencionales y ningún costo por concepto de mantenimiento.

I.3.- EQUIPO EMPLEADO EN LA PERFORACION CON AIRE.

Para utilizar aire o gas como fluido de perforación es necesario instalar equipo adicional al que se encuentra normalmente en las instalaciones del pozo, El equipo adicional consiste en lo siguiente:

- a).- Compresores.
- b).- Cabezal rotatorio.
- c).- Tubería de descarga.
 - Boquillas primaria y secundaria .
 - Humedecedor.
 - Muestreador.
 - Instalación para detectar gas.
 - Quemador.
- d).- Bomba dosificadora de espumante.
- e).- Válvulas de retención.
- f).- Medidor de flujo.
- g).- Alarma de presión.

- a).- Compresores.

Para las operaciones de perforación con aire o gas, - los compresores son necesarios para suministrar los gastos requeridos por el sistema de circulación. El requerimiento de capacidad de compresores esta determinado por las necesidades de gasto y presión para el rendimiento adecuado del sistema.

El número de compresores dependerá del gasto y presión del aire que se circulará en el pozo, además de la capacidad de cada compresor: Por lo general se utilizan tres unidades conectadas en paralelo, reciprocantes, de doble acción, desplazamiento positivo, de dos a cuatro etapas de compresión, con gastos de trabajo del orden de 350m/min y una presión de descarga máxima de alrededor de 20 kg/cm² en cada compresor.

Los compresores deberán colocarse a una distancia máxima - de unos 50 metros del pozo y en posición favorable con respecto a los vientos dominantes, como se muestra en la figura 5

Se llama compresores primarios a los utilizados en las operaciones normales de perforación y secundario a un recompresor - utilizado solo en los casos en que se requiera mayor capacidad - de compresión; este se coloca en serie con los anteriores.

b).- Cabezal rotatorio.

La instalación de este elemento es esencial para el buen funcionamiento del sistema de perforación con aire. Se instala entre la mesa rotatoria y los preventores, con el fin de - evitar que el polvo resultado de la perforación pase al piso del equipo perjudicando al personal o deteriore el equipo.

El cabezal rotatorio consiste de dos elementos principales

Un elemento rotatorio el cual permite girar conjuntamente al sello de hule junto con la tubería.

Un elemento de hule el cual mantiene un sello constante al rededor de la sarta de perforación a excepción de aquellas partes de gran diámetro, como barrenas, tubos lastrabarrena y escariadores. Para evitar daños indebidos en este elemento es necesario alinear adecuadamente al cabezal rotatorio. Se puede prolongar la duración del sello de hule aplicando líquidos lubricantes en la parte externa de la tubería durante la perforación o cuando se efectúan conexiones, esto permitirá que la tubería se deslice con mayor facilidad a través del sello. Algunos de los lubricantes mas comunmente usados son agua y líquidos jabonosos.

Cuando se vaya a efectuar cambio de barrena, o de algún otro elemento de la sarta, se debe quitar el elemento de hule con el primer o segundo tramo de tubería.

c).- Tubería de descarga.

El objetivo de esta tubería es el de conducir a cierta distancia del pozo el polvo y fluido que salen del pozo y de

esta manera evitar perjuicios al personal y al equipo. La longitud de la tubería de descarga varía entre 50 y 60 metros; la orientación es de acuerdo a los vientos dominantes, además de que debe quedar en la parte contraria a los compresores.

Esta tubería deberá estar anclada y soldada en el cabezal del pozo y sujeta al terreno con soportes en equis para evitar movimientos bruscos cuando conduzca flujos grandes.

Deberá ser lo que mas recta posible para evitar la erosión por los cortes en las partes curvas de la tubería; cuando existen estas partes se ocasiona una erosión de las paredes de la tubería debido al choque constante de los cortes de perforación que salen del pozo a velocidades extremadamente altas. Este desgaste puede ocasionar la ruptura de la tubería.

Además sobre la tubería de descarga se deben instalar los siguientes accesorios:

Boquillas primaria y secundaria.

Las boquillas son utilizadas para suprimir el aire o gas del piso del equipo cuando se efectúan conexiones, al crear un vacío dentro de la tubería de perforación con ayuda de los compresores, se usan dos tipos: una instalada cerca del final de la tubería de descarga a la que se llama primaria y es la que se utiliza regularmente. La boquilla secundaria localizada cerca del equipo se utiliza solamente en caso de que falle la primera. Los dos tipos se muestran en la figura 6.

La boquilla primaria se instala a una distancia equivalente de 4 veces el diámetro interior de la tubería, medida a partir del extremo de la descarga, como se muestra en la figura anterior.

La válvula que opera estas boquillas se encuentran en el múltiple de piso y se conectan a la descarga mediante un par de tuberías.

Humedecedor.

Este es usado para abatir el polvo resultado de la perforación mediante la inyección de agua a través de un atomizador, co

mo se observa en la figura 7. Con esto se logra que las partículas de polvo se humedezcan y formen grumos para su precipitación al salir de la descarga sea mas rápida.

Muestreador.

Un muestreador de doble válvula y con inclinación de 60 - grados como el mostrado en la figura 8 se instala sobre la tubería de descarga antes del humedecedor a una distancia equivalente a 7 a 10 veces el diámetro interior de la tubería. Su función es la de permitir el muestreo continuo de los cortes de perforación.

Instalación para detectar gas.

Una unidad para detectar entrada de gas, similar a la utilizada en la perforación con lodo debe ser instalada sobre la tubería de descarga con el fin de detectar hasta pequeñas cantidades de gas que salgan del pozo. Pueden prevenirse de esta manera problemas provocados por la entrada de gas al perforar zonas con contenido de dicho fluido.

Quemador.

Al final de la línea de descarga deberá existir un quemador para de esta manera asegurar que todo el gas que pudiera presentarse en la corriente de aire sea eliminado.

d).- Bomba dosificadora de espumante.

En ocasiones cuando en la perforación con aire se atraviesan formaciones que aportan agua se hace necesario la inyección de agentes espumantes, lo que se logra con la ayuda de estas bombas dosificadoras; su colocación se muestra en la figura

e).- Válvulas de retención.

Se utilizan dos:

Se instala una inmediatamente arriba de la barrena con el fin de prevenir cualquier entrada de fluido de la forma--

ción hacia el interior de la tubería de perforación y para evitar el depresionamiento del aire en el espacio anular.

La otra válvula de retención se instala cerca de la superficie, en el segundo o tercer tramo de tubería, y tiene como objeto el de evitar que el aire o gas regrese cuando se efectue una conexión.

f).- Medidor de flujo.

Consistirá básicamente de un orificio que se colocará a una distancia de la descarga del último codo en la línea de los compresores igual a 20 veces el diámetro interior de la línea de inyección. De esta manera se puede medir el gasto de aire o gas que se esta inyectando al pozo.

g).- Alarma de presión.

Una alarma de presión, colocada en el piso del equipo - en un lugar visible, con señal audible o visible, es indispensable durante la perforación con aire o gas. Esta alarma deberá de indicar incrementos en la presión de inyección de hasta 5 kg/cm² que es cuando se considera la existencia de una situación anormal.

I.4.- TIPO DE BARRENAS UTILIZADAS.

Como es bien conocido la barrena es un factor importante en cualquier tipo de operaciones de perforación. La barrena, y el modo en que esta lleva a cabo su labor son factores de gran importancia en la perforación. Generalmente en la perforación con aire las barrenas que se emplean son las mismas que las utilizadas en la perforación con lodo.. Existe un tipo especial de barrenas diseñadas para perforación con aire, se mencionará más adelante.

En la perforación con aire se usan barrenas con inserciones de carburo de tungsteno, de rodillos con baleros sellados, lo que no permite que el polvo o cortes de perforación entren a los baleros y ocasionen daños en ellos o impidan el giro de los conos.

Otro tipo, como lo es la barrena de chimacera, también se-

llada, se ha utilizado con resultados satisfactorios en la perforación con aire.

Existe un tipo de barrenas diseñadas específicamente para la perforación con aire y se conocen como Barrenas de Chorro de aire. Se pueden utilizar con aire, niebla o espuma como medio de circulación. Estas barrenas están provistas de conductos para circular parte del aire, gas o niebla a través de los baleros no sellados, para enfriarlos y mantenerlos limpios. Filtros de tela metálica colocados sobre la abertura de la entrada de aire evita que los cortes pasen hacia los baleros. Una barrena de este tipo se muestra en la figura 9.

Uno de los problemas más serios que se afronta-relacionado con el desgaste de la barrena- en la perforación con aire es la reducción del diámetro de la superficie de calibre. Esto significa que los dientes de calibre, aquellos situados en la orilla de los conos, se han desgastado o astillado a tal grado que comienzan a perforar un diámetro menor al esperado. Esta situación es perjudicial por que la próxima barrena deberá ampliar o ensanchar el agujero hasta el tamaño apropiado, lo cual pudiera ocasionar daños prematuros en ella, así como pérdida de tiempo y esfuerzo. La reducción de la superficie de calibre se presenta sobre todo cuando se perforan formaciones duras y abrasivas, cuando se emplea una barrena que no es la apropiada para la formación a perforar, cuando se somete a la barrena a muchas horas de trabajo o cuando se emplea una velocidad rotatoria que excede la capacidad de la barrena en uso.

Para evitar la reducción del diámetro de la superficie de calibre deben seleccionarse barrenas con el diseño apropiado de las hileras exteriores de inserciones o dientes que conservan de manera efectiva el diámetro de la superficie de calibre. Un diseño apropiado puede ser que se coloque un mayor número de inserciones o dientes en la hilera exterior de los conos, también se coloca un recubrimiento de carburo de tungsteno en la superficie -

exterior del cono, y en la parte final de los faldones de la barrana. Cuando se utiliza barrenas de dientes el recubrimiento se aplica en la parte exterior de ellos.

Una de las causas más comunes por las que se retrasan las operaciones de perforación es el cambio de barrenas cuando estas han fallado antes de lo previsto por haberse hecho una mala selección de ellas. Por lo que se recomienda para este tipo de operaciones, hacer uso de las barrenas adecuadas.

I.5.- METODO PARA DESPLAZAR LODO POR AIRE.

El método utilizado para desplazar el lodo de perforación del pozo y continuar las operaciones con aire, es el siguiente:

1.- Colocar la barrena en el fondo del pozo.

2.- Se comienza a bombear lodo lentamente a un gasto de $1/4$ - a $1/2$ m³/min, lo que se hace con el propósito de reducir al mínimo las caídas de presión por fricción y lograr la presión de circulación en el múltiple de piso.

3.- Haciendo uso de uno de los compresores aerear la columna de lodo que se encuentra dentro del pozo. El aire deberá inyectarse lentamente para permitir que se distribuye uniforme y totalmente en el lodo de perforación.

4.- Como la columna de lodo ha sido aligerada se producirá - una caída de presión en el sistema, misma que sera registrada en - el manómetro del múltiple de piso. Por lo que se hará necesario -- utilizar más capacidad de los compresores o inyectar un volumen de aire mayor para mantener la presión.

Además del procedimiento de aereación de la columna de lodo - existe otro método, en el cual el desplazamiento de lodo por aire se lleva a cabo mediante el bombeo alternado de agua y aire hacia el pozo, aumentando cada vez el gasto de aire bombeado y disminuyendo a la vez el de agua hasta que pueda utilizarse continuamente el aire como fluido de control dentro del pozo.

5.- La bomba dosificadora de espumante deberá estar lista para usarse en caso necesario.

6.- Ya que se tiene el pozo lleno de aire, antes de empezar a perforar es necesario limpiar y secar lo mejor posible el pozo, para ello es necesario efectuar las siguientes operaciones:

7.- Perforar de 5 a 30 metros, observando en la descarga que no haya interrupción en la salida de cortes, con lo que se tiene la seguridad de que el pozo se está limpiando correctamente.

8.- Detener la perforación y circular en el pozo una mezcla de aire-niebla* para limpiarlo totalmente de los cortes de perforación, 15 a 20 minutos de circulación pueden ser suficientes o hasta que la mezcla aire-niebla salga limpia.

9.- Para secar el pozo basta con circular aire por espacio de 1/2 a 1 hora. Los gastos requeridos para secar el agujero son los mismos que se utilizarán durante la perforación.

10.- El pozo se encuentra ya en las condiciones necesarias para utilizar aire como fluido de perforación.

Dependiendo de la profundidad, este procedimiento requiere de 2 a 6 horas para su realización.

I.6.- PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN DURANTE LA PERFORACION CON AIRE Y ALGUNAS SOLUCIONES QUE SE RECOMIENDAN.

La perforación con aire como cualquier otro tipo de perforación requiere de una continua y adecuada supervisión para prevenir cualquier tipo de problema. El prevenir o detectar a tiempo los problemas que puedan presentarse durante la perforación - representa un significativo ahorro en lo que a equipo y a tiempo de perforación se refiere.

* La preparación de la niebla y el equipo empleado se menciona con detalle en el capítulo correspondiente.

A continuación se menciona algunos de los problemas que con mayor frecuencia se presentan durante las operaciones de perforación con aire, se mencionan además algunas medidas de prevención y/o técnicas de perforación adecuadas para enfrentar dichos problemas.

- a).- Insuficiente volumen de aire para la limpieza del pozo.
- b).- Ensanchamiento del pozo.
- c).- Desviación del pozo.
- d).- Entrada de agua.
- e).- Daños a la tubería de perforación.
- f).- Pegadura de tubería
- g).- Fuego y explosiones dentro del pozo.

a).- INSUFICIENTE VOLUMEN DE AIRE PARA LA LIMPIEZA DEL POZO

Cuando la perforación con aire ha fracasado, muy a menudo la razón ha sido que se ha circulado un volumen insuficiente de aire para limpiar el pozo a un determinado ritmo de perforación. A medida que el pozo se profundiza, se requiere aumentar el gasto de aire para mantener la velocidad necesaria para acarrear los cortes a la superficie. La capacidad de levantamiento del aire es proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad del aire en el espacio anular, de esta manera, como la densidad se incrementa con la profundidad y con el peso de los sólidos perforados; la presión y el gasto en la superficie deberá ser incrementados para mantener la velocidad necesaria del aire en el espacio anular.

Cuando se quiera aumentar la velocidad del aire y no se cuenta con mayor número de compresoras lo que se recomienda es disminuir el área del espacio anular; que se logra reduciendo el diámetro del pozo o utilizando tubería de perforación de mayor diámetro.

Un método para conocer si se está utilizando el gasto de aire adecuado para limpiar el pozo es el siguiente:

Detener la perforación, seguir circulando aire y tomar el tiempo que tardan en llegar a la superficie los últimos cortes.

El tiempo requerido para limpiar el pozo no debe exceder en más de un minuto por cada 300 metros de profundidad, cuando se requiere de mucho mas tiempo para limpiar el pozo es indicación de que no se esta utilizando el gasto de aire necesario o existe un agujero agrandado.

b).- ENSACHAMIENTO DEL POZO.

Este constituye un serio problema en la perforación con aire. El deslave y ensanchamiento de la sección transversal del pozo puede deberse principalmente al efecto erosivo de la corriente de aire sobre las paredes del pozo, ocasionado por las altas velocidades del aire en circulación. Otra causa puede ser la baja presión hidrostática de la columna, que provoca gran presión diferencial dentro del pozo.

Para evitar el problema de erosión de las paredes del pozo se debe utilizar la velocidad minima del aire en el espacio anular. De aquí se desprende la necesidad de calcular con precisión los gastos de aire necesarios para mantener al mínimo la velocidad en el espacio anular.

La existencia de estas partes ensanchadas puede ocasionar que los cortes resultados de la perforación se acumulen en dicho espacio, observandose en la superficie una interrupción en la salida de cortes. Dichas interrupciones pueden atribuirse erróneamente a entrada de agua al pozo inyectando agentes espumantes en la corriente de aire, cuando estos no son necesarios aumentando innecesariamente de esta manera los requerimientos de aire, disminuyendo la velocidad de penetración y aumentando los costos de perforación.

c).- DESVIACION DEL POZO.

Como en cualquier tipo de operaciones de perforación la desviación del pozo, es un aspecto que requiere de una estrecha vigilancia.

En la perforación con aire, los métodos para controlar la verticalidad del pozo son los mismos que cuando se utiliza lodo como fluido de perforación.

d).- ENTRADA DE AGUA.

La entrada de agua al pozo constituye el problema mas severo en las operaciones de perforación con aire. La magnitud - del flujo de agua dependerá del grado de saturación y de la permeabilidad de las formaciones; pudiéndose presentar formaciones parcialmente saturadas hasta formaciones totalmente saturadas, - poco permeables o muy permeables.

Cuando se perforan formaciones con saturación de agua baja las operaciones pueden continuarse ya que con solo incrementar - el gasto de aire se logra una mayor velocidad del mismo en el espacio anular y con ello una limpieza adecuada del pozo. Aunque - debe vigilarse continuamente la presión en el manómetro del múltiple de piso, con el fin de detectar cualquier aglutinamiento - de los cortes alrededor de la sarta de perforación.

En cambio, la presencia de flujo francos de agua requiere para su manejo adecuado de la inyección de agentes espumantes a la corriente de aire. Dichos agentes viajan suspendidos en la - corriente de aire por dentro de la tubería de perforación hasta el fondo del pozo, llegan a la barrena y debido a la gran turbulencia que existe en esta zona y a la presencia de agua se forma una espuma (aire, agua y agentes espumantes) con la que se - logra remover el agua del pozo.

La cantidad necesaria de agente espumante dependerá de las condiciones del pozo; estabilidad de las formación perforada, - diámetro y profundidad, y esencialmente de la magnitud del flujo de agua. La concentración que proporcione un flujo estable - en la descarga y una presión igualmente estable en el tubo vertical, es la deseada.

Otra solución para los problemas de entrada de agua en la perforación con aire, es el empleo de varios materiales capaces de obturar la entrada de agua, tales como; cemento, plástico o materiales químicos. Para la aplicación efectiva de estos materiales, la mayor dificultad estriba en la difícil evaluación de la zona aportadora de agua, además de la habilidad para aplicarlos en la zona deseada y las altas presiones requeridas para desplazar los materiales hacia la formación. Debe mencionarse que para la aplicación de obturantes debe cambiarse el sistema de fluido de perforación de aire a lodo.

Los problemas derivados de la entrada de agua pueden resumirse de la siguiente manera:

(1) La entrada de agua incrementa los requerimientos de velocidad del aire en el espacio anular, y por tanto, del gasto de aire por lo que el equipo deberá tener la capacidad correspondiente.

(2) La existencia de lutitas en formaciones superiores junto con la presencia de agua en la corriente de aire pueden ocasionar derrumbes dando lugar a problemas de pegadura de tubería.

(3) El agua puede ocasionar el aglutinamiento de los cortes alrededor de la tubería de perforación, lo que puede derivar en problemas mas serios como pegadura o fuego y explosiones en el pozo.

(4) La corrosión en la tubería de perforación es un problema inherente a los flujos de agua en la perforación con aire, por lo que se acostumbra utilizar inhibidores de corrosión. En ocasiones se inyecta agua saturada con cal para proteger la tubería contra la oxidación.

e).- DAÑOS A LA TUBERIA DE PERFORACION.

Una inspección periódica de la tubería de perforación es conveniente, debido a que una falla en ella en un pozo, perforado con aire, puede dar origen a problemas serios durante la perforación del pozo.

El mayor daño que se ocasiona a la tubería en este tipo de perforación es el debido al efecto erosivo de los cortes que via

jan en la corriente de aire y se presenta principalmente a la altura de las juntas de la tubería de perforación, el desgaste ocurre por el choque continuo de los cortes con esta sección. Este efecto puede disminuirse haciendo que las juntas sean recubiertas exteriormente con una banda dura de metal y una capa de pequeños perdigones de aleación de acero o de carburo de tungsteno con lo que se aumenta y mejora la vida y rendimiento de la tubería de perforación.

Por otra parte cuando se ocasionan excesivos daños a los tubos lastrabarrena se pueden presentar problemas de desviación debido al cambio en las características de estabilización, por lo que deben inspeccionarse toda vez que se saque la sarta de perforación.

f).- PEGADURA DE TUBERIA.

En ocasiones durante la perforación se presentan atones de la tubería, existiendo el riesgo de que se pegue. En estas condiciones no debe jalarsé la tubería sin circulación de aire dentro del pozo.

Algunas causas de que la tubería se pegue son:

(1) El aglutinamiento de los cortes alrededor de la tubería de perforación, cuando se perforan formaciones húmedas.

(2) Derrumbes de formaciones deleznales.

(3) Desviaciones fuertes, como "patas de perro" u "ojos de llave".

Para evitar que la tubería se pegue después de que se ha atorado, se debe jalar y empujar suavemente con movimientos alternativos, además de circular una buena cantidad de aire a fin de liberarla; en ocasiones se inyecta un agente espumante diluido en poca agua a la corriente de aire, para ayudar a la limpieza del pozo. Debe tenerse cuidado en no jalar excesivamente la tubería, ya que se corre el riesgo de exceder su resistencia y romperla.

En la perforación con aire no existe un líquido que amortique la caída de la tubería, por lo que debe tenerse cuidado al - liberarla para evitar movimientos bruscos.

g).- FUEGO Y EXPLOSIONES DENTRO DEL POZO.

Al usar aire para perforar zonas con contenido de gas, las dos primeras de las tres condiciones necesarias para provocar un incendio (combustible, oxígeno e ignición) están presentes. De esta manera la principal preocupación cuando se atraviesa una formación de este tipo y se utiliza aire como fluido de perforación es la de prevenir la ignición. Las causas por las cuales ocurre - ignición cuando se perfora con aire son 3:

- (1) La acumulación y aglutinamiento de cortes húmedos alrededor de la tubería de perforación (sellan el espacio anular entre la pared del pozo y la tubería de perforación).
- (2) Chispas dentro del pozo.
- (3) Pequeños agujeros en la tubería de perforación.

La acumulación y aglutinamiento de cortes húmedos alrededor de la tubería constituyen la causa principal de ignición ocasionando fuego y explosiones dentro del pozo. Estos aglutinamientos ocasionados por la presencia de cortes húmedos sellan el espacio anular y restringen el paso del aire, dando lugar a dos situaciones que ocasionan la ignición:

- (1) La formación de una mezcla gas aire, que dentro de ciertos rasgos puede ser explosiva. El rango explosivo se considera - cuando el gas está en proporción de 5 a 15% con respecto al volumen de aire.
- (2) Debido al sellamiento del espacio anular, se presentará un incremento gradual de la presión comprimiendo la mezcla gas-aire hasta que esta alcance su temperatura de ignición, ocurriendo entonces la explosión.

Las otras dos causas de la ignición para las cuales hay poco o ningún control en la perforación con aire son las chispas - dentro del pozo y pequeñas perforaciones en la tubería.

Las chispas se originan cuando las partes metálicas de la sarta de perforación (barrenas, tubos lastrabarrena, juntas de perforación, etc.) chocan contra formaciones duras y abrasivas.

La otra causa de la ignición lo constituyen las pequeñas perforaciones que se forman en ocasiones en la tubería. Se ha demostrado que cuando el aire fluye a una presión de 15 a 30 kg/cm² a través de una pequeña perforación, la fricción ocasionada por esta reducción crea suficiente calor como para provocar la ignición de la mezcla gas aire.

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 el volumen de oxígeno presente; si la concentración de nitrógeno es suficientemente alta, elimina completamente los problemas de explotación bajo la superficie. La concentración recomendada varía en un 3 a 5% del volumen de aire.

Otro método efectivo para prevenir este tipo de problemas es la perforación con niebla o espuma.

Debido a los daños causados dentro del pozo después de que ocurre una explosión, pueden hacerse necesarias costosas operaciones de pesca y en casos extremos operaciones de desvío para profundizar el pozo. Estas operaciones, como se ha mencionado, son muy costosas aparte de que consumen mucho tiempo, por lo que la prevención de incendios y explosiones dentro del pozo es de gran importancia en la perforación con aire.

I.7.- MEDIDAS DE SEGURIDAD QUE SE UTILIZAN EN LA PERFORACION CON AIRE.

Cuando se utiliza aire o gas como fluido de perforación es indispensable la elaboración de un buen programa de seguridad para evitar todo tipo de problemas. El uso de gas natural es peligroso si no se toman las medidas adecuadas de ventila-

ción, debe evitarse la concentración de gas cerca de las máquinas o bajo el piso del equipo. Deben inspeccionarse periódicamente las conexiones para detectar fugas. Asimismo debe inspeccionarse regularmente el equipo contra brotes y observarse periódicamente la presión en el manómetro.

Durante las operaciones de perforación debe evitarse el aglutinamiento de cortes alrededor de la tubería de perforación, lo que con una mezcla adecuada de aire y gas puede ocasionar una explosión o incendio en el pozo.

Existen dos métodos positivos para prevenir los problemas de fuego y explosiones en el pozo cuando se perforan zonas gasógenas: el primer método es perforar con lodo, aunque es más costoso y menos efectivo para desarrollar zonas gasógenas. El segundo método es el de perforar zonas con gas natural, aunque también es costoso es más efectivo para evitar daños a la formación. Es conveniente perforar una zona gasógena hasta la cima de la zona potencial con cualquier fluido de perforación para posteriormente atravesarla utilizando gas como medio de circulación, sin embargo no siempre es posible disponer de gas natural. Otro método para evitar problemas de este tipo es el uso de espuma y niebla como fluidos de perforación.

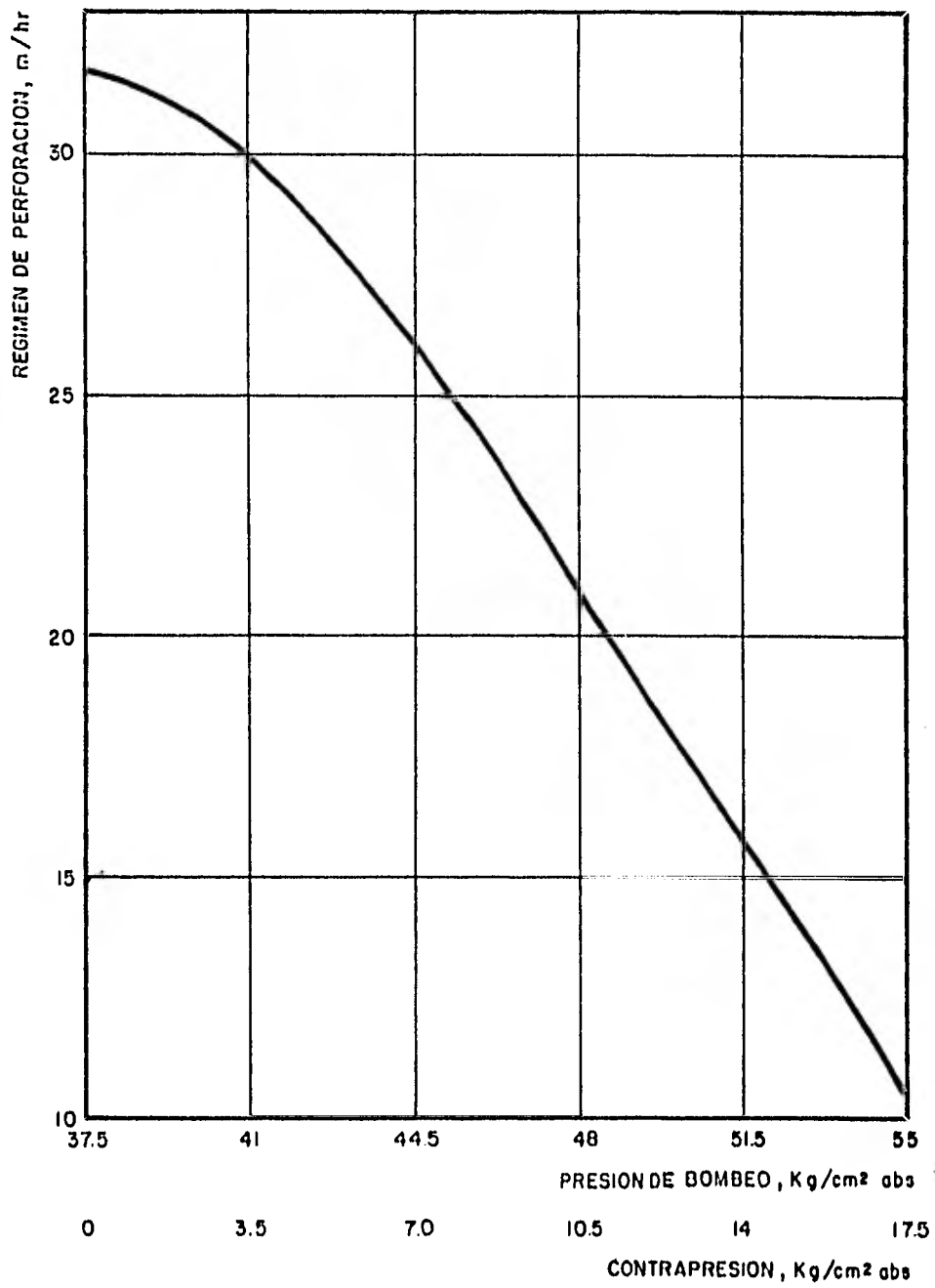


FIG.1 EFECTO DEL AUMENTO DE LA CONTRAPRESION SOBRE LA VELOCIDAD DE PERFORACION

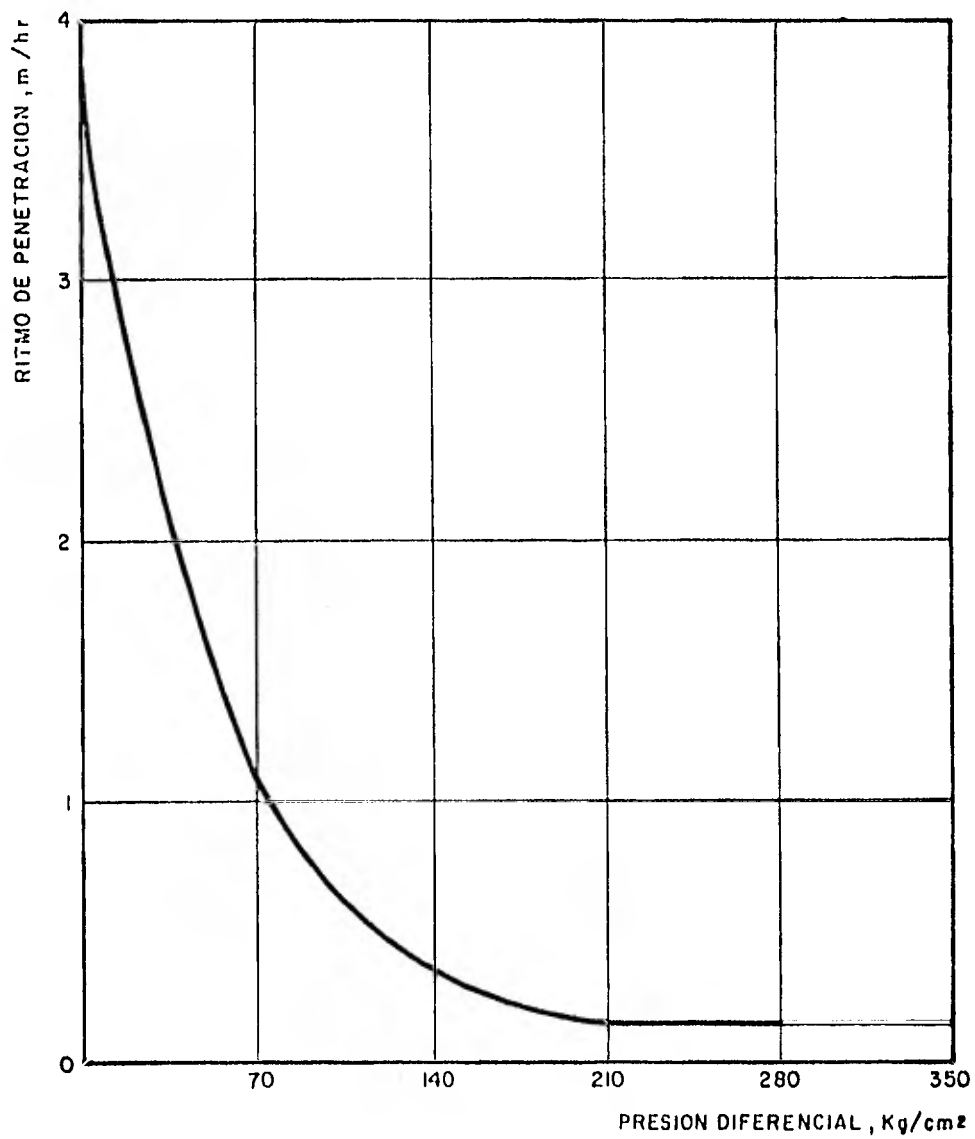


FIG. 2 EFECTO DE LA PRESION SOBRE EL RITMO DE PERFORACION

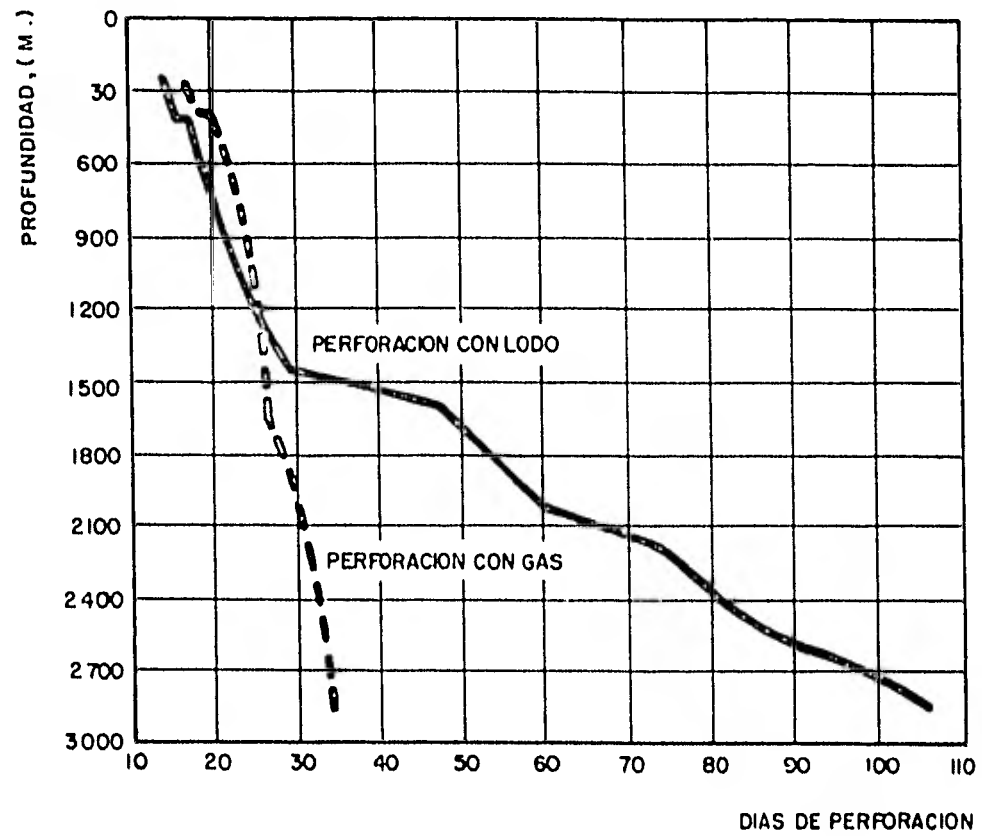


FIG.3 COMPARACION DE LOS TIEMPOS DE PERFORACION UTILIZANDO GAS Y LODO

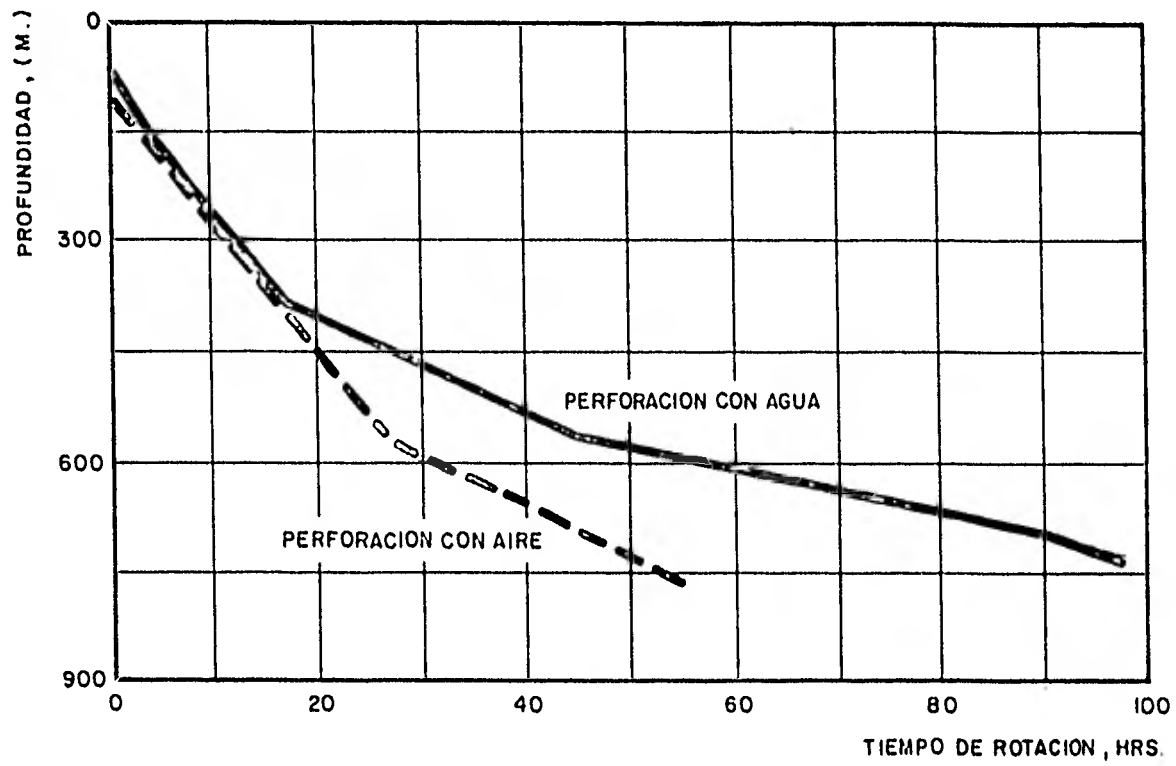


FIG. 4 COMPARACION DE LOS TIEMPOS DE PERFORACION UTILIZANDO AGUA Y AIRE

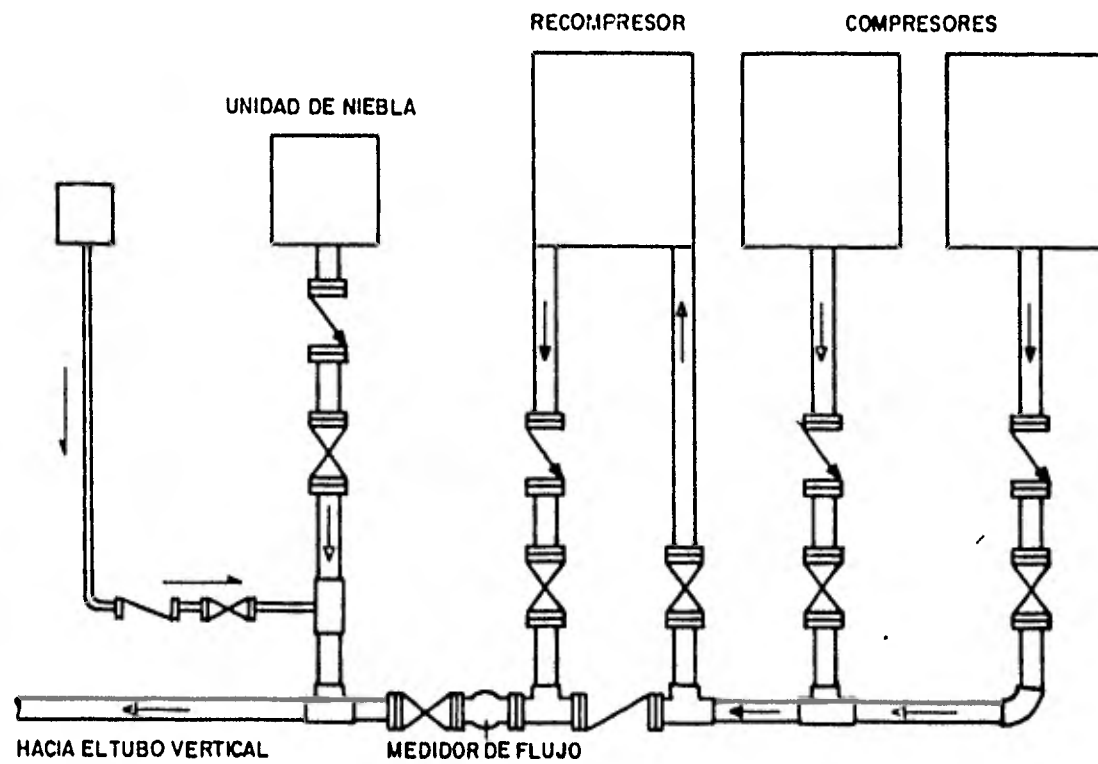
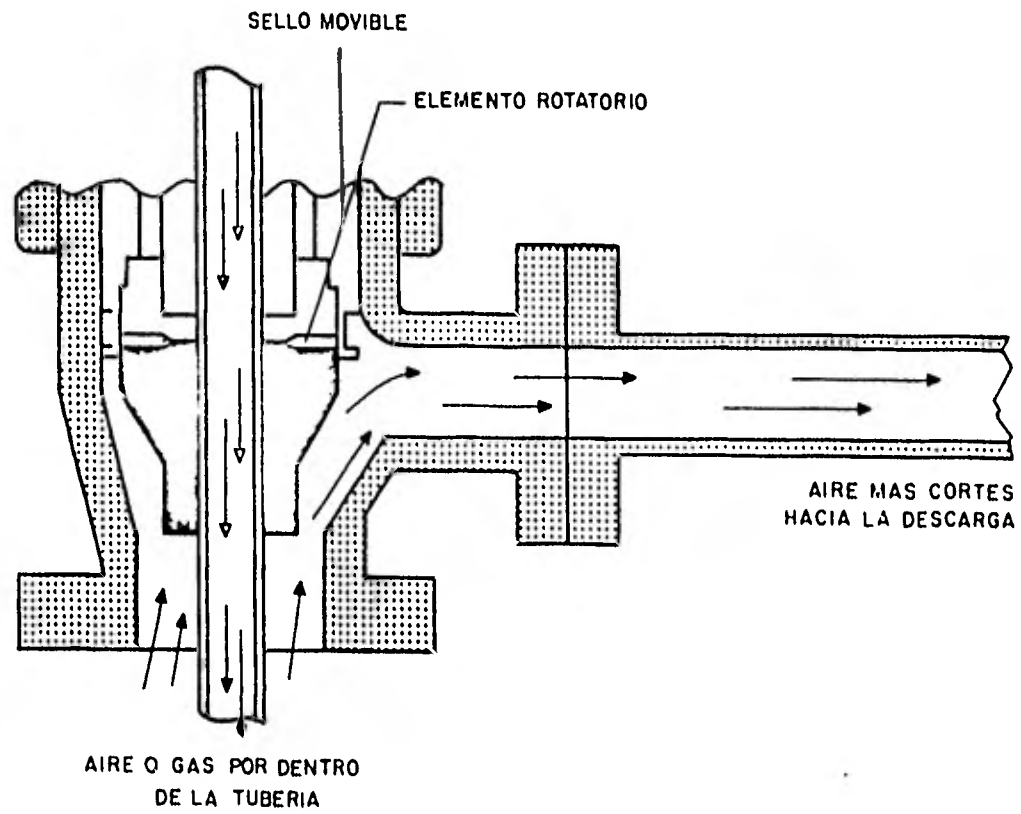
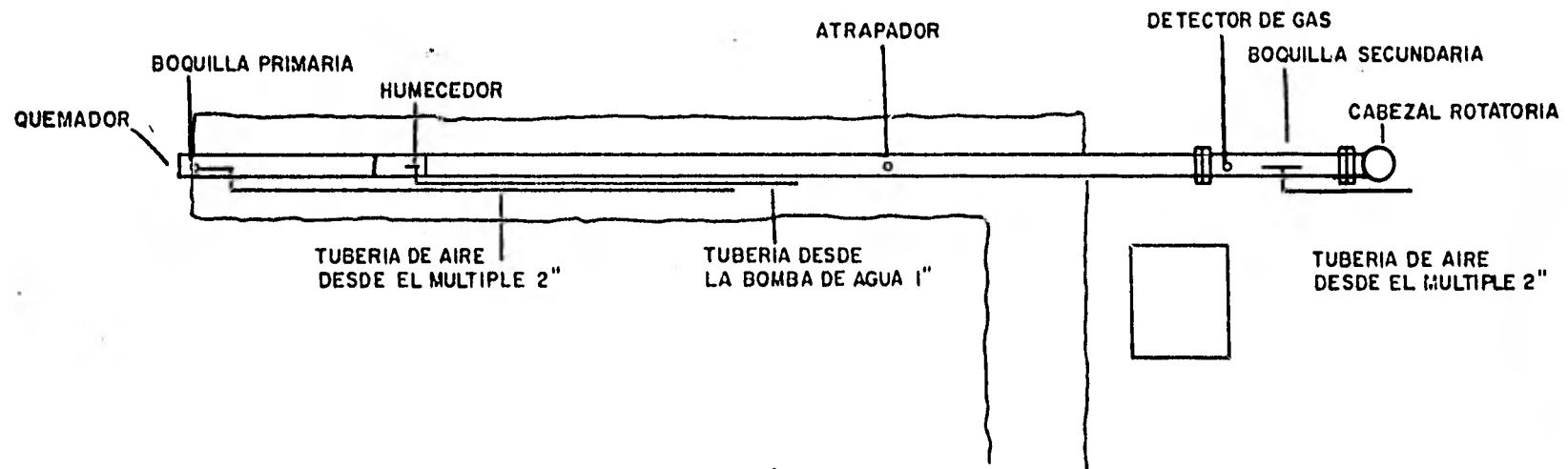


FIG. 5 DISPOSICION DE LOS COMPRESORES, RECOMPRESORES Y BOMBAS DOSIFICADORAS DE ESPUMANTE



CABEZAL ROTATORIO



TUBERIA DE DESCARGA Y ACCESORIOS.

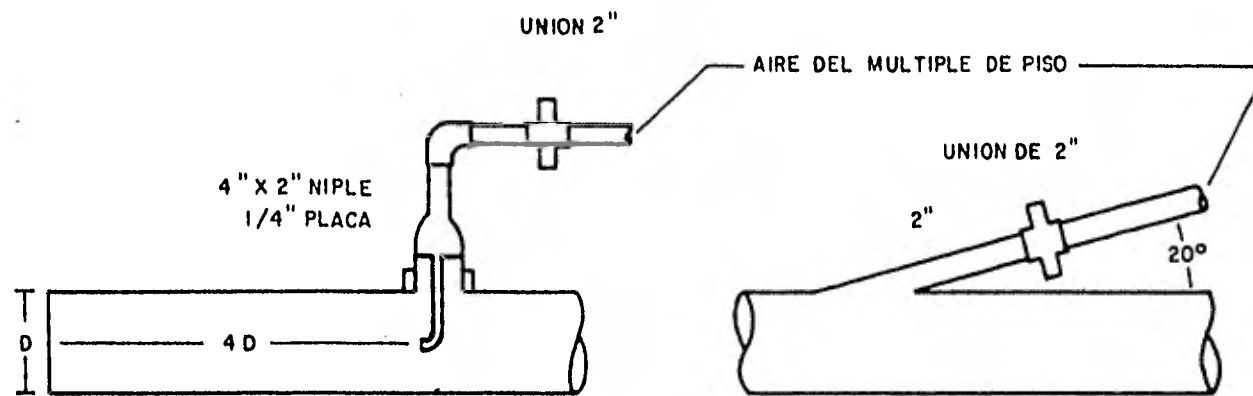


FIG. 6 BOQUILLAS SECUNDARIA Y PRIMARIA

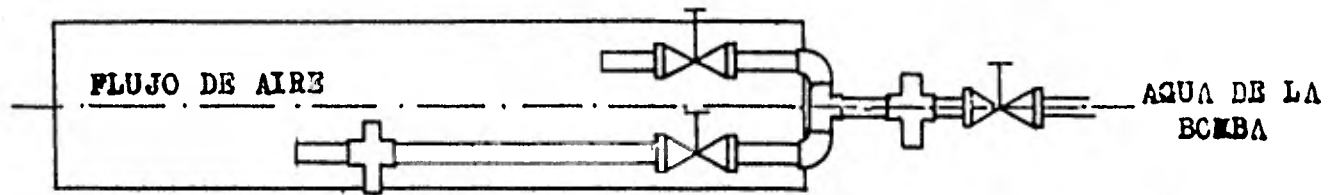


FIG. 7 HUMEDECEDOR

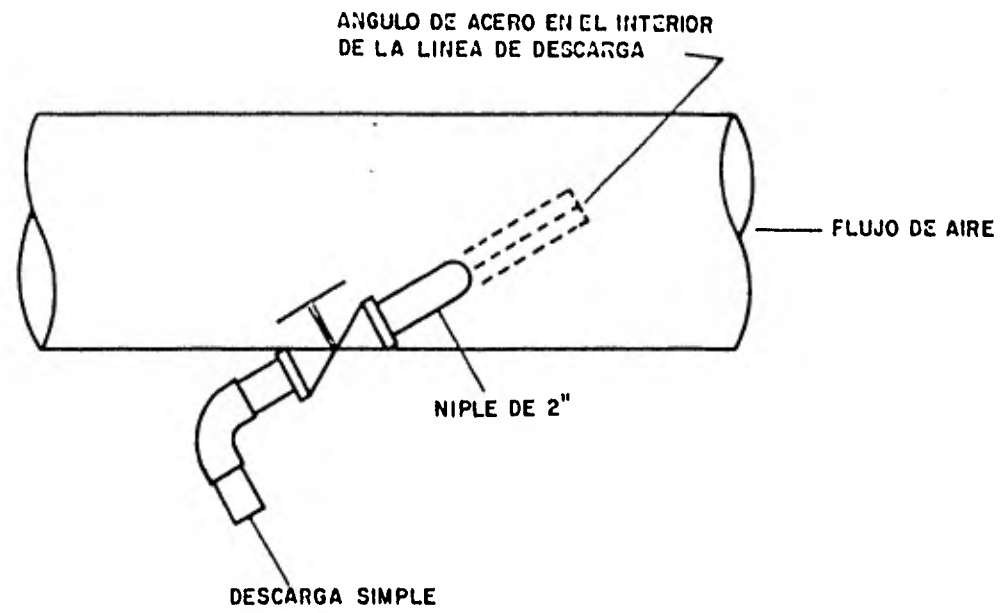


FIG. 8 MUESTREADOR

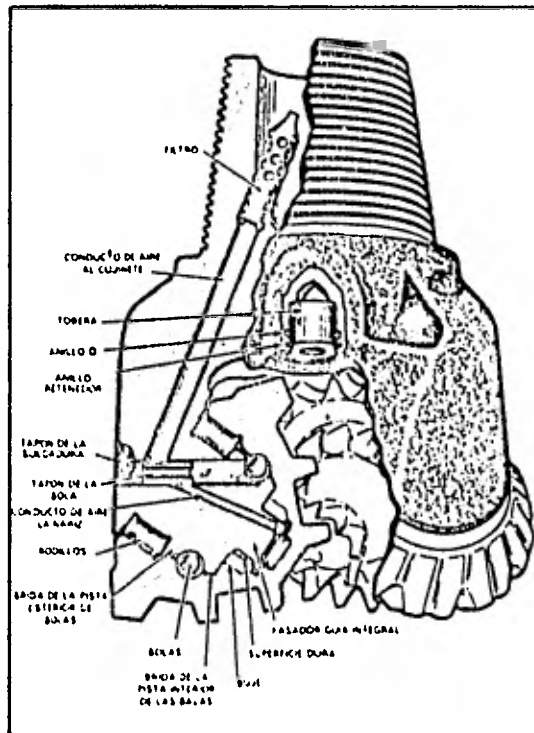


FIG. 9) BARRENA PARA PERFORACION CON AIRE

PERFORACION CON ESPUMA ESTABLE.

PERFORACION CON NIEBLA.

CAPITULO II.- PERFORACION CON ESPUMA.

II.1.- Características generales.

Una de las variantes del sistema de perforación con aire es el uso de la espuma estable como fluido de circulación. La espuma estable fué diseñada originalmente para la perforación de formaciones poco consolidadas, las cuales ocasionaban problemas de derrumbes en la perforación con aire y severas pérdidas de circulación cuando se perforaba con lodo. También se usó para la perforación de pozos de gran diámetro en donde la perforación con aire requería del uso de gastos muy elevados del fluido de control. Posteriormente y como resultado de la experiencia de su aplicación se ha visto que dio buenos resultados para enfrentar los problemas de entrada de agua y zonas con contenido de gas en la perforación con aire.

La espuma estable es un fluido de muy baja densidad (.25 a .75 gr/cm³), alta viscosidad (.6 a .9 cp) y gran capacidad de acarreo de cortes, por lo que resulta de gran atractivo para utilizarse como fluido de perforación. Este fluido se prepara en la superficie y consiste en una mezcla de: agua dulce., un agente tensoactivo, aditivos apropiados, como son; estabilizadores de espumas, materiales que forman enjarre residual, reductores de fricción, inhibidores de corrosión, entre otros y un gas comprimido. Para la fase gaseosa se han utilizado preferentemente aire, gas natural y nitrógeno. De ellos se prefiere el gas natural para la formación de la espuma, pero debido a la dificultad de no disponer de este gas en la localización, se utiliza generalmente aire para la generación del fluido. El nitrógeno debido a su mayor costo y disponibilidad se utiliza solo en contadas ocasiones.

Las presiones logradas en el fondo del pozo con este tipo de fluido pueden variar de 1 a 4 kg/cm² para profundidades de 300 a 1000 metros. Estas bajas presiones de circulación disminuyen o eliminan en el mejor de los casos los daños a la forma

ción y las pérdidas de circulación.

Por otra parte, los requerimientos de aire son muy bajos comparados con otros métodos de perforación con aire, esto se debe a que la espuma es capaz de levantar los cortes a bajas velocidades en el espacio anular (30 a 90 m/min) por lo que se requiere menor capacidad de compresión y por lo tanto de menores gastos de inyección de aire.

El sistema de circulación, cuando se utiliza esta clase de fluido es de tipo abierto, por lo que la espuma que sale del pozo no puede volver a circularse y se desecha en una presa de desperdicio.

La utilización de la espuma estable como fluido de perforación en el sistema rotatorio, ha tenido aplicación y éxito limitados. Primero por la insuficiente experiencia en la perforación con ayuda de dicho fluido, lo que trae como consecuencia que no se haya podido establecer una teoría pertinente para determinar con exactitud las características del flujo de la espuma.

II.2.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS CON EL USO DE ESTE SISTEMA.

II.2.1.- El uso adecuado de este sistema y el empleo de una espuma de buena calidad proporciona las siguientes ventajas:

a)- EJERCER UNA PRESION HIDROSTATICA REDUCIDA.

A causa de que su densidad es muy baja, la espuma estable ejerce en el fondo del pozo una presión hidrostática mucho menor que la causada por un lodo normal de perforación. Debido a ello ayuda a disminuir las pérdidas de circulación y los daños a la formación, que son un problema común en la perforación normal cuando se atraviesan zonas de alta porosidad y permeabilidad o con contenido de fluido a baja presión.

b) GRAN CAPACIDAD DE ACARREO.

Debido a su alta viscosidad la espuma estable es un fluido que proporciona una gran capacidad de levantamiento, lo que se traduce en una limpieza efectiva del pozo. Con este tipo de fluido se obtiene una capacidad de levantamiento 7 a 8 veces mayor que con los fluidos convencionales. Puede acarrear cortes hasta de 5 cm de diámetro.

c) MAYORES RITMOS DE PERFORACION.

A causa de su baja densidad, el ritmo de perforación aumenta sobre todo en formaciones duras. Las experiencias obtenidas de su aplicación indican que se han registrado ritmos de penetración hasta dos veces mayores que los obtenidos con el uso de fluido convencionales.

d) AYUDA A EVITAR DERRUMBES DE LAS PAREDES DEL POZO.

Cubre la pared del pozo con una película que evita los derrumbes y que se mantiene hasta que se mete y cementa la tubería de revestimiento.

e) PERMITE LA PERFORACION DE POZOS DE DIAMETRO GRANDE.

Permite trabajar en pozos de gran diámetro, donde la perforación con aire requiere de gastos de inyección muy grandes o donde la perforación con lodo requiere de gran capacidad de bombeo.

f) DISMINUYE LOS RIESGOS DE INCENDIO.

Durante la perforación de zonas con contenido de gas, la espuma estable atrapa este fluido en forma de pequeñas y aisladas burbujas evitando de esta manera la ignición de la mezcla gas-aire.

g) Su eficiencia no es afectada por acuíferos de baja aportación.

Por estas ventajas, el uso de la espuma estable como fluido de perforación es de gran atractivo económico ya que se obtiene mayores ritmos de penetración, bajas presiones y ritmos de circulación; y la mas importante es la eliminación de daños a la formación que se traduce en un aumento de la productividad del pozo.

II.2.- LIMITACIONES.

a) Debido a la baja presión hidrostática que ejerce la espuma, no se puede usar en áreas donde se desconozcan las presiones de formación, ya que existe el riesgo de descontrol del pozo en caso de perforar una zona de presión mayor que la ejercida por la columna de espuma.

b) La eficiencia de la espuma puede verse disminuida con flujo de agua salada o de hidrocarburos ya que se reduce la efectividad de la sustancia tensoactiva.

c) La inversión inicial del equipo adicional es alta.

d) No es posible realizar registros que requieran que el pozo se encuentre lleno de lodo.

II.3.- PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS.

La espuma es una mezcla homogénea de aire, agua dulce y una sustancia tensoactiva. El agua constituye la fase continua y el aire la fase dispersa que se presenta en forma de pequeñas burbujas suspendidas en el agua. Posee baja densidad y alta viscosidad originada por la tensión superficial de las burbujas; al mismo tiempo debido a la presencia del aire, su compresibilidad es alta y por consiguiente su volumen específico y su fracción de volumen líquido varían notablemente con la presión y la temperatura.

II.3.1.- CALIDAD DE LA ESPUMA.

La calidad de la espuma es la propiedad que define las características reológicas de la mezcla, y se define como; la relación del volumen de gas al volumen total de la espuma. Para unas condiciones dadas de presión y temperatura la calidad de la espuma puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$CAL = \frac{VG}{VL + VG}$$

Donde:

Cal (P,T) calidad de la espuma a la presión P y a la temperatura T.

VL (P,T) volumen de líquido a la presión P y a la temperatura T.

VG (P,T) volumen de gas a la presión P y a la temperatura T.

Debido a que al gas es un fluido compresible es necesario especificar las condiciones de presión y temperatura a que opera dentro del pozo.

La forma como se mantiene la calidad de la espuma es regular los gastos de inyección de gas y solución espumante -- utilizados. Una manera de saber si se esta usando la relación adecuada aire solución espumante es la de observar la espuma - que aparece por la descarga, una espuma de buena consistencia permanece estable hasta que abandona la tubería de descarga, - su degradación ocurre posteriormente.

La calidad lograda en espumas estables ha permitido -- que permanezca en estas condiciones aun cuando se ha encontrado contaminantes tales como: sólidos de la formación, agua salada, aceite crudo, cemento, óxido y sulfuro de hierro, vapor de agua, solventes y ácidos.

La viscosidad resultada en una espuma es función directa de su calidad, por lo que dependiendo de esta, la espuma se comporta como un Fluido Plástico Bingham o un Fluido Newtoniano. Las gráficas de las figuras 1 y 2 presentan resultados ex-

perimentales del efecto de la calidad de la espuma sobre la viscosidad y el punto de cedencia. La relación mostrada en la figura 1 se compone de cuatro fases; la primera fase muestra una relación lineal entre la calidad y la viscosidad en un rango de 0.00 a 0.50 de calidad; las burbujas del gas disperso en la solución son de forma esférica y no se interfieren entre sí. En esta fase la espuma se comporta como un fluido Newtoniano. En la segunda fase la relación presenta una forma ligeramente curva; esto se atribuye a que la deformación de las burbujas y la interferencia entre ellas comienza, dando lugar a la creación de un punto de cedencia en la espuma. Esto ocurre en un rango de calidad de 0.56 a 0.74. La tercera fase con calidad de 0.74 a 0.96 se representa cuando las burbujas del gas se deforman totalmente y la viscosidad plástica y el punto de cedencia se incrementan rápidamente. En la cuarta y última fase con calidad mayores de 0.98 deja de ser espuma y entra en la región de niebla.

Nótese en las figuras 1 y 2 que la viscosidad plástica y el punto de cedencia se aproxima al infinito a una calidad del 100%.

II.3.2. DENSIDAD DE LA ESPUMA.

La espuma estable, debido a la presencia del aire, es un fluido de baja densidad, con la que se obtienen presiones hidrostáticas bajas en el fondo del pozo, disminuyendo o evitando de esta manera los daños a la formación y las pérdidas de circulación. La densidad de este tipo de fluidos de perforación varía entre .2 y .8 gr/cm³ aproximadamente.

Puesto que la masa de gas es pequeña, la densidad es simplemente, el peso del líquido dividido por el volumen total de la espuma.

II.3.3. CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO.

A la facilidad que tiene un fluido de perforación para acarrear los cortes producidos, sin permitir su depositación en el fondo del pozo, se llama capacidad de levantamiento. En la --

espuma estable esta propiedad depende enteramente de su calidad, es decir, de la fracción líquida del volumen total, de la velocidad del fluido en el espacio anular y de su viscosidad.

En la figura 4 se muestra la relación existente entre la capacidad de levantamiento y la fracción de volumen líquido. La habilidad de la espuma para levantar las partículas se incrementa conforme se aumenta la velocidad y se disminuye la fracción del volumen líquido. Las espumas con gran cantidad de líquido no tienen mucha capacidad de levantamiento.

La gráfica muestra la región donde la espuma es estable en condiciones óptimas para un levantamiento efectivo de los cortes y comprende un rango de 0.02 a 0.25 de la fracción del volumen líquido, en este mismo rango la capacidad de levantamiento de la espuma es 10 veces la fuerza de levantamiento del agua a la misma velocidad. Por debajo de 0.02 de fracción del volumen líquido la espuma se vuelve inestable, fluyendo en forma intermitente tapones de espuma y aire, disminuyendo por esta causa la capacidad de levantamiento en forma drástica.

Para fracciones de volumen líquido mayores de 0.25, conforme se incrementa esta, la capacidad de levantamiento se aproxima a la del agua que se presenta cuando la FVL es igual a 1.0 .

La capacidad de levantamiento de la espuma depende también de la velocidad del fluido en el espacio anular, aunque en menor grado. Esta tendencia se observa en la figura 4, en donde la curva 2 corresponde a una velocidad dos veces mas grande que la de la curva 1. Los resultados se muestran en la gráfica.

La capacidad de levantamiento de un fluido de perforación depende en gran parte de su viscosidad. En los fluidos convencionales el incremento en la viscosidad aumenta la capacidad de levantamiento, aunque disminuye el ritmo de penetración y aumenta los requerimientos de presión para mantener el flujo. Para la solución de estos problemas, el uso de la espuma estable es ideal,

debido a su alta viscosidad aparente pero muy baja densidad, pudiendo transportar los cortes a muy bajas velocidades anulares.

II.3.4. TEXTURA.

Otra propiedad de igual importancia que la calidad, es lo que se llama textura de la espuma y que se refiere a la distribución del tamaño de burbujas y al tamaño mismo de la burbuja creada. Puede ser descrito en términos de una distribución de radio o bien como un radio medio.

La textura depende en mayor grado del tipo y concentración del agente tensoactivo utilizado, aunque también influye el tipo de empacamiento que se tenga en el generador de espuma. Un aumento o disminución en la concentración del agente tensoactivo conduce a lograr burbujas de mayor o menor tamaño.

El tener una distribución uniforme en el tamaño de burbuja de la espuma es evidencia de que se esta elaborando un fluido de las características deseadas y que se esta empleando una relación adecuada de los gastos de aire y solución espumante.

II.4.- EQUIPO EMPLEADO PARA LA PERFORACION CON ESPUMA ESTABLE.

Para poder efectuar la perforación haciendo uso de la espuma estable como fluido de circulación es necesario agregar al equipo convencional los siguientes elementos.

COMPRESORES DE AIRE.

Necesarios para suministrar el aire o gas a la presión requerida para la preparación de la espuma. Con capacidad de trabajo de 30 a 90 m³/min. y presiones de 10 a 75 kg/cm². Los valores promedio de los gastos de inyección son de 60 m³/min y de las presiones de operación de 20 kg/cm². Se utiliza solo un compresor y es del mismo tipo de los empleados en la perforación con aire.

TANQUES

Es necesario contar en el equipo con tres tanques metálicos con capacidad cada uno de 1.5 m³. En ellos se prepara la solución espumante, que consiste básicamente en agua dulce, aditivos y un determinado porcentaje de agente tensoactivo, el cual varía normalmente entre 0.25 a 1.0%.

BOMBA PARA LA DOSIFICACION DEL SURFACTANTE Y ADITIVOS.

Esta bomba se requiere para inyectar la solución espumante hacia el generador de espuma. Una bomba de volumen bajo, desplazamiento de tipo positivo, con capacidad de 80 l/min a una presión suficiente para permitir la inyección al generador.

MEDIDORES DE FLUJO.

Para el control de la calidad de la espuma es necesario la medición de los gastos de aire y solución espumante que se utilizan. Esto se logra instalando un medidor de flujo de aire y un medidor para líquidos. El primero es un medidor de placa de orificio capaz de registrar gastos entre 30 y 100 m³/min y presiones de 10 a 70 kg/cm², el medidor de líquidos deberá ser capaz de registrar gastos de 35 a 75 l/min con aproximaciones de 2 - 1/min.

GENERADOR DE ESPUMA.

La espuma es creada en el generador de espuma, en el cual se mezcla intimamente una solución espumante con aire ó gas. Este dispositivo consiste de un recipiente con un tubo Venturi - para introducir la solución espumante y con una o varias entradas para el aire o gas. Además para propiciar el mezclado esta provisto de un empaque de arena clasificada malla 20/30, fibra de vidrio, acero u otro material de alta porosidad; y a la salida, de una malla de acero con aberturas mas pequeñas que el empaque anterior, malla 20/80. La turbulencia que se crea dentro del recipiente da lugar a la formación de la espuma. Ver fig. 5

VALVULAS DE CONTRAPRESION.

Se utilizan dos del mismo tipo de las descritas en el capítulo anterior, una inmediatamente arriba de la barrena y la otra a unos cuantos metros bajo la superficie. Se instalan para poder efectuar conexiones y no permitir que la espuma que se encuentra dentro del pozo se deprime, manteniendo de esta manera la presión de circulación.

CABEZAL ROTATORIO.

Del mismo tipo utilizado en Perforación con aire y con las mismas funciones.

TUBERIA DE DESCARGA.

Simple es decir sin accesorios.

FOSA PARA DESPERDICIOS.

El ciclo de bombeo de la espuma es abierto, por lo tanto, la espuma que retorna no puede usarse nuevamente y debe desecharse en una fosa para su posterior degradación y desecho.

II.5. PREPARACION DE LA ESPUMA ESTABLE.

La espuma es una mezcla compuesta de un líquido y un gas en dispersión, y su preparación en el campo es la siguiente:

Se dispone de dos de los tanques de agua dulce limpia con capacidad de 1.5m³ cada uno, en los cuales se vierte un determinado porcentaje de surfactante, quedando así formada la solución espumante. La que se inyecta al generador de espuma.

Al mismo tiempo se hace llegar aire del compresor al generador de espuma, en donde debido a la turbulencia del flujo y a las características del generador se forma la espuma.

Los gastos de inyección de la solución espumante, los gastos de aire y la concentración del agente tensoactivo dependen sobre todo: del diámetro y profundidad del pozo, ritmo de perforación, tamaño del espacio anular, tipo de formación y magnitud

de flujos de agua si este problema se presenta.

Anteriormente fué definido el término calidad de la espuma como una de las propiedades fundamentales, y que, la calidad es directamente proporcional a la viscosidad plástica y al punto cedente siendo estos los responsables del alto poder de acarreo y levantamiento de partículas sólidas. Para obtener en la espuma la calidad deseada se deben considerar la fracción del volumen de gas y la fracción del volumen de líquido, ya que estos dos parámetros controlan los gastos de aire y líquido que deben llegar al generador de espuma para obtener una buena calidad de ella.

La espuma es bombeada por dentro de la tubería de perforación y el retorno es recibido por el espacio anular y el llegar a la superficie es enviado a la fosa de desecho.

II.6 OPERACION DEL SISTEMA DE ESPUMA.

Al utilizar Espuma Estable como fluido de circulación la técnica utilizada consiste esencialmente en mantener una columna continua y de consistencia adecuada para levantar los cortes y los fluidos producidos, mientras se circula a baja velocidad en el espacio anular para evitar la erosión de las paredes del pozo.

La consistencia de la espuma se controla para satisfacer las condiciones del pozo. El control se logra graduando los gastos de gas y líquido y sus ajustes pueden ser determinados por el análisis de varios factores: presiones de inyección, par de torsión en la sarta de perforación, condición de la espuma en la descarga.

6.1.- PRESIONES DE INYECCION.

Las presiones de inyección se registran en la superficie, de esta manera se puede saber cuando existe una anomalía en las condiciones de la espuma en el fondo del pozo. Observando los cambios de presión se pueden hacer ajustes en los gastos de inyección hasta obtener la calidad de espuma de--

seada. Algunas situaciones típicas y soluciones que se han llevado a cabo en el campo son:

a) CAIDA DE PRESTION RAPIDA. Este comportamiento de la presión indica la presencia de una espuma intermitente, el gas no forma burbujas y se presenta como una fase continua impidiendo la formación de la espuma. Una solución para evitar este problema es incrementar el gasto de inyección de líquido y o disminuir el gasto de inyección de aire.

b) INCREMENTO GRADUAL DE LA PRESION. La causa es un aumento en la cantidad de cortes o fluidos de la formación que están levantándose hacia la superficie. Para evitar esto se incrementa lentamente el gasto de inyección de aire.

c) INCREMENTO SUBITO DE PRESION. Puede ser ocasionado por una barrena taponada o por la reducción del área correspondiente al espacio anular causada por la depositación de los cortes. Una solución para evitar este problema es detener la perforación e intentar volver a circular subiendo y bajando la tubería inyectando colchones de espuma estable.

6.2. PAR DE TORSION DE LA SARTA DE PERFORACION.

Un aumento en su magnitud indica condiciones de desgaste de la barrena y o la formación de puentes alrededor de la tubería. Estos cambios en el torque se detectan fácilmente en el indicador de torque en la mesa rotatoria. Cuando se encuentra una lutita o arcilla y el torque es excesivo el gasto de aire y líquido podrían ser incrementados a fin de limpiar el agujero. Cuando se forman puentes y ocurre taponamiento en la barrena el ritmo de penetración puede reducirse hasta que la espuma pueda limpiar y sacar los cortes.

6.3 CONDICIONES DE LA ESPUMA.

En condiciones normales en la tubería de descarga se nota espuma semejante a una crema de afeitar, a causa de las bajas velocidades anulares; el estado de la espuma en la descarga es un indicio retardado de lo que sucede en el fondo del po

zo. Los contaminantes de la espuma (aceite y agua salada) y las formaciones (arena lutita y arcillas) se indentifican observando el estado de la espuma en la tubería de descarga. Con espuma estable se han acarreado cortes que han variado desde tamaños de arena muy fina hasta guijarros de 5 centímetros de diametro.

Si los retornos de la espuma son continuos y el tiempo entre periodos de descarga no es mayor de 15 minutos, el sistema con espuma esta operando satisfactoriamente.

Si el intervalo entre periodos de descarga se incrementa - el gasto de inyección de la espuma debe ser incrementado y/o el ritmo de penetración disminuido.

II.7 TIPO DE REGIMENES DE FLUJO.

Los tipos de regimenes de flujo cuando se usa aire niebla - espuma y o líquido como fluido de circulación son:

Tipo A. flujo de aire o gas. En este sistema nada es adicionado a la corriente de aire.

Tipo B. flujo de niebla. se adiciona una minima cantidad de solución liquida a la corriente de aire.

Tipo C. flujo de espuma estable con tapones de gas.

Tipo D. flujo de espuma estable.

Tipo E. flujo de líquido con tapones de gas y burbujas espaciadas.

Tipo F. flujo de líquido.

Ver. figura 6

COMENTARIOS.

Despues de haber analizado el comportamiento de la espuma - estable como fluido de perforacion se recomienda el uso de este fluido para la perforacion de zonas de baja presión ya que debido a su reducida carga hidrostática limita la invasión de fluidos a la formación evitando de esta manera daños parciales o totales que afectan la productividad de los pozos. Asimismo las bajas velocidades anulares permiten perforar formaciones no consolidadas sin erosionar y derrumbar las paredes del pozo.

Debido a su alta viscosidad y capacidad de acarreo es ideal para la limpieza del pozo. Además de que la espuma atrapa la fa-

se gaseosa con lo que se eliminan los riesgos de incendio en la perforación con aire.

Por otra parte hay que tener ciertos cuidados al utilizar este sistema debe usarse solo en pozos de desarrollo para evitar problemas de descontrol así como contra con información de correlaciones de pozos vencidos, Disponer de un equipo adecuado para control de brotes y control con fluidos convencionales para utilizarse en caso de emergencia.

II.2. NIEBLA

CARACTERISTICAS GENERALES.

Otro fluido de circulación utilizado en la perforación con aire es la llamada niebla, que esta formada básicamente de aire, agua dulce y un agente tensoactivo. La fase continua la constituye el aire o cualquier otro gas que se este utilizando en la perforación y una solución de agua-agente tensoactivo que se encuentra como fase dispersa en forma de pequeñísimas gotas.

Este tipo de fluido se utiliza cuando en la perforación con aire o gas se presentan formaciones con grandes cantidades de agua o cualquier otro fluido que reduzcan o imposibiliten la limpieza adecuada del pozo. La mezcla se logra en la superficie, inyectando por medio de una bomba un gasto determinado de la solución preparada dentro de la corriente de aire. La niebla inyectada dentro de la tubería de perforación, pasa a través de las boquillas de la barrena donde la turbulencia del flujo da lugar a la formación de gran cantidad de burbujas de aire, dirigiéndose posteriormente hacia el espacio anular donde las burbujas resultadas reducen la densidad del agua producida permitiendo levantarla junto con los cortes hacia la superficie. Por sus características ofrece las mismas ventajas que la espuma pero no es tan eficiente como ella.

Las condiciones que gobiernan la cantidad de agua y de agente tensoactivo para la preparación de la solución son: el tipo de formación a perforar, profundidad y diámetro del pozo, can

tividad y tipo de agua que penetra al pozo.

II.2.2. Control de la corrosión.

La cantidad y tipo de agua producida por el pozo es un factor de importancia. El volumen de agua que puede manejarse satisfactoriamente con el uso de este sistema varía con la profundidad aunque generalmente será menor de 15 m³/hora. El tipo de fluido producido por la zona de aportación es un factor muy importante debido primero al problema de corrosión por oxidación y segundo a la estabilidad del agente tensoactivo. La corrosión de la sarta de perforación aumenta conforme se incrementa la cantidad de agua presente en el espacio anular. Para resolver este tipo de problemas se inyecta cal y dicromato sódico dentro del sistema como inhibidor de corrosión y estabilizador respectivamente. La cal en solución proporciona protección contra la oxidación y el dicromato sódico es un inhibidor de corrosión y efectivo estabilizador cuando se anticipa la presencia de agua salada.

II.2.3 Gastos y presiones requeridos.

Este sistema comparado con la perforación con aire requiere de la circulación de gastos mas elevados, de un 30% a un 40% más de aire, y se debe principalmente a tres razones básicas:

- (1) La columna de aire en el espacio anular es mas pesada debido a la presencia del agua que tiene que ser levantada.
- (2) La limpieza del pozo debe ser eficiente.
- (3) Debido a la humedad algunos cortes se aglutinan y se requieren mayores gastos de aire para superar la velocidad de asentamiento de partículas de mayor tamaño.

Las presiones con que normalmente se trabaja cuando se perfora solamente con la ayuda de aire o gas son de alrededor de 15kg/cm², pero en perforación con niebla se requiere de mayores presiones de 30kg/cm² ó mas, de acuerdo esencialmente a la cantidad de agua que fluye de las formaciones hacia el -

pozo.

II.2.4 Cuidados en la perforación con niebla.

Debido a que este sistema se aplica cuando hay presencia de agua dentro del pozo, es necesario conocer los problemas que con mayor frecuencia se presentan por descuido en la operación del mismo.

1.- Quizás el 75% de todos los problemas de la perforación con niebla son el resultado de la inyección de insuficiente gasto de aire.

2,- Cuando la tubería se pega en un agujero húmedo la razón más frecuente es que el pozo no ha sido limpiado correctamente antes de efectuar una conexión. Cuando se presenta este problema un procedimiento recomendable es circular suficiente aire -- dentro del pozo hasta que la niebla aparezca sin cortes en la descarga del pozo.

3.- Formaciones deleznable y con presencia de cavernas ocasionadas por el derrumbe de dichas formaciones, causan problemas que limitan la operación satisfactoria de este sistema. Conforme se amplía el diámetro del pozo la velocidad del fluido en el espacio anular disminuye, con lo que se ve afectada en forma negativa la capacidad de levantamiento de la niebla, además, de que se hace necesaria la inyección de mayores gastos de aire para superar la velocidad de asentamiento de las partículas. La ausencia de cortes en la descarga y un aspecto lodoso de la niebla indican seguramente que el pozo se está agrandando.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto hay que tener en cuenta las siguientes observaciones:

1.- Tratar de secar el pozo en forma adecuada.

2.- Un incremento en la concentración de agente tensoactivo proporciona mayor consistencia a la niebla lo que se traduce en un incremento en su capacidad de acarreo.

3.- Incrementando el ritmo de inyección de la solución se incrementa la capacidad de acarreo de la mezcla, debe ajustarse también el ritmo de inyección de aire con el fin de optimizar la eficiencia del sistema.

4.- Inyectar un inhibidor de corrosión.

5.- Limpiar en forma adecuada el pozo antes de efectuar una conexión.

II.2.5 Equipo.

El equipo para perforación con niebla es esencialmente el mismo que para perforación con aire o gas. La principal diferencia radica en la mayor capacidad de compresión requerida con el uso de niebla. En ocasiones extremas la presión requerida puede ser hasta de 50 kg/cm².

En perforación con niebla es necesaria una bomba para inyectar la solución agua-agente tensoactivo a la corriente de aire. Dicha bomba tiene capacidad para inyectar a un ritmo de 4 l/min a una presión de 15 kg/cm².

II.2.6 Niebla y lodo de perforación.

Como se mencionó en párrafos anteriores las formaciones deleznable ocasionan serios contratiempos cuando se perforan con niebla, creando problemas de poca o ninguna estabilidad de dichas formaciones lo que a su vez da lugar a ensanchamiento del diámetro del pozo por derrumbe de las paredes del mismo, con lo que se requiere de mayores gastos de inyección de aire, mayor concentración de la solución, además de que se reduce el ritmo de avance de la perforación, la capacidad de levantamiento de la niebla y se corren mayores riesgos de pegadura de la tubería.

Para afrontar este tipo de situaciones se ha usado una técnica que proporciona resultados satisfactorios y que se conoce como perforación con niebla-lodo. Su preparación se logra

de la misma manera que la niebla normal, excepto que se utiliza un lodo de baja viscosidad en vez de agua dulce para introducir el agente tensoactivo. El lodo disminuye los problemas en dichas formaciones por revestimiento de la pared del pozo con un enjarre muy delgado, además de que proporciona alta calidad de la niebla para un rápido removimiento de cortes y fluidos de la formación.

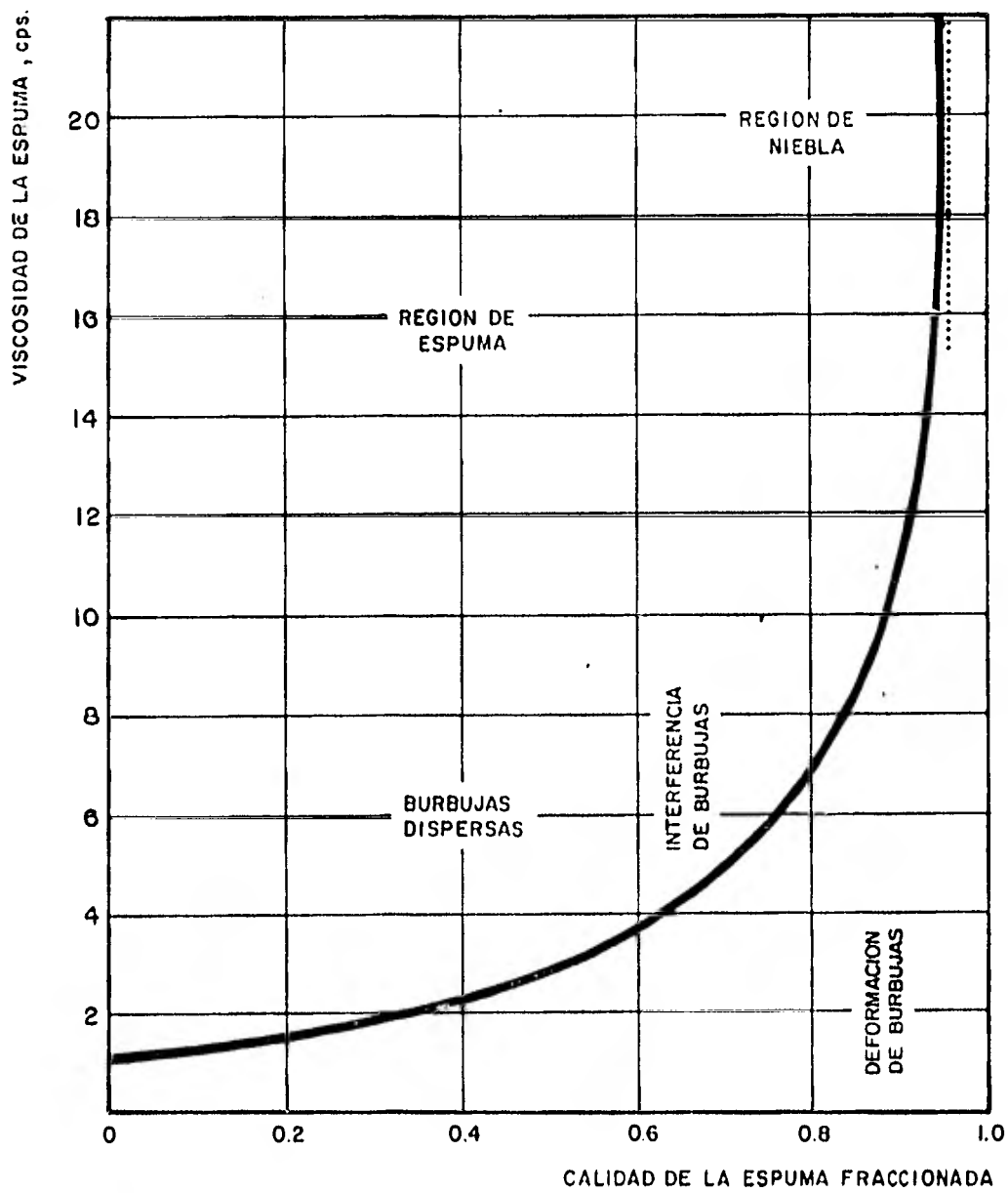


FIG. II.1 VISCOSIDAD DE LA ESPUMA

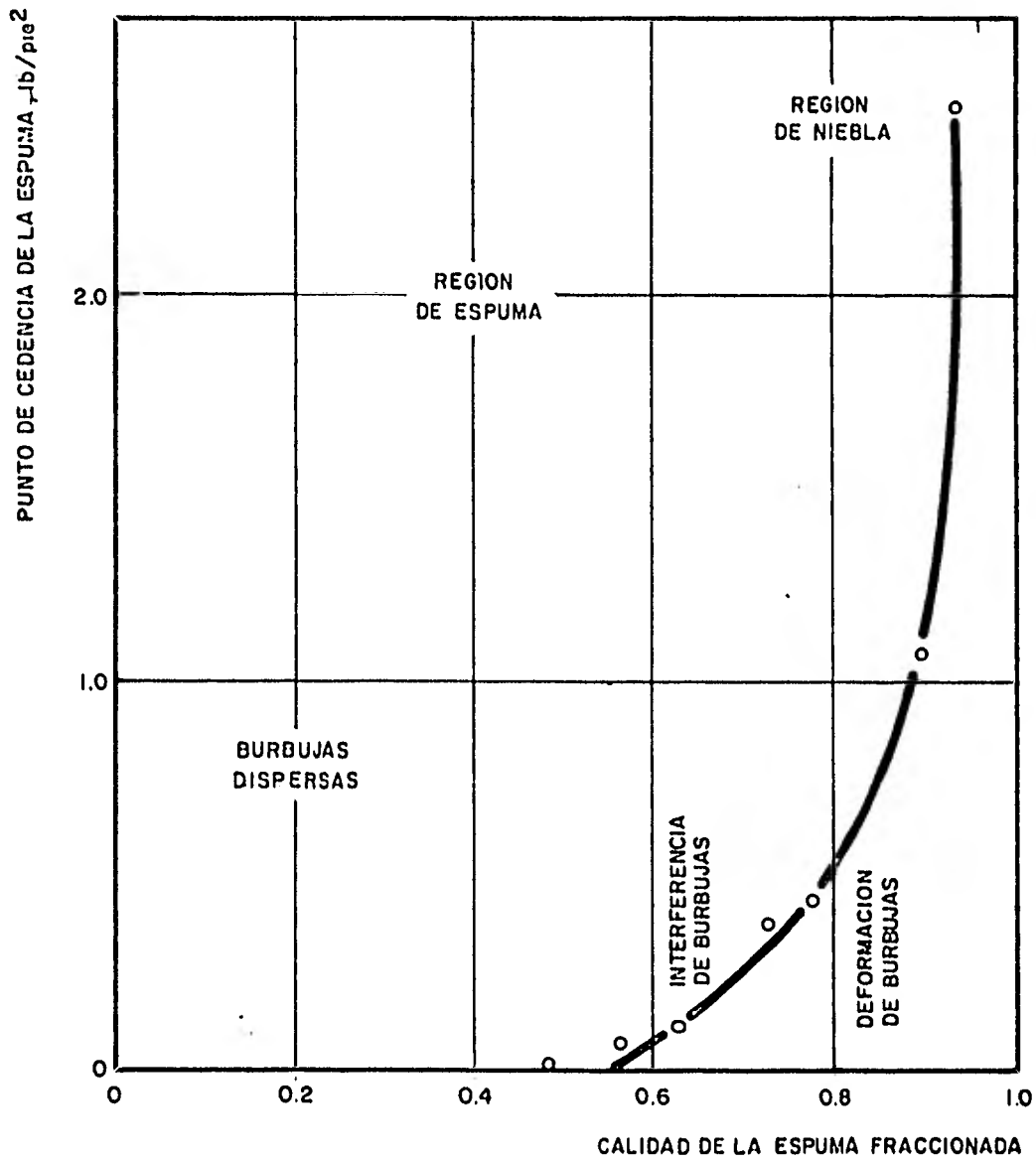


FIG. 2 ESFUERZO DE CEDENCIA DE LA ESPUMA

Fig. 11

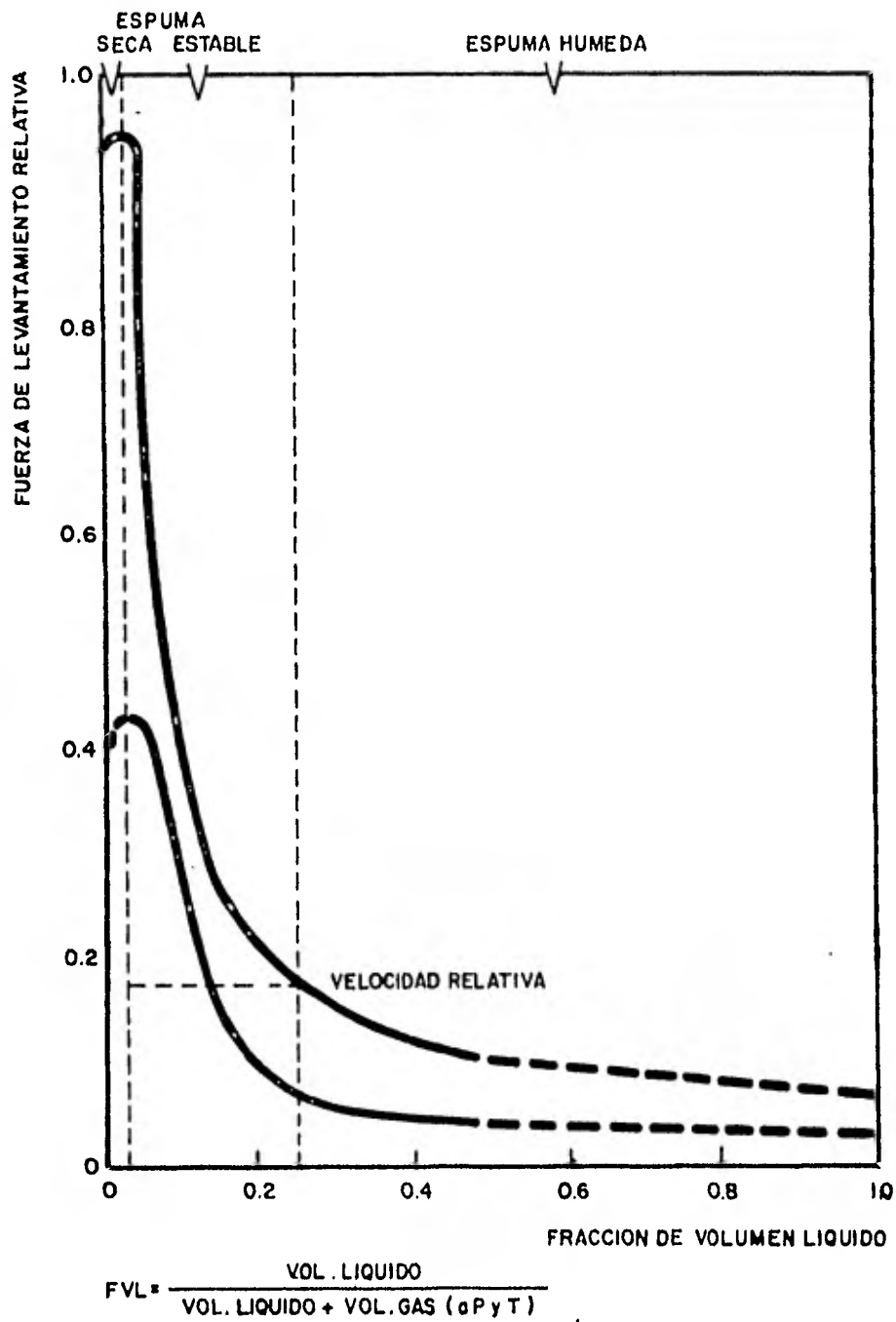
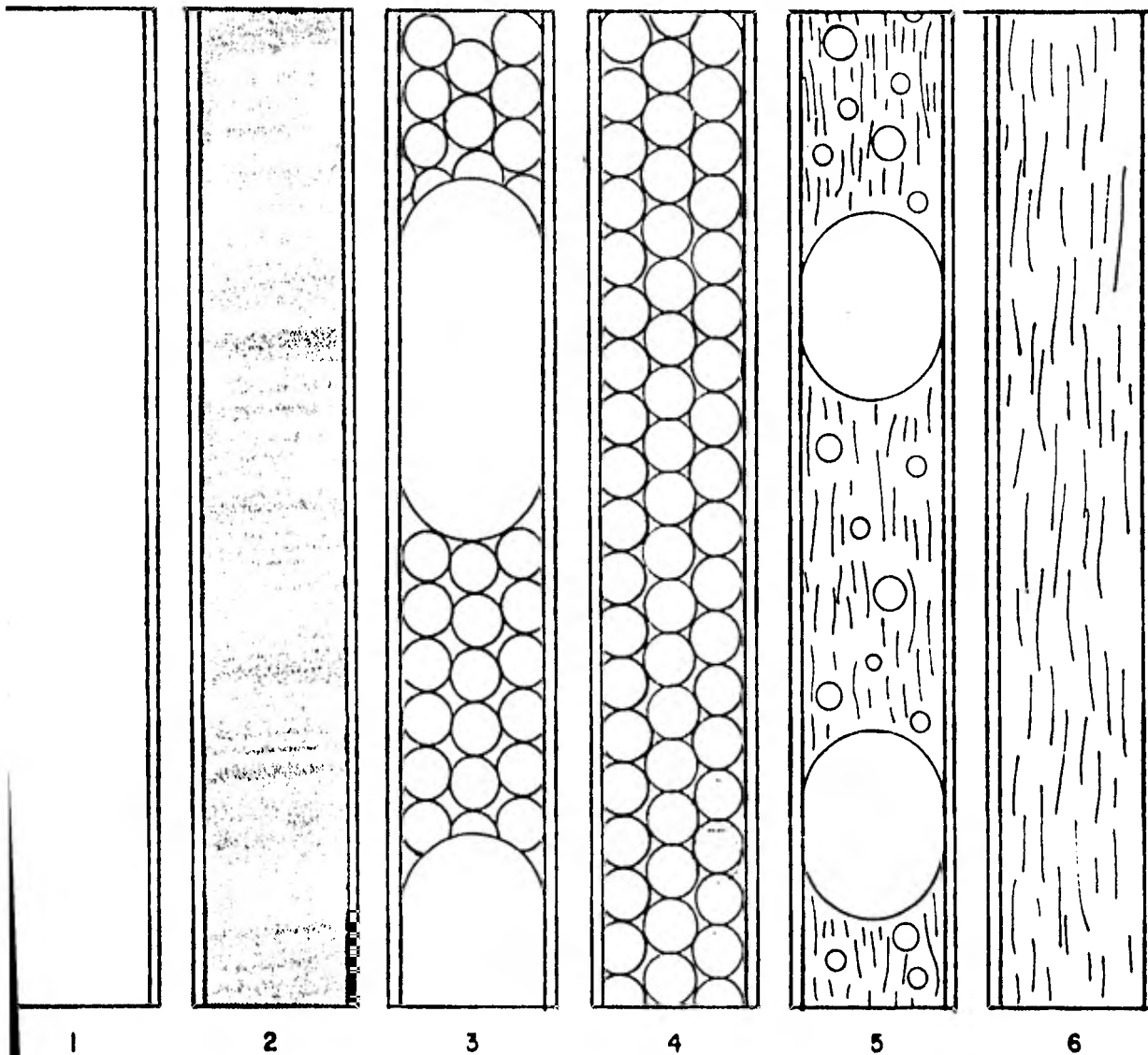


FIG. 4 FUERZA DE LEVANTAMIENTO VS FRACCION DE VOLUMEN LIQUIDO



1

2

3

4

5

6

FLUJO DE AIRE O GAS

FLUJO DE NIEBLA

ESPUMA ESTABLE CON TAPONES DE GAS

ESPUMA ESTABLE

FLUJO LIQUIDO CON TAPONES DE GAS Y BURBUJAS DISPERSAS

FLUJO LIQUIDO

**FIG. 5 TIPOS DE REGIMENES DE FLUIDO USANDO AIRE, NIEBLA
ESPUMA O LIQUIDO COMO MEDIO DE PERFORACION**

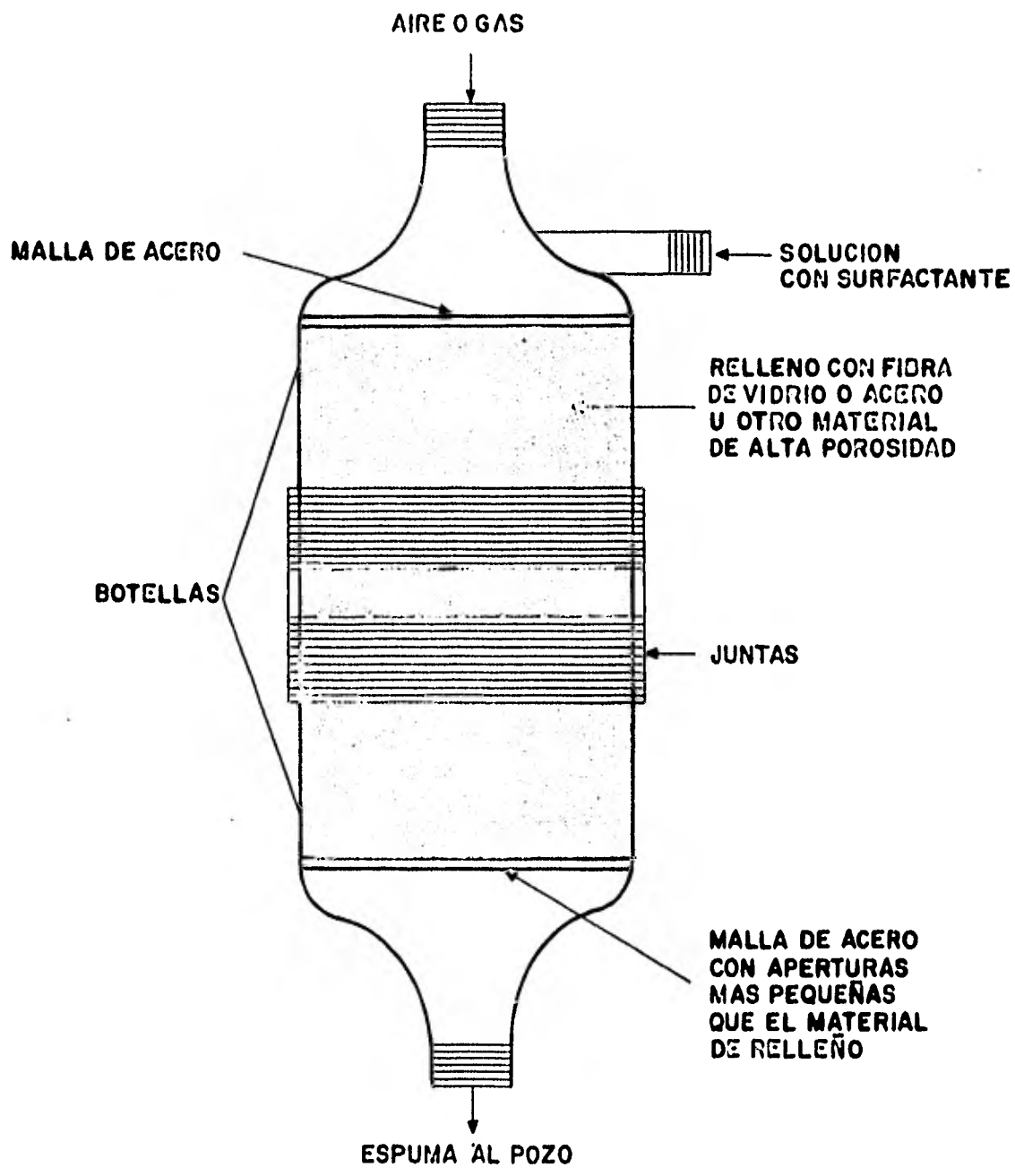


FIG. 6 GENERADOR DE ESPUMA

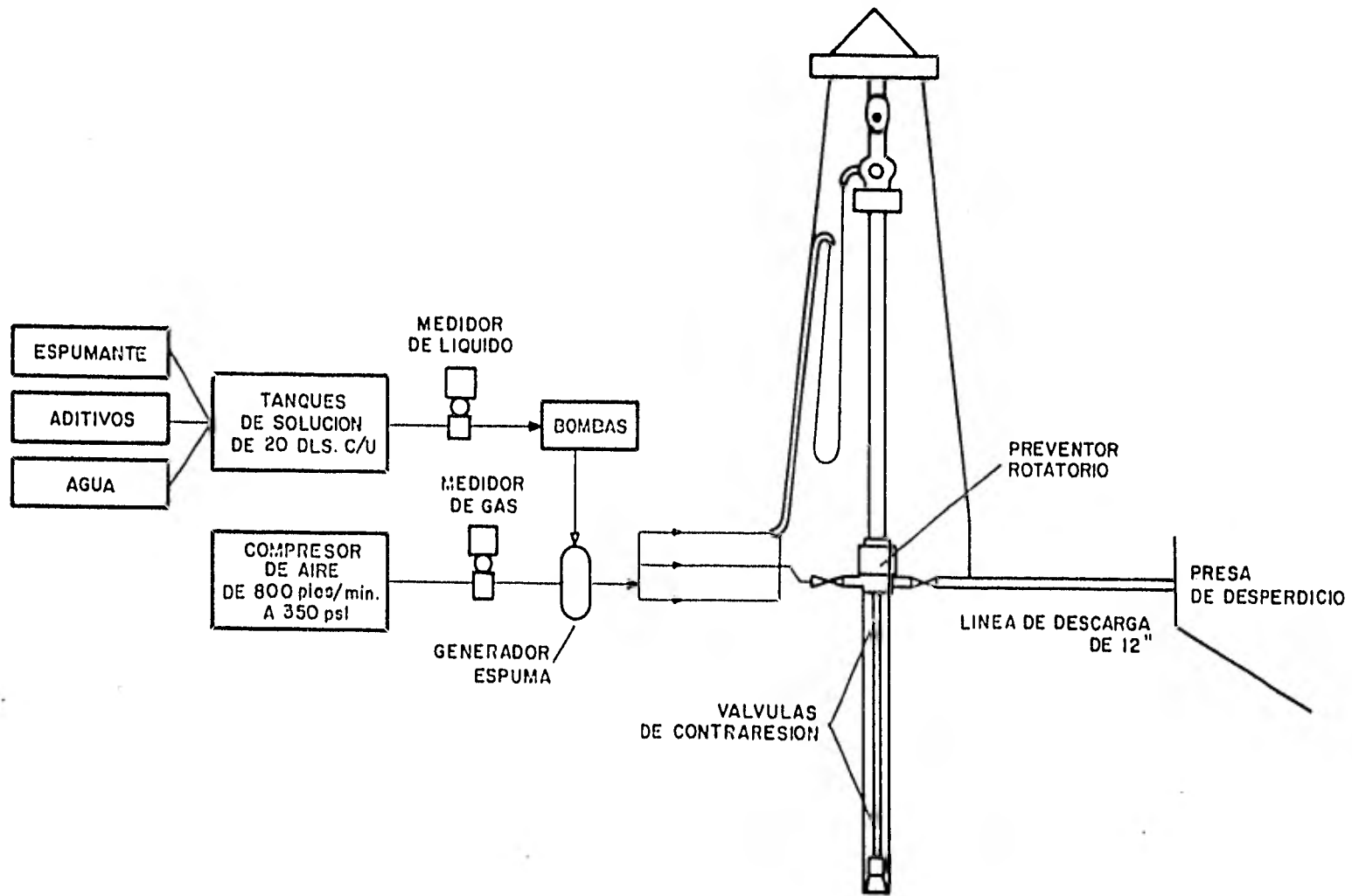


FIG. 7 OPERACION DEL SISTEMA DE ESPUMA

PERFORACION CON LODO AEREADO.

CAPITULO III. PERFORACION CON LODO AEREADO.

III.1.- Consideraciones generales.

El término lodo aerado, se refiere a cualquier sistema de perforación en el que se inyecta a presión un cierto tipo de gas al lodo normal de circulación. La inyección ocurre entre la bomba y el tubo vertical, a través de una tubería (parásita, secundaria) o mediante una sarta de tubería concéntrica. Se elige el método mas apropiado, de acuerdo a las condiciones del pozo.

Cuando en la perforación con aire o espuma se hace imposible el avance de las operaciones debido a la presencia de -- grandes flujos de agua, se usa este sistema para continuar la - perforación y poder excluir el agua que entre al pozo.

Otra aplicación y seguramente la mas común, es la de - utilizar este tipo de fluido para disminuir las pérdidas de circulación cuando estas son muy severas. El aire inyectado a la corriente de lodo logra que la presión ejercida por la columna de fluido sea menor que la de la zona de pérdida.

Se utiliza también para evitar o disminuir los daños a la formación, debido a su reducida carga hidrostática, lo que resulta en beneficio de la productividad del pozo.

Además, este tipo de perforación ofrece otros atractivos como son: el aumento en el ritmo de penetración y en la duración de la barrena, que, aunque no parecen ser tan favorables como en la perforación con aire o espuma, si son mayores que - con lodos convencionales. Se considera que incrementa el ritmo de penetración en un rango de 100% a 150% y aumenta la vida de la barrena en un 50%.

Se considera lodo aerado aquel que posee una densidad menor o igual a .90 gr/cm³. Debe tratarse que la mezcla lodo-aire se logra en forma estable y homogénea, que no se rompa ni se separe dentro del pozo sino hasta su retorno a la superficie.

Aunque lo que realmente sucede en el espacio anular es que el -
aire tiene a separarse del fluido dando lugar a un flujo suma--
mente turbulento. Al separarse el aire se expande rápidamente -
ocasionando un flujo con grandes tapones de aire y lodo alternados. Las velocidades que se alcanzan en el espacio anular son -
muy elevadas, del orden de 450 a 600 metros por minuto, razón -
por la que debe tenerse revestida la mayor parte del pozo para
evitar problemas de erosión de las paredes. Otros problemas pueden
ser: derrumbes de arenas no consolidadas, gravas o conglomera
dos, y zonas con entrada de agua; los primeros pueden ocasionar
pegamiento de tubería o agrandamiento excesivo del diámetro
del pozo, y el segundo, debido a la presencia del agua el fluiso
de adelgazará aumentando el costo del tratamiento.

La perforación con lodo aireado presenta las siguientes -
ventajas sobre la perforación con aire o gas:

1.- Zonas de agua a baja presión pueden ser penetradas -
con lodo aireado. Con aire la presencia de agua ocasiona que se
aglutinen los cortes causando pegamiento de la tubería de perforaci
ón.

2.- Ofrece mayor seguridad para problemas de descontrol.
Si es necesario puede aumentarse rápidamente la densidad del -
fluido, con sólo cerrar el suministro de aire.

3.- Los riesgos de fuego y explosiones dentro del pozo -
son disminuidos por la presencia del agua en la mezcla.

4.- Se obtienen pozos menos desviados.

5.- Se pueden obtener muestras de núcleo fácilmente.

Para la aplicación de este sistema, cuando han ocurrido -
pérdidas de circulación, es necesario revisar los siguientes deta
lles:

1.- La densidad del fluido convencional.

2.- La máxima profundidad a que este colocada la tubería de revestimiento.

3.- El nivel del fluido en el espacio anular.

4.- Tipo de formaciones expuestas en el pozo.

5.- Cuanta perforación adicional se requiere para terminar el pozo.

1.- Debe conocerse la densidad del fluido de perforación, para efectos del cálculo del gasto de aire requerido en el sistema de lodo aerado.

2.- Es conveniente considerar la máxima profundidad a la que es ta colocada la última tubería de revestimiento instalada en el pozo, para evitar problemas de derrumbes, pegamiento de la tubería de perforación o entrada de agua. Debe procurarse tener de 50 a 100 metros de agujero descubierto como máximo, debido a la turbulencia del flujo; cabe mencionar que este rango es solo aproximado y la longitud real depende - enteramente de las características de la formación sin re-vestir.

3.- El nivel estático del fluido en el espacio anular puede ser conocido utilizando cualquiera de los métodos establecidos. Conociendo la ubicación del nivel estático del fluido en el espacio anular cuando ha ocurrido la pérdida, la densidad - del fluido de perforación normal y en forma aproximada la - profundidad de la zona de pérdida, se puede calcular la den-sidad necesaria para detener la pérdida. Esto permite calcu-lar el gasto de aire requerido.

Las pérdidas muy severas se combaten con densidades hasta - de .70 gr/cm³.

4.- El tipo de formaciones expuestas dentro del pozo ayudará a determinar las propiedades necesarias del fluido. En la ma-

yoría de los casos, la misma viscosidad, pérdida de agua y enjarre se mantienen después de la aereación.

5.-Es necesario saber cuanto falta para terminar el pozo para planes futuros en el programa de tuberías de revestimiento. En algunos casos el lodo aereado se utiliza solo para perforar un tramo limitado y después se coloca una tubería de revestimiento.

CONTROL DE LA CORROSION.

El problema de corrosión por oxidación en la sarta de perforación se presenta cuando dentro del pozo se tiene agua y aire a la vez. El uso de fluido aereado con pH mayor de 10 y de agua saturada con cal ha disminuido daños excesivos a las partes de interés.

III.2. Método y equipo utilizados en la aplicación del lodo aereado en perforación rotatoria.

Para la operación de este sistema se emplean principalmente tres métodos básicos para la aereación del lodo de perforación y son:

- a) Método de aereación en la superficie.
- b) Método de tubería concéntrica.
- c) Método de tubería parásita.

La elección de uno de los tres métodos debe hacerse después de un estricto análisis en el que se comparen costos, ventajas y tiempo de acondicionamiento de cada sistema. El primer método por sus características es el de menor costo y requiere para su implantación de muy poco tiempo y es el que con mayor frecuencia se usa. Los otros métodos presentan mayores dificultades para su aplicación ya que requieren de inversiones muy fuertes para la compra o renta del equipo, mayor tiempo para su

implantación y su aplicación puede hacerse únicamente en áreas perfectamente conocidas donde puedan aprovecharse posteriormente los equipos especiales. Estos sistemas deben descartarse para efectuar trabajos aislados o de perforación exploratoria debido a las razones antes expuestas.

a) Método de aereación en la superficie.

Para la aplicación de este sistema se requiere agregar -- cierto equipo auxiliar al normalmente utilizado. Este equipo -- adicional es necesarios para proteger el pozo contra un posible descontrol, para inyectar aire comprimido a la corriente de lodo y para desgasificar el fluido de perforación a su retorno a la superficie.

El aire se inyecta al sistema de circulación entre la bomba de lodo y el tubo vertical. La relación aire-lodo puede ser controlada incrementando o reduciendo el gasto de cada fluido.

La figura 1 muestra un diagrama de la distribución del -- equipo superficial en el que una mezcla de lodo y gas natural -- sustituye al fluido de perforación convencional. El lodo se saca de la presa con la bomba de circulación y en un punto dado -- se mezcla con un gas proveniente del compresor a una presión ligeramente mayor. Posteriormente se dirige hacia el tubo vertical, unión giratoria, flecha, etc., hasta el fondo del pozo y -- retorna por el espacio anular a la superficie.

La introducción de aire y lodo dentro de la sarta de perforación requiere equipo por separado para cada fase. El equipo -- para la fase líquida es el mismo que para perforación convencional. Para la fase gaseosa y además para el buen funcionamiento del sistema el equipo requerido es el siguiente:

Un compresor de tres o cuatro etapas, 220 HP y presión de trabajo máxima de 100 kg/cm². El flujo de aire del compresor hacia el tubo vertical es controlado sobre el piso del equipo, -- abriendo o cerrando una válvula sobre la línea de aire.

Dos válvulas de retención se colocan en la línea de aire -- antes del tubo vertical, para evitar el regreso del aire

a las compresoras o que el, lodo se diriga a ellas.

Una válvula de retención se coloca en la tubería de perforación justamente debajo del nivel de la superficie. El propósito de la válvula es el de contener el fluido comprimido dentro de la tubería de perforación y prevenir el regreso del flujo durante las conexiones.

Un cabezal rotatorio para mantener un sello constante alrededor de la tubería de perforación, y por seguridad cuando se perforan formaciones con contenido de gas.

Tubería de descarga. Se requiere de una tubería de dos - carga de diámetro muy grande (aproximadamente 50 cm.), de longitud suficiente para permitir la separación del aire y lodo, además para reducir la velocidad del flujo. Para disminuir la turbulencia del flujo se colocan al final de la tubería de descarga tramos con inclinación de 45 grados. La tubería debe tener una pequeña inclinación para evitar el asentamiento de los cortes.

Desgasificador. Este elemento es necesario para separar - totalmente la fase gaseosa del líquido y su diseño es de acuerdo a las necesidades particulares de cada pozo.

Una flecha adecuada a la forma del elemento de goma del - cabezal rotatorio.

b) Método de tubería concéntrica.

La introducción de sartas de perforación y de uniones giratorias dobles ha hecho posible un método de aereación, conveniente para la perforación de zonas con pérdida de circulación. El sistema es simple, de fácil análisis y aplicación y recibe el nombre de método de tubería concéntrica.

Este método es similar al sistema de inyección simple utilizado en las instalaciones de bombeo neumático para pozos en producción. El aire comprimido se inyecta por el interior del

espacio anular comprendido entre las dos tuberías concéntricas y se mezcla a cierta profundidad con la corriente de lodo proveniente del fondo del pozo. De tal manera, puede notarse que la mezcla lodo-aire existe solamente en el espacio anular arriba del punto de inyección.

En la figura 2. se muestra el equipo superficial que debe adicionarse al convencional y la figura 3 muestra las conexiones en la sarta doble. El equipo que usualmente se adiciona es el siguiente:

Un compresor de aire, con un rango de potencia de 100 a 250 HP y capaz de descargar a una presión de 100 Hg/cm².

Equipo de sarta doble que incluye; tubería doble, unión giratoria doble y flecha de perforación doble.

Conexiones y válvulas adicionales que se muestran en la figura 2.

La figura 3. muestra como se inyecta al aire por dentro de la tubería de menor diámetro o por el espacio anular existente entre las dos tuberías de la sarta doble. En cada caso, debe colocarse una válvula de retención en la tubería que conduzca el aire. Cuando el aire se introduce a través de la tubería interior, debe colocarse un tapón recuperable abajo de los puertos de inyección.

c) Método de tubería parásita.

Un tercer método que ha proporcionado resultados satisfactorios es el de utilizar una tubería parásita, (ver figuras 4 y 5) con la que se logra una disminución en la presión hidrostática de la columna de lodo, evitando o disminuyendo pérdidas de circulación.

La operación consiste en adherir una tubería de diámetro pequeño (2 a 3 pulgadas) a una de las tuberías de revestimiento intermedias por medio de abrazaderas prefabricadas. Se inyecta el aire por medio de la tubería pequeña al espacio anular exis-

tente entre las tuberías de revestimiento y de perforación. La profundidad del punto de inyección de la tubería parásita esta 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 los gastos aire-lodo y de la densidad del lodo.

Algunas ventajas de este método sobre los convencionales son:

Mínimo pérdida de tiempo al hacer conexiones y después de cambios de barrena.

Requiere de un mínimo de equipo.

Las condiciones en el fondo del pozo son las mismas que utilizando fluidos convencionales.

El aire no tiene contacto con las paredes descubiertas del pozo por lo que el problema de erosión no se presenta.

La corrosión es mínima y controlada

El equipo adicional es el siguiente:

Un compresor.

Tubería parásita adherida a la de revestimiento

Un estrangulador colocado en la tubería parásita cerca del punto de inyección para evitar turbulencias excesiva.

Cabezal rotatorio.

Desgasificador.

Tubería de descarga.

III.3. Técnica de perforación con lodo aireado.

III.3.3 INICIO DE LA INYECCION DE AIRE AL LODOS.

Debe ajustarse primero el gasto del lodo de perforación hasta el mínimo necesario para la limpieza efectiva del pozo. - La válvula del aire se abre, entonces se observa un incremento de presión en el manómetro del tubo vertical. Conforme la columna de lodo aireado viaja hacia el fondo por dentro de la tubería de perforación, se sigue observando un aumento en la presión y se debe al desbalanceo en las densidades de la mezcla y el lodo que se encuentra en el espacio anular. Después de que la columna aireada alcanza la barrena y comienza a subir por el espacio anular, la presión empieza a disminuir conforme se acerca a la superficie.

La aproximación de la columna aireada hacia la superficie es precedida por una gran turbulencia en el lodo, debido al aumento de velocidad ocasionado por la expansión del aire. Después de que pasa esta turbulencia, la presión se estabiliza y permanece constante, sujeta solamente a variaciones en el bombeo de lodo, conexiones y cambio en la condiciones de compresión. La figura 6, muestra una gráfica de la variación de la presión conforme ocurre la aireación.

Después de que se ha establecido totalmente la circulación con lodo aireado, debe tenerse en cuenta que variarán las lecturas del indicador de peso debido a que se modifica el efecto de flotación por la presencia de lodo de menor densidad.

III.3.2 AGREGAR TUBERIA DE PERFORACION.

Antes de hacer una conexión, el suministro de aire debe suspenderse y la bomba de lodo debe mantenerse en operación el tiempo suficiente para desplazar todo el lodo aireado que se encuentra por dentro de la tubería de perforación y arriba de la válvula de retención. Esto ordinariamente requiere de 20 segundos a 2 minutos, dependiendo sobre todo de la profundidad a la que se encuentra la válvula y del ritmo de circulación. La

conexión se hace en forma normal y se abre la válvula de aire - tan pronto como se pone en marcha la bomba de lodo. Las conexiones de rutina en este tipo de sistemas requieren de 4 a 6 minutos.

Inmediatamente después de una conexión, la presión registrada en el tubo vertical es baja, a causa de que al inicio del bombeo del lodo se forman vacíos en la columna, hasta que se abre la válvula de aire empieza a incrementarse la presión. Conforme el tapón de lodo viaja hacia arriba por el espacio anular se advierte un incremento en la presión hasta un máximo, que es precisamente, la presión de trabajo que se tenía antes de hacer la conexión. Después la presión se mantiene en su nivel normal.

III.3.3. NIVEL EN LAS PRESAS DE LODO.

También como en la perforación convencional, el nivel de las presas de lodo debe vigilarse continua y estrechamente para advertir cualquier aumento o disminución en el volumen del lodo en circulación. Pueden ocurrir pérdidas, para las de tipo total o de gran cantidad del volumen, seguramente no ocurrirán durante la aereación. Gas, aceite o agua pueden incorporarse a la corriente de lodo aerado aumentando el volumen. El gasto de lodo puede variarse si se hace necesario un control hidrostático.

III.3.4 CAMBIO DE BARRENA.

Antes de realizar un viaje la columna de lodo aerado debe ser totalmente remplazada por lodo normal, las razones son las siguientes:

- 1.- La expansión del aire puede ocasionar una expulsión violenta de la tubería de perforación.
- 2.- Buenas lecturas de desviación del pozo son difíciles de obtener. Aparentemente, la presencia del aire causa movimientos vibratorios que afectan al instrumento causando lecturas erráticas.

3.- Como seguridad para evitar que cualquier formación pueda provocar problemas de descontrol.

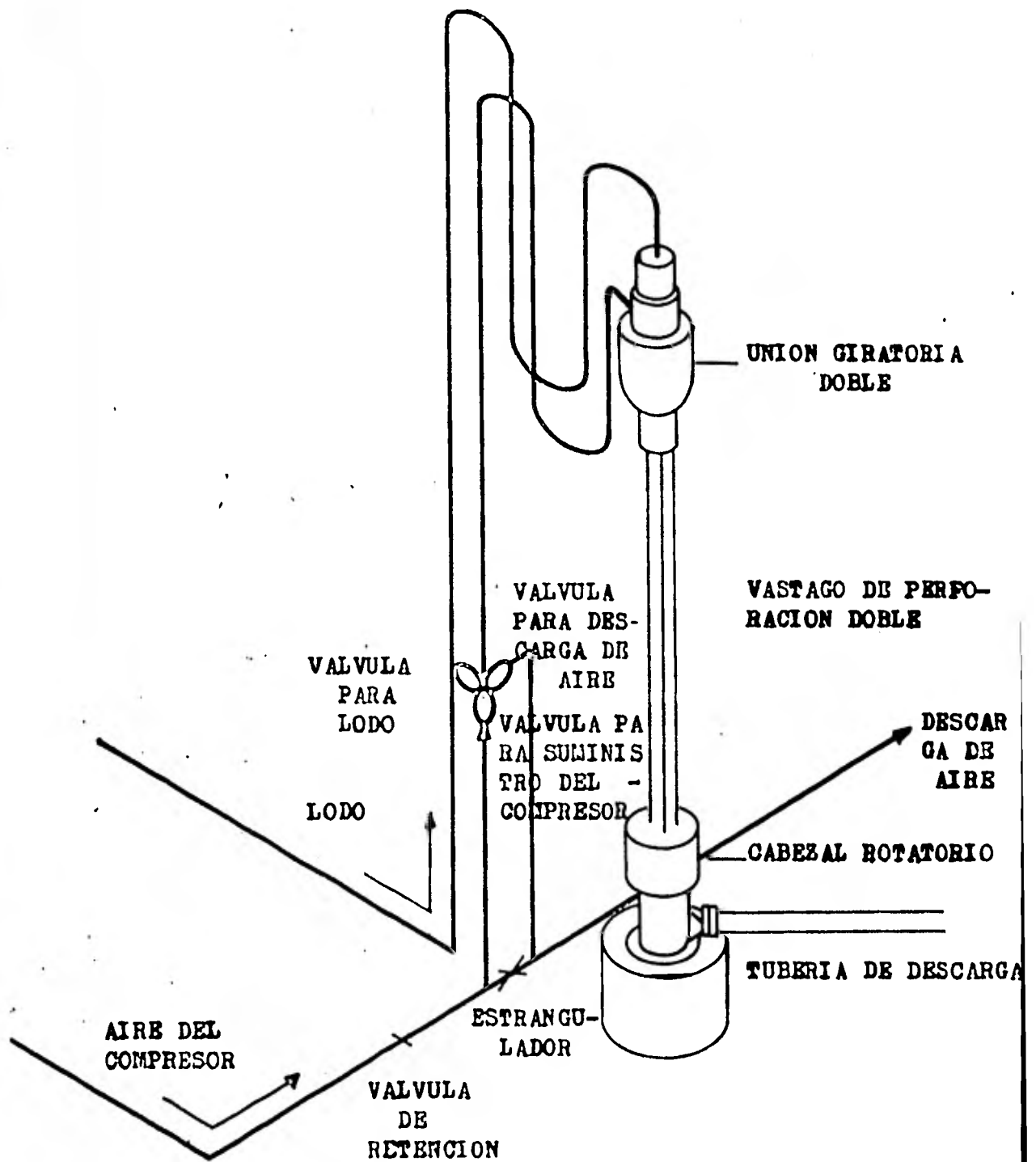


FIG. 1 METODO DE AERACION EN LA SUPERFICIE

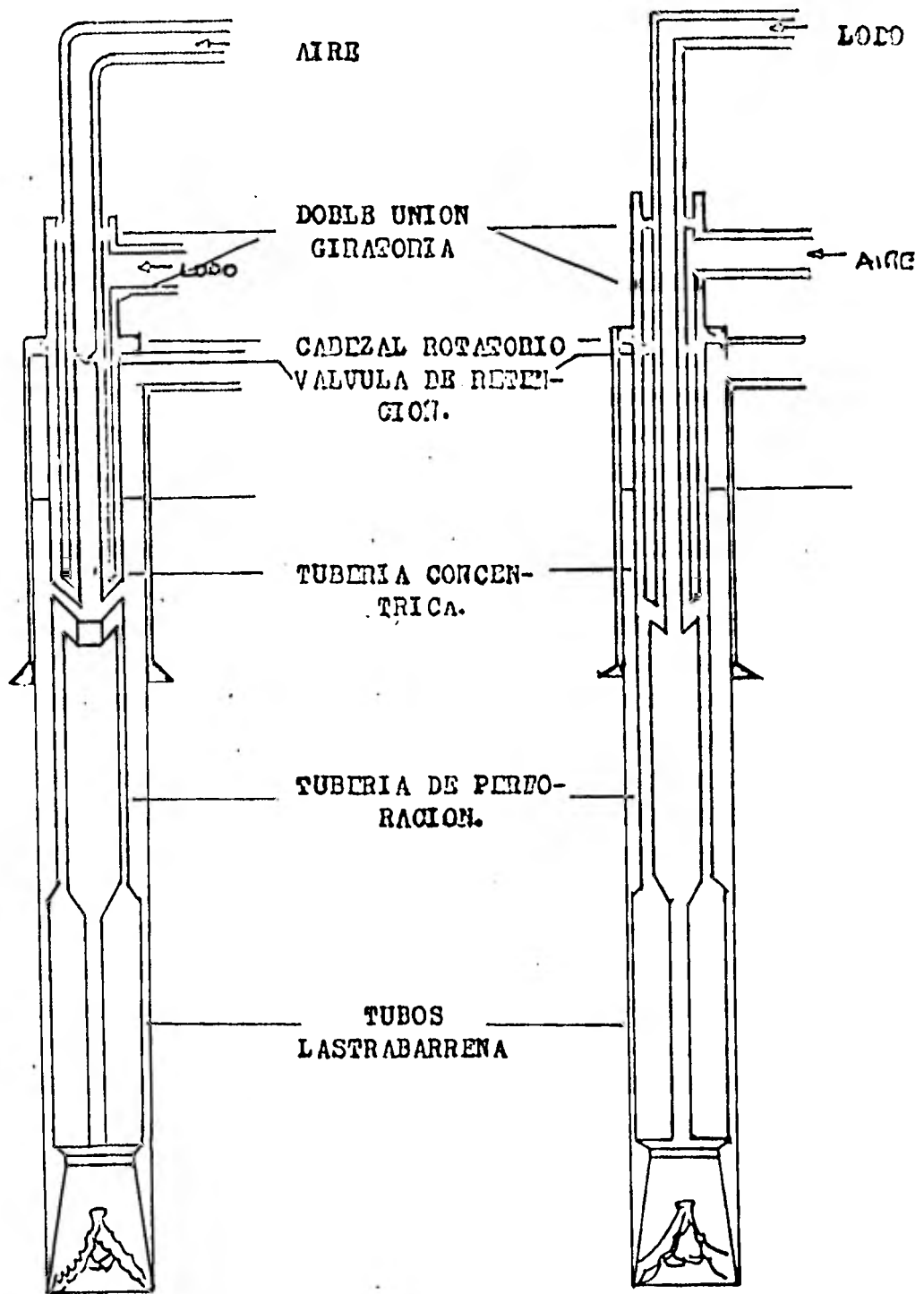


FIG. 2

FIG. 3

METODO DE TUBERIA CONCENTRICA

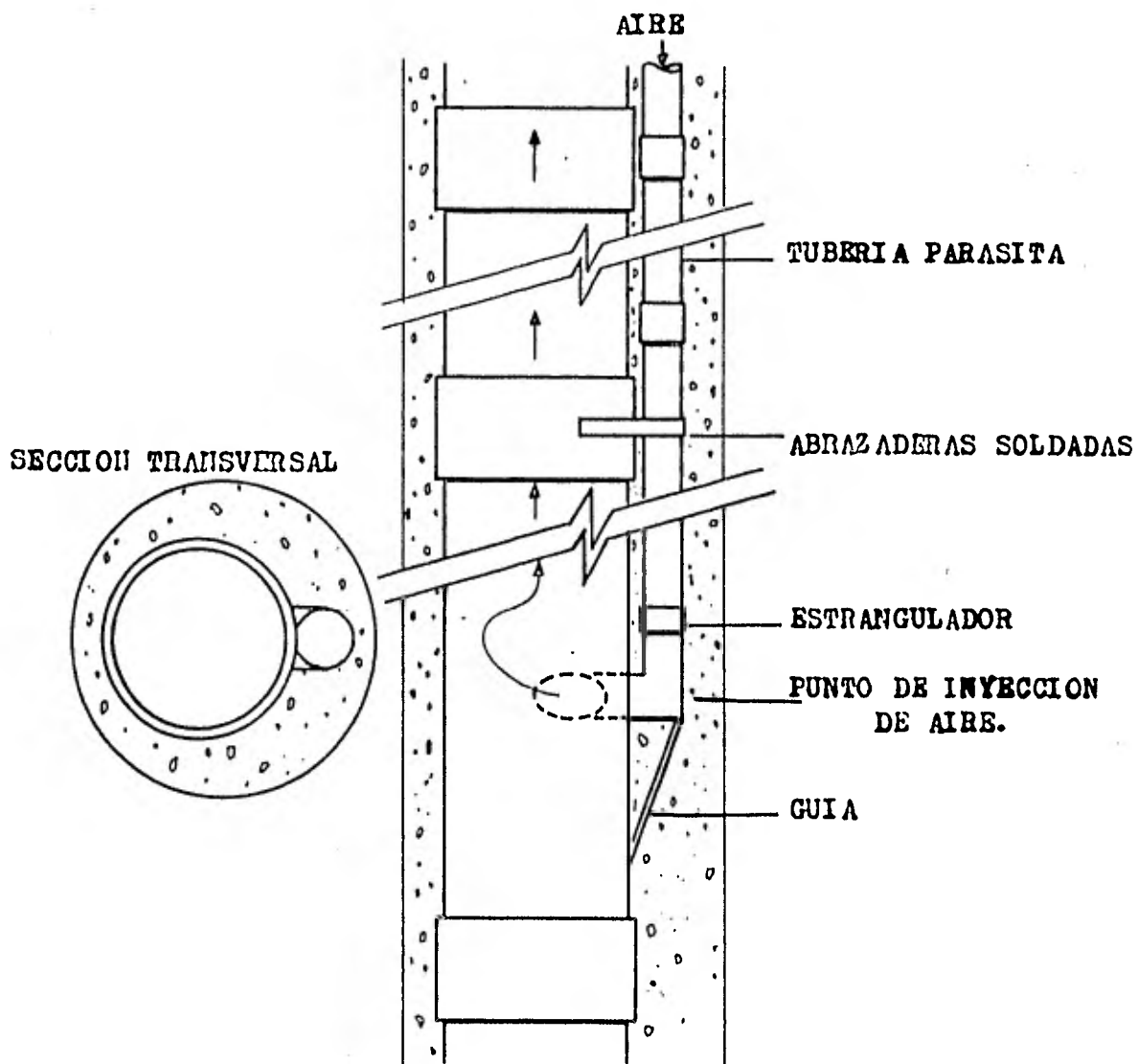


FIG. 4 METODO DE TUBERIA PARASITA.

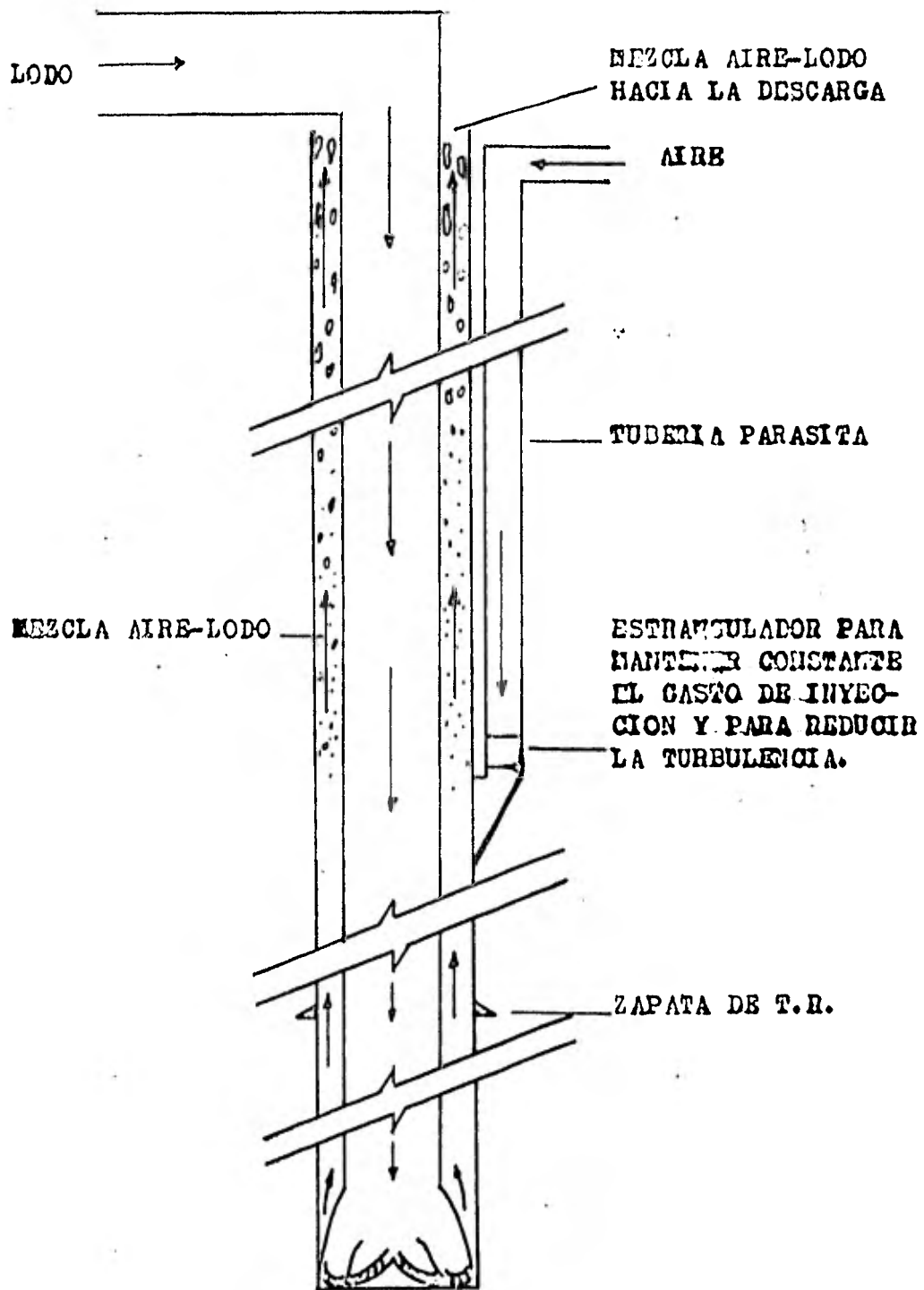


FIG. 5 METODO DE TUBERIA PARASITA.

MODELOS MATEMATICOS PARA CALCULAR LOS
GASTOS REQUERIDOS DE AIRE.

DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMATICOS PARA LA PERFORACION
CON AIRE O GAS COMO FLUIDOS DE CIRCULACION.

Dentro de los aspectos más importantes en la perforación con aire o gas se encuentran los cálculos de los gastos requeridos para lograr un levantamiento efectivo de los cortes. Los métodos iniciales desarrollados se basaron en la suposición de que para tener una suficiente capacidad de arrastre de los cortes, se requería una velocidad mínima del aire en el espacio anular de 1000 m/min. medida a condiciones base; sin embargo, en la práctica estos gastos han resultado insuficientes por no tomarse en consideración todos los parámetros involucrados en la perforación.

Los modelos desarrollados que se presentan en este trabajo utilizan principalmente la fórmula de Rittinger para la velocidad de asentamiento de los cortes en el espacio anular. En seguida se presentan las consideraciones hechas por cada autor para el establecimiento de su modelo, el desarrollo de los modelos matemáticos aquí expuestos se muestra en los apéndices, I, II, III, IV.

MODELO DE PRESTON L. MOORE.

Para calcular el gasto de aire o gas necesario para la adecuada operación del sistema de aire, este modelo matemático presenta las siguientes consideraciones:

1.- La mezcla sólido-gas no se considera homogénea en el espacio anular, para el cálculo de las caídas de presión por fricción.

2.- No se establece una velocidad mínima en el espacio anular.

3.- El punto crítico de diseño se establece a partir de los hombres de los lastrabarrena.

4.- Las caídas de presión por fricción debidas al gas se calculan independientemente de las debidas a los sólidos.

5.- El aire se comporta como un gas ideal, por lo tanto el

factor de supercompresibilidad (Z) es igual a uno.

MODELO DE R. R. ANGEL.

Este modelo matemático fué uno de los primeros en llevarse a cabo y tuvo gran aceptación por parte de la industria. Básicamente es la aplicación de la ecuación de Weymouth (la cual es utilizada para el diseño de transporte horizontal) acondicionandola a flujos verticales.

Las consideraciones que se hicieron para el desarrollo de este modelo son las siguientes:

1.- La mezcla sólido-gas existente en el espacio anular se considera homogénea.

2.- La velocidad mínima del aire para levantar los cortes y medida a condiciones base es igual a 1000 m/min.

3.- El aire se comporta como un gas ideal, por lo tanto el factor de supercompresibilidad (Z) es igual a uno.

4.- El factor de fricción (f) es función del diámetro.

5.- El punto crítico para el diseño se ubica en los hombros de los lastrabarrenas.

MODELO DE MC CRAY AND COLE.

Este método establece que el gusto de aire o gas que fluye por el espacio anular esta relacionado con la velocidad de asentamiento de los cortes.

Las consideraciones de este método son:

1.- La velocidad del aire en el espacio anular debe ser mas o menos de 1000 m/min.

2.- La densidad del gas en el fondo del pozo se verá afectada por:

a) La presión de descarga en la superficie.

b) La temperatura de fondo.

c) Las caídas de presión por fricción.

d) La presión generada por el peso de la columna de aire o gas.

e) Los cortes en el espacio anular.

3.- El ritmo de perforación influye en el gasto de circulación requerido, debido a la carga hidrostática de la columna -- fluyendo por el espacio anular.

4.- Contempla el cálculo de los volúmenes de aire, tanto -- para pozos verticales como para pozos inclinados.

MODELO DE A. R. SAPRE-R. J. SCHOEPPPEL. *

El enfoque presentado por este modelo permite la predicción de los gastos de aire requeridos para elevar los cortes hacia la superficie desde el punto crítico de diseño, justamente en los - hombros de los lastrabarrena.

Estos autores toman en cuenta las siguientes consideraciones.

1.-El punto crítico de diseño son los hombros de los lastrabarrena.

2.- No se asume una velocidad mínima del aire en el espacio anular.

3.- El aire se comporta como un gas real.

4.- La velocidad de las partículas en los hombros de los - lastrabarrena es igual a cero.

5.- Las presiones en el fondo del pozo se calculan a partir del punto crítico de diseño.

6.- Se consideran los efectos de fricción entre las paredes y los cortes y entre el gas y las paredes del pozo.

COMENTARIOS.

Después de haber efectuado el análisis de cada uno de los modelos desarrollados para calcular los gastos de aire requeridos, se observa que para una velocidad de penetración, profundidad y densidad del gas, 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 este empleando (en este caso aire) sufra cambios, razón por la que no se debe considerar como un gas ideal, ya que esta comprimido y sujeto a cambios de temperatura generados por la fricción y gradiente geotérmico, por lo que debe considerarse como un gas real (R. R. Angel y Preston L. Moore consideran el aire como un gas ideal). Por otra parte, se considera una velocidad mínima del aire en el espacio anular de 1000 m/min. medida a condiciones base para levantar las partículas, pero no se toma en cuenta el diámetro de estas y conforme la profundidad aumente, la capacidad de levantamiento se verá disminuida.

Si se considera la mezcla sólido-gas 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 solo los generados por el gas. Ahora bien, sabiendo que los sólidos también generan pérdidas, estos deberán tratarse de manera separada del gas.

En el modelo de Mc Cray and 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 se considerada homogénea, en el ritmo de perforación se considera 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 A. R. Sapiro-R. J. Schoepel se considera mayor número de variables que se apegan más a la realidad obteniéndose mayores gastos de circulación que en los modelos anteriormente expuestos, lo que elimina la necesidad de utilizar un factor de seguridad, como se hace en la práctica con los otros modelos.

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

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

En las figuras IV.1 y IV.2 se presentan los 4 modelos en una forma comparativa.

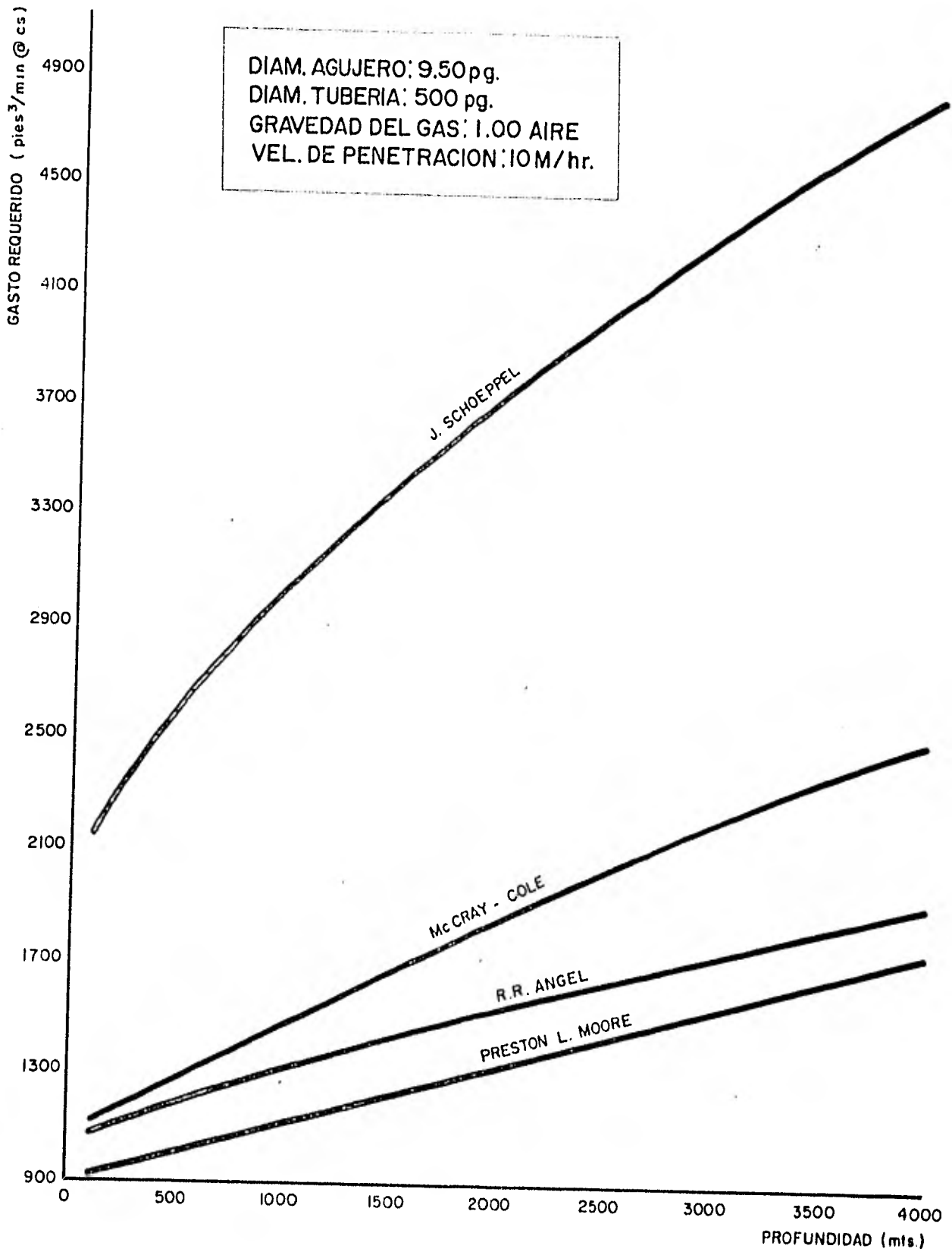


FIG. I GRAFICA COMPARATIVA

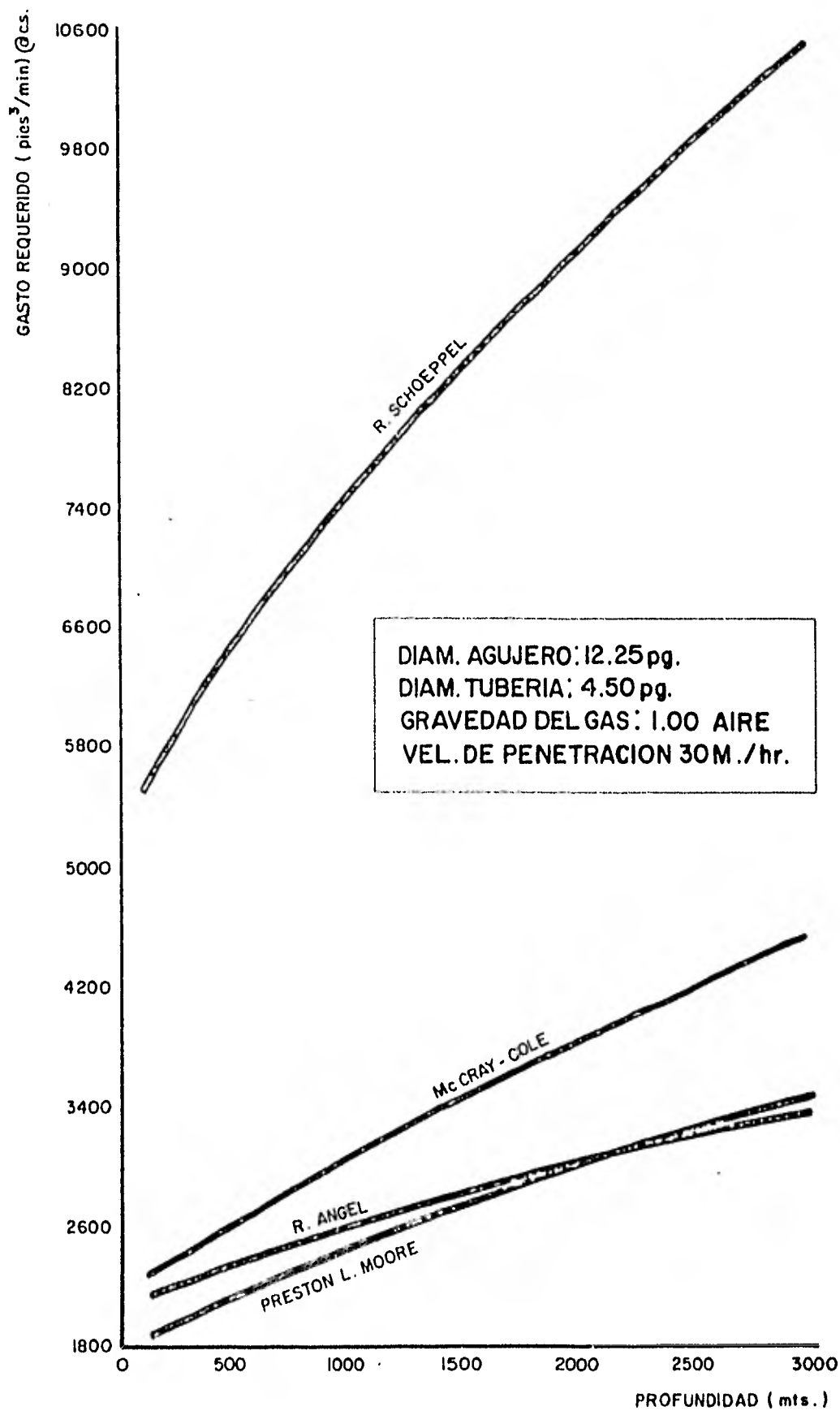


FIG.2 GRAFICA COMPARATIVA

MODELOS MATEMATICOS

APENDICE 1		PRESTON L. MOORE
"	2	R. R. ANGEL
"	3	MC. CRAY AND COLE.
"	4	A.R. SAPRE- R.J. SCHOEPPPEL

MODELO DE PRESION L. MOORE.

Para el análisis de la fase gaseosa, se parte de la siguiente ecuación de balance de energía.

$$dP = \left[P_f \left[\frac{g}{g_c} + \frac{fv^2}{2g_c(D_o - D_i)} \right] \right] dh \quad \dots (1)$$

DONDE:

Pf = Densidad del fluido, gr/cm³

g = Aceleración de la gravedad 981 cm/seg

gc = Constante de conversión de la ley de Newton
981 gr-cm/grf seg².

V = Velocidad del fluido cm/seg

f = Factor de fricción de Fanning, adimensional

Da = Diámetro de agujero. cm

Df = Diámetro de tubería. cm

P = Presión grf/cm²

h = Profundidad. cm

Para el análisis de la fase sólida, se parte de la siguiente ecuación de balance de energía.

$$dP = \frac{M_p g}{V_o g_c} dh + \frac{F_d}{A_p} \quad \dots (2)$$

DONDE:

Mp = Masa de sólidos gr

Va = Volumen anular cm³

Fd = Fuerza de arrastre sobre una partícula sólida grf

Ap = Area de una partícula sólida cm²

Con el objeto de poder realizar simplificaciones posteriores, conviene elegir la forma de los sólidos. Aunque durante la perforación, las formas son muy variadas, Gray y posteriormente Moore determinaron coeficientes de arrastre empíricos. El método consiste en elegir una determinada forma; en este caso una esfera, y -

utilizan un coeficiente que tome en cuenta la desviación de la forma elegida. Los coeficientes que se utilizarán son:

0.805 para arenas y formas similares

1.400 para calizas y formas similares

De aquí, se puede obtener la siguiente relación:

$$C_d = \frac{2 P_f g_c}{\rho_f v^2} \quad \dots(3)$$

$$P_f = \frac{C_d \rho_f v^2}{2 g_c} \quad \dots(4)$$

Como lo que se trata de encontrar es la fuerza de arrastre, se pueden multiplicar ambos miembros de la ecuación por el área de arrastre de una partícula sólida:

$$A_p P_f = \frac{C_d A_p \rho_f v^2}{2 g_c} \quad \dots(5)$$

Como $A_p P_f = F_d$ bastará multiplicar la ecuación anterior por el número total de partículas (N) para encontrar la fuerza de -- arrastre total.

$$F_{dt} = \frac{C_d A_p \rho_f v^2 N}{2 g_c} \quad \dots(6)$$

DONDE:

F_{dt} Fuerza de arrastre total grf

C_d Coeficiente de arrastre, adimensional

A_p Area de arrastre de una partícula cm²

ρ_f Densidad del fluido gr/cm³

v Velocidad de asentamiento de las partículas cm/seg

N Número total de partículas.

El número total de partículas, se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Pi = \frac{A_p (1-\epsilon) dh}{V_p} \quad \dots(7)$$

Donde:

V_p volumen de una partícula cm^3

ϵ grado de desviación de las partículas a partir de la forma clogida, fracción decimal.

Sustituyendo (7) en (6)

$$Pd_t = \frac{Cd A_p^2 f V (1-\epsilon) dh}{2gc V_p} \quad \dots(8)$$

Como se menciono anteriormente, este modelo utiliza la forma de una esfera, por lo tanto se pueden efectuar las siguientes sustituciones:

$$A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2 \quad \dots(9)$$

$$V_p = \frac{\pi}{4} D_p^3 \quad \dots(10)$$

Para calcular la velocidad de asentamiento de las partículas, se utilizará la ecuación de Rittinger:

$$V = \sqrt{\frac{4g D_p (P_p - P_s)}{3Cd}} \quad \dots(11)$$

Por otra parte, de la ecuación (8) tenemos:

$$\frac{Pd}{A_p} = \frac{Cd A_p V^2 (1-\epsilon)}{2gc V_p} \quad \dots(12)$$

sustituyendo (9), (10) y (11) en (12) tenemos:

$$dP = \frac{6 Cd D_p^2 (1-\epsilon) \sqrt{4g D_p (p - \rho_s)}}{4 \times 2gc D_p^3 (3 Cd)} dh$$

Simplificando:

$$d = (1 - \epsilon) dh \quad \dots(13)$$

DONDE:

Densidad de los sólidos gr/cm³

La ecuación (13) contiene ϵ que aun no ha sido determinado; para hacerlo, se supone que el gas ocupa el volumen total y de ahí se resta el volumen de la partícula.

$$\epsilon = \frac{V_f - V_p}{V_f} = 1 - \frac{V_p}{V_f} \quad \dots(14)$$

De la definición de densidad tenemos:

$$v = \frac{M_p}{\rho_p} \quad V_f = \frac{M_f}{\rho_f} \quad \dots(15)$$

Sustituyendo en (13)

$$1 - \epsilon = \frac{M_p \rho_f}{M_f \rho_p} \quad \dots(15)$$

Sustituyendo (15) en (13)

$$d\rho = \rho_f \frac{M_p}{M_f} dh \quad \dots(16)$$

Sustituyendo (16) en (2) tenemos:

$$d\rho = \rho_f \frac{M_p}{V_a} dh + \rho_f \frac{M_p}{M_f} dh \quad \dots(17)$$

Por medio de la ecuación (1) se calcula las caídas de presión debidas al gas y con la (17) las debidas a los sólidos. Sumando ambas se encuentra la caída de presión total.

$$d\rho = \rho_f dh + \rho_f \frac{fv}{2g(D_0 - D_1)} dh + \frac{M_p}{V_a} dh + \rho_f \frac{M_p}{M_f} dh$$

Como $V_0 = V_f$ $V_f = \frac{Mf}{\rho_f}$

Sustituyendo y simplificando tenemos:

$$dP = \rho_f (1 + 2M_p / Mf) dh + \rho_f \frac{fV}{2g(D_0 - Df)} dh$$

De la ecuación anterior se obtiene:

$$dh = \frac{dP}{\rho_f (1 + 2M_p / Mf) + \rho_f \frac{fV^2}{2g(D_0 - Df)}} \quad \dots(18)$$

Sustituyendo valores y multiplicando denominador y multiplicador por P

$$dh = \frac{PdP}{\frac{S P^2 (1 + 2M_p / Mf)}{2912.12 \gamma} + \frac{3.43 \times 10^{-9} S Q^2 T f}{(D_0 - Df)(D_0^2 - Df^2)^2}}$$

Llamando:

$$b = \frac{3.43 \times 10^{-9} S Q^2 T f}{(D_0 - Df)(D_0^2 - Df^2)^2}$$

$$a = \frac{S(1 + 2M_p / Mf)}{2912.12 \gamma}$$

$$dh = \frac{PdP}{aP^2 + b}$$

$$\int_0^h dh = \frac{1}{2a} \int_{P_c}^{P_f} \frac{PdP}{aP^2 + b}$$

$$2ah = \text{Ln} \frac{(aP_f^2 + b)}{(aP_c^2 + b)}$$

Despejando P_f de la ecuación anterior

$$P_f = \sqrt{(P_c + (b/a)) e^{2ah} - (b/a)} \quad \dots(19)$$

DONDE:

P_f Presión en cualquier punto grf/cm^2

P_c Presión de descarga grf/cm^2

e Base de los logaritmos: 2.71828

La ecuación (19) contiene dos incógnitas, la presión y el gasto por lo tanto será necesario encontrar otra ecuación que contenga ambas incógnitas para posteriormente resolver ambas ecuaciones simultáneamente.

De la ecuación de Rittinger tenemos:

$$V_s = \sqrt{\frac{4 g D_p \rho_p}{3 C_d (\rho_f)}$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación por $\rho_f A_a$ tenemos:

$$\rho_f A_a V_s = A_a \sqrt{\frac{4 g D_p \rho_p \rho_f}{3 C_d}}$$

Llamando $G = \rho_f A_a V_s$

$$G = A_a \sqrt{\frac{4 g D_p \rho_p PMS}{3 C_d RT}} \quad \dots(20)$$

DONDE:

- G Gasto de gas gr/seg
- A Area anular cm²
- g Aceleración de la gravedad 981 cm/seg²
- D_p Diámetro de los sólidos cm
- ρ_p Densidad de los sólidos gr/cm³
- s Densidad relativa del gas (aire=1)
- P Presión en cualquier punto grf/cm²

Sustituyendo valores y despejando p de la ecuación (20)

$$P = \frac{.0614392 G^2 C_d T}{(D_a^2 - D_i^2)^2 S D_p} \quad \dots(21)$$

Igualando (21) y (19)

$$\frac{.0614392 G^2 C_d T}{(D_a^2 - D_i^2)^2 S D_p} = \sqrt{(P_c (b/a)) e^{2ah} - (b/a)}$$

La igualdad anterior nos permite conocer el gasto Q que -
deberá de circularse en el pozo durante la perforación del mismo. Debido a que es sumamente difícil despejar a Q de la igualdad, se calculará su valor mediante un método de ensaye y error

MODELO DE R. R. ANGEL.

A partir de la ecuación de Rittinger se tiene que:

$$P_s V_s^2 = P_f V_f^2 \quad \dots(1)$$

DONDE:

P_s Densidad del aire medida a condiciones base E igual a -
0.001228 g/cm³

V_s Velocidad del aire medida a condiciones base E igual a
1525 cm/seg (3000 ft/min)

P_f Densidad del aire en cualquier punto g/cm³

V_f Velocidad del aire en cualquier punto cm/seg.

$$P_f = \frac{SP}{2912.12 ZT} \quad \dots(2)$$

$$V_f = \frac{.14 ZQT}{(D_o^2 - D_i^2)^2 P} \quad \dots(3)$$

DONDE:

P Presión grf/cm

D_o Diámetro de agujero cm

D_i Diámetro de tubería cm

T Temperatura promedio ok

Q Gasto de aire @ c.b. cm³/seg

s Densidad relativa del gas (aire=1)

Sustituyendo (2) y (3) en (1)

$$P_s V_s = \frac{SP}{2912.12 ZT} \left[\frac{.14 ZQT}{(D_o - D_i) P} \right]^2 \quad \dots(4)$$

$$P_s V_s = \frac{6.7304 \times 10^{-5} Q^2 T}{(D_o - D_i) P} \quad \dots(5)$$

Despejando la presión y sustituyendo valores, tenemos:

$$V = \frac{5.40 \times 10^{-4} Q \sqrt{s}}{(D_o - D_i) v_s} \quad \dots(6)$$

DONDE:

- P Presión en cualquier punto grf/cm²
- D_o Diámetro de agujero cm
- D_i Diámetro de tubería cm
- v_s Velocidad del aire medida a c.b. E igual a 1525 cm/seg
- T Temperatura promedio ok
- Q Gasto de gas " c.b. cm³/seg
- s Densidad relativa del gas (aire=1)

En la ecuación (6) se tienen dos incógnitas, la presión (P) y el gasto (Q); por lo tanto, será necesario obtener otra ecuación que contenga a ambas incógnitas para que posteriormente se resuelvan en forma simultánea.

Partiendo de la siguiente ecuación de balance de energía, - tenemos:

$$dP = \rho_m \frac{g}{g_c} dh + \rho_m \frac{f v^2}{2 g_c (D_o - D_i)} dh \quad \dots(7)$$

DONDE:

- P Presión grf/cm²
- ρ_m Densidad de la mezcla gr/cm³
- g Aceleración de la gravedad = 981 cm/seg²
- g_c Constante de conversión de la ley de Newton 981 gr-cm/grf-sec²
- v Velocidad del fluido cm/seg
- D_o Diámetro de agujero cm
- f Factor de fricción de Fanning. adimensional
- h Profundidad cm

Al considerarse homogénea la mezcla gas-sólido en el espacio anular, la siguiente ecuación puede utilizarse para calcular la densidad de dicha mezcla:

$$\rho_m = \rho_f (1 + M_p / M_f) \quad \dots (8)$$

DONDE:

ρ_m Densidad de la mezcla gr/cm³

ρ_f Densidad del fluido gr/cm³

M_p Masa de partículas gr

M_f Masa de fluido gr

La relación M_p/M_f puede calcularse de la siguiente manera:

$$M_p = \rho_p V_p$$

DONDE:

ρ_p Densidad de las partículas gr/cm³

V_p Volumen de partículas cm³

$$V_p = A_a K \quad M_p = \frac{\pi}{4} \rho_p D_a^2 K$$

$$M_f = \rho_f Q$$

$$M_f = s \rho_a Q$$

Sustituyendo valores, tenemos:

$$\frac{M_p}{M_f} = \frac{1727 D_a^2 K}{s Q} \quad \dots (9)$$

DONDE:

D_a Diámetro de agujero cm

K Velocidad de perforación cm/seg

s Densidad relativa del gas (aire=1)

Q Gasto de gas medido a condiciones base cm³/ seg

Reordenando la EC. (7) tenemos:

$$dP = \left[\rho_m \left[\frac{g}{g_c} + \frac{f V}{2 g_c (D_a - D_f)} \right] \right] dh \quad \dots (10)$$

Como este desarrollo esta basado en la ecuación de Weymouth, el factor de fricción es igual A:

$$f = \frac{0.008}{(D_o - D_i)^{1.333}} \quad \dots(11)$$

Sustituyendo (3), (8) y (11) en (10)

$$dP = \left[\frac{SP}{2912.12 T} \left[(1 + M_p/M_f) \frac{g}{gc} \frac{.008 \times .14 Q^2}{2 g (D_o^2 - D_i^2)^2} \frac{T^2}{(D_o - D_i)^{1.333} \rho^2} \right] \right] dh$$

Llamando

$$a = \frac{S}{2912.12 T} (1 + M_p/M_f)$$

$$b = \frac{7.9919 \times 10^{-8} Q^2}{(D_o^2 - D_i^2)^2 (D_o - D_i)^{1.333}}$$

$$dP = \left[\frac{aP}{T} + \frac{bT}{P} \right] dh$$

Multiplicando ambos miembros por T, tenemos:

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

$$dh = \frac{TP dP}{a \left[P + \frac{bT^2}{P} \right]}$$

Multiplicando numerador y denominador por P

$$dh = \frac{TP dP}{a(P^2 + bT^2)}$$

Integrado entre sus respectivos límites:

$$\int_0^h dh = T \int_{P_5}^{P_1} \frac{P dP}{aP^2 + bT^2}$$

Llamando $\mu = aP^2 + bT^2$

$$du = 2aP dP$$

$$h = \frac{T}{2a} \int_{Pc}^{Pf} \frac{P dP}{a(P^2 + bT^2)}$$

$$\frac{2ah}{T} = \ln(aP^2 + bT^2) \Big|_{Pc}^{Pf}$$

$$\frac{2ah}{T} = \ln a (Pf^2 + bT^2) - \ln a (Pc^2 + bT^2)$$

$$\frac{2ah}{T} = \ln \frac{a(Pf^2 + bT^2)}{a(Pc^2 + bT^2)}$$

Despejando Pf

$$Pf = \sqrt{(Pc^2 + bT) e^{2ah/T} \cdot bT} \quad \dots (12)$$

DONDE:

- Pf Presión de fondo grf/cm²
- Pc Presión de descarga grf/cm²
- e Base de los logaritmos 2.71828
- h Profundidad cm
- T Temperatura promedio ok

La ecuación (12) contiene las incógnitas buscadas que son la presión en el fondo del agujero y el gasto por lo tanto se pueden igualar la ecuación (6) y la (12) teniendo de esta manera una sola incógnita que será el gasto de gas medido a condiciones base

$$= \frac{5.48 \times 10^{-3} S O^2 T}{(D_o^2 - D_i^2) v^2} = \sqrt{(Pc^2 + bT^2) e^{2ah/T} \cdot bT^2}$$

Para realizar el cálculo, se utilizará el método de ensaye y error.

MODELO DE MC. CRAY AND COLE.

Con el propósito de determinar la velocidad del flujo ascendente en el fondo del agujero que sea equivalente a una velocidad de flujo de aire en condiciones atmosféricas de V_a , se puede escribir para condiciones atmosféricas de flujo de aire la fórmula de Rittinger para velocidad de deslizamiento, indentificándola con el índice A, y para condiciones en el fondo del agujero, -- identificandolo con el índice B:

$$U_{SA} = C \sqrt{\frac{P_S - P_A}{P_A}} \quad \dots (1)$$

$$U_{SB} = C \sqrt{\frac{P_S - P_B}{P_B}} \quad \dots (2)$$

DANDO:

U_{SA} Velocidad de asentamiento de los recortes en el aire

U_{SB} Velocidad de asentamiento de los cortes en el gas

Medida a condiciones de fondo.

P_S Densidad de los cortes

P_A Densidad del aire, @ c.s.

P_B Densidad del aire, @ c.f.

Si se supone que existe un porcentaje constante de velocidad de asentamiento en ambas condiciones (de fondo y standard), tenemos lo siguiente:

$$\frac{U_{SA}}{U_A} = \frac{U_{SB}}{U_B} \quad \dots (3)$$

U_A Velocidad del aire @ c.b.

U_B Velocidad del aire @ c.f.

De la ecuación (3) se tiene:

$$\frac{U_B}{U_A} = \sqrt{\frac{P_A (P_S - P_B)}{P_B (P_S - P_A)}} \quad \dots (4)$$

Introduciendo las ecuaciones anteriores en las velocidades de deslizamiento tendremos:

$$\frac{U_B}{U_A} = \sqrt{\frac{\rho_A (\rho_S - \rho_B)}{\rho_B (\rho_S - \rho_A)}} \quad \dots (5)$$

Se considera que la densidad del gas o del aire son despreciables en comparación con la de los cortes y entonces la relación se reduce a:

$$\frac{U_B}{U_A} = \sqrt{\frac{\rho_A}{\rho_B}} \quad U_B^2 \rho_B = U_A^2 \rho_A \quad U_B^2 = U_A^2 \frac{\rho_A}{\rho_B} \quad \dots (7)$$

Una relación útil se obtiene haciendo las siguientes sustituciones.

$$U_B = \frac{Q_A \rho_A T_A Z_A}{A_B \rho_B T_A} \quad \dots (8)$$

$$\rho_B = \frac{0.001 \rho_B M_G}{Z_B R T_B} \quad \dots (9)$$

$$\rho_A = \frac{0.001 \rho_A M_A}{R T_A} \quad \dots (10)$$

$$\frac{\rho_A}{\rho_B} = \frac{\rho_A M_A Z_B T_B}{\rho_B M_G T_A} \quad \dots (11)$$

Sustituyendo en (7) y simplificando tenemos:

$$Q_A^2 = U_A^2 A_B^2 \frac{M_A}{M_G} \frac{\rho_B T_A}{\rho_A T_B Z_B} \quad \dots (12)$$

O bien

$$Q_B^2 = \left(\frac{Q_A}{U_A A_B} \right)^4 \left(\frac{S \rho_A T_B Z_B}{T_A} \right)^2 \quad \dots (12)'$$

DONDE:

- QA Gasto de gas en m³/min @ c.b.
- VA Velocidad del aire m/min @ c.b.
- AB Area de la selección transversal de flujo cm²
- PB Presión de fondo del pozo kg/cm² abs.
- TB Temperatura de fondo oR
- ZB Factor de compresibilidad @ c.f.
- S Gravedad específica del gas

Las ecuaciones anteriores dan la cantidad requerida de gas @ c.b. que debe ser circulado para levantar los cortes de perforación. La ecuación (12) se utilizara en sustituciones posteriores en la ecuación del fluido vertical del gas.

La ecuación del flujo vertical del gas se deriva del teorema de Bernoulli escrito en forma diferencial

$$dP + \frac{VdV}{g} + dF + dh = 0 \quad \dots(13)$$

DONDE:

- P Presión gr/cm²
- V Velocidad cm/seg
- F Perdida por fricción cm

La ecuación se desarrolla sustituyendo valores para el peso específico y la velocidad que se obtienen de las leyes del estado gaseoso. La sustitución de la pérdida de flujo por fricción se obtiene de la ecuación de Fanning. La altura de expresa en terminos de un angulo medio de la horizontal para que se puedan considerar pozos inclinados al igual que los verticales. Las sustituciones usadas son:

$$\rho = \frac{PM}{ZRT} (1 + w) \quad \dots(14)$$

DONDE:

$w =$ Peso de los fragmentos de roca
peso del gas fluyente

$$V = \frac{qTPoZ}{AToP} \quad \dots(15)$$

DONDE:

q Gasto de gas medido a c.b. cm³/seg
 A Area de la sección transversal del fluido cm²

$$dV = - \frac{qTPoZ}{AToP} dP \quad \dots(16)$$

$$dF = \frac{2fV^2}{gd} dL = \frac{2f}{gd} \frac{qTPoZ}{AToP^2} dL \quad \dots(17)$$

$$\text{Sen } \theta = \frac{h}{L} \quad h = \text{sen } \theta L$$

Diferenciando

$$dh = \text{sen } \theta dL \quad \dots(18)$$

Sustituyendo (14), (15), (16), (17), y (18) en (B)* tenemos:

$$\int_{P_r}^{P_b} \frac{P dP}{\frac{2fM(1+w)TZ}{gdR} \left(\frac{qPo}{ATo}\right)^2 + \frac{11(1+w)\text{sen } \theta}{ZRT} P^2} = \int_0^L dL$$

Esta es de la forma

$$\int_{P_r}^{P_b} \frac{P dP}{a^n + Bp^2} = \int_{P_r}^{P_b} \frac{dP}{(c + kp^2)p} = \int_0^L dL$$

La solución a la integral es:

$$\frac{1}{2b} \ln \left(\frac{b PB^2 + a''}{b PT^2 + a''} \right) = \frac{1}{2c} \ln \left(\frac{PB^2 (c + kPT^2)}{PT^2 (c + kPB^2)} \right) = L$$

Esta puede arreglarse algebraicamente como:

$$\left(\frac{bPB^2 + a''}{bPT^2 + a''} \right) = e^{2bL} \left(\frac{PB^2 (c + kPT^2)}{PT^2 (c + kPB^2)} \right)^{b/c}$$

El parentesis rectangular del lado derecho es igual a la -
unidad cuando $q=0$ y con un número de Reynolds de 5×10^7 su valor
es cerca de 1.002. Puede por lo tanto eliminarse de la ecuación
para dar:

$$PB^2 = e^{2bL} PT^2 + (e^{2bL} - 1) \frac{a''}{b}$$

Haciendo $2bL = m$ da:

$$PB^2 = e^m PT^2 + (e^m - 1) \frac{a''}{b} \quad \dots(19)$$

La EC. anterior es para flujo ascendente con q considerada
positiva en la dirección dicha. Si q se toma como cantidad posi-
tiva descendente la ecuación puede escribirse, como:

$$PB^2 = e^m PT^2 - (e^m - 1) \frac{a''}{b} \quad \dots(20)$$

DONDE:

PB Presión del fondo del agujero Kg/cm²

PT Presión en la boca del pozo Kg/cm²

e 2.71828

m 2bl

$$= \frac{2(29) Sh (1 + v)}{1544 St}$$

$$= \frac{Sh (1 + v)}{26.62 ZT}$$

S Densidad del gas (aire=1)

$$\frac{a}{b} = \frac{2fL}{gdh} \left(\frac{QPoZT}{ATo} \right)^2$$

Si la longitud se expresa en m y la velocidad del flujo en m³/min, resulta lo siguiente:

$$\frac{a}{b} = \frac{2fL}{3 \times 10^{-10} gdh} \left(\frac{QPoZT}{ATo} \right)^2$$

DONDE:

- f** Factor de fricción de Fanning, adimensional
- L** Longitud del pozo m
- g** Aceleración de la gravedad 981 cm/seg
- d** Diámetro cm
- h** Profundidad vertical del pozo m
- Q** Flujo de gas @ c.b. m³/min.
- Po** Presión base Kg/cm² abs
- To** Temperatura oR
- Z** Factor de compresibilidad
- T** Temperatura del gas fluyente
- A** Area de la sección transversal cm²

Para calcular W

$$W = \frac{\text{peso de la roca}}{\text{peso del gas}}$$

$$\frac{(\text{cm}^3 \text{ roca perf/min}) (\text{peso específico de la roca g/cm}^3)}{(\text{cm}^3 \text{ gas fluy/min}) (\text{peso específico del gas g/cm}^3)}$$

$$= K \frac{SR DH^2}{St Qa}$$

Si se toma como 2.70 la densidad de la roca, entonces

$$w = \frac{(2.7)K DH^2}{St QA}$$

DONDE:

DH Diámetro del agujero perforado cm

\uparrow Velocidad de perforación expresado por cm

La EC. para flujo de gas ascendente puede ahora escribirse como sigue:

$$PB^2 = e^m PT^2 + (e^m - 1) \frac{2fL}{3 \times 10^{-10} gdh} \left(\frac{TZPAQA}{A TA} \right)^2 \dots (21)$$

Pa y Ta se usan para designar las presiones y temperaturas a las cuales se mide Qa. Reordenando la EC (21)

$$\left(\frac{SPA ZB TB}{TA} \right)^2 \frac{QA^4}{(VA^4)} - \frac{(e^m - 1)2fL}{3 \times 10^{-10} gdh} \left(\frac{TZPo}{ATo} \right)^2 QA^2 - e^m PT^2 = 0$$

Por la solución cuadrática

$$QA^2 = \frac{-b' \pm \sqrt{(b')^2 - 4a'c'}}{2a'}$$

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

Escogiendo la solución positiva, la EC. anterior puede expresarse como

$$QA = x [1 + \sqrt{1 + y}]^{1/2}$$

DONDE:

$$x = \sqrt{\frac{b'}{ab'}}$$

$$= \sqrt{\frac{(om - 1) fL \quad ZTA VA^2}{3 \times 10^{-10} \text{gdh} \quad SZBTB}} \quad \dots(21)$$

$$y = 4 \frac{a'c'}{(b')^2}$$

$$y = \frac{e^m}{e^{m-1})^2} \left(\frac{3 \times 10^{-10} \text{gdhS}}{fLVA^2} \right)^2 \frac{ZB^2}{Z^4} \frac{TA^2 TB^2}{T^4} \left(\frac{PT}{PA} \right)^2 \dots(22)$$

MODELO DE A. R. SAPRE-R. J. SCHOEPEL

$$V_s = V - \bar{V} \quad \dots (1)$$

DONDE:

- V_s Velocidad de asentamiento cm/seg
- V Velocidad del aire o gas cm/seg
- \bar{V} Velocidad de los cortes cm/seg

Considerando que la densidad del gas es casi nula en comparación con la de los cortes, tenemos:

$$\rho_s = \rho_g + \rho_s \quad \dots (2)$$

DONDE:

- ρ_s Densidad de los sólidos Gr/cm³
- ρ_g Densidad del gas Gr/cm³

Ademas se sabe que:

$$\rho_g = \frac{PM}{ZRT} \quad \dots (3)$$

Sustituyendo (1) en la ecuación de Rittinger toma la siguiente expresión.

$$V - \bar{V} = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho_g) g d_s}{3 F_d \rho_g}} \quad \dots (4)$$

Se utilizará el subíndice 1 para denotar las condiciones en el punto crítico y el 2 para denotar las condiciones base. Utilizando $Z=0.00203 T$ (correlación para calcular el factor de supercompresibilidad en el rango de presión y temperaturas que se presentan) tenemos:

Como $\bar{V}=0$ cm/seg

$$V_1 = \sqrt{\frac{4 \times 0.00203 T_1 \rho_s g d_s R}{3 F_d \bar{V}_1 M}} \quad \dots (5)$$

Ahora bien, la mas de gas fluyente puede expresarse como:

$$m_g = \rho_{g_1} A_1 V_1 \quad \dots (6)$$

De aqui:

$$V_1 A_1 = \frac{m_g}{\rho_{g_1}} \quad \dots (7)$$

Sustituyendo (7) en (4) tenemos:

$$m_g = A_1 \rho_{g_1} \sqrt{\frac{12 \times 0.00203 T_1 P_s g d_s R}{F_d P_1 M}} \quad \dots (8)$$

Como A_1 es el area anular

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_t^2)$$

D_a Diámetro de agujero cm

D_t Diámetro de tubería cm

Sustituyendo en (8), finalmente se tiene

$$m_g = (D_a^2 - D_t^2) \sqrt{\frac{P_s g d_s P_1 M}{12 \times 0.00203 F_d R T}} \quad \dots (9)$$

DONDE:

D_a Diámetro del agujero cm

D_t Diámetro de tubería cm

ρ_s Densidad de los sólidos Gr/cm³

g Aceleración de la gravedad 981 cm/seg

d_s Diámetro de los sólidos cm

M Peso molecular del gas (aire=29)

F_d Coeficiente de arrastre, adimensional

T Temperatura °R

R Constante universal de los gases

P Presión grf/cm²

m Masa de gas gr/seg

La ecuación anterior permite calcular la masa de gas mínima por unidad de tiempo que se requiere para acarrear una partícula de diámetro crítico d_s . Deberá de notarse que la ecuación contiene 2 incógnitas P . y m_g . Por lo que se requerirá de otra ecuación que contenga ambas incógnitas para poder resolverlas simultáneamente.

Partiendo de la ecuación de Bernoulli en forma diferencial y analizando la fase gaseosa tenemos:

$$V dp + dz + \frac{u du}{g_c} + dI_w + dW_s = 0 \quad \dots (10)$$

Como no se realiza ningún trabajo sobre el aire, el $W_s=0$

$$V dp + dz + \frac{u du}{g_c} + dI_w = 0$$

Considerando un flujo estacionario y que para un flujo compresible la velocidad es constante;

$$V dp + dz + \frac{G^2 V dV}{g_c} + dI_w = 0 \quad \dots (11)$$

Dividiendo entre v^2

$$\frac{dp}{V} + \frac{dz}{V^2} + \frac{G^2 dV}{V g_c} + \frac{dI_w}{V^2} = 0$$

Como

$$I_w = \frac{2FG^2V^2L}{g_c(D_a - D_t)} \quad dI_w = \frac{2FG^2V^2}{g_c(D_a - D_t)} dL$$

$$\frac{1}{V} = \rho_g = \frac{PM}{Z, RT,}$$

Sustituyendo

$$P_g dP + P_g^2 dz + \frac{G^2}{g_c} \frac{dV}{V} + \frac{2FG^2}{g_c(D_u - D_t)} dL = 0$$

Integrando entre los límites superior e inferior (de los hom) bros de los lastrabarena a la superficie).

$$\frac{M}{Z_1 R T_1} \int_{P_1}^{P_2} P dP + \frac{g}{g_c} P_g^2 \int_0^Z dz + \frac{G^2}{g_c} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} + \frac{2FG^2}{g_c(D_u - D_t)} \int_0^L dL$$

$$\frac{M}{2Z_1 R T_1} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{g}{g_c} P_g^2 Z + \frac{G^2}{g_c} \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{2FG^2 L}{g_c(D_u - D_t)} = 0$$

Como

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

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1 Z_2 R T_2}{P_2 Z_1 R T_1} = \frac{Z_2 T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} \quad Z_2 = 1$$

De modo que

$$\frac{M}{2Z_1 R T_1} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{g}{g_c} P_g^2 Z + \frac{G^2}{g_c} \ln \left(\frac{T_2 P_1}{Z_1 T_1 P_2} \right) + \frac{2FG^2 L}{g_c(D_u - D_t)} = 0 \dots (12)$$

Procediendo de igual manera para la fase sólida y definiendo r como la relación de la masa de sólidos que esta siendo acarreada por unidad de masa de aire fluyente, se obtiene:

$$r = \frac{\text{masa de sólido}}{\text{masa de gas}}$$

$$m_s = \frac{\pi}{4} D_u^2 k \rho_s \dots (13)$$

Donde:

k Velocidad de perforación cm/seg

ρ_s Densidad de los sólido gr/cm³

$$r V dp + \frac{r u du}{g_c} + r \frac{g}{g_c} dz + r dL w = 0 \dots (14)$$

Integrando entre sus respectivos límites:

$$rV \int_{P_1}^{P_2} dp + \frac{r}{g_c} \int_{v_1}^{v_2} u du + \frac{r g}{g_c} \int_0^z dz + r dLw = 0$$

$$rV (P_2 - P_1) + \frac{r}{g_c} (v_2^2 - v_1^2) + \frac{r g}{g_c} z + r dLw = 0$$

Factorizando

$$r \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\rho_s} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{g_c} + \frac{g z}{g_c} + dLw \right] = 0 \dots (15)$$

Como se supuso anteriormente, la velocidad de los cortes en el punto crítico es igual a cero; por lo tanto $v_2 = 0$ y en lo que respecta al término de fricción dLw , sus valores se tomarán del estudio hecho por Whrite y Vogt.

Dicho estudio es acerca del mecanismo de flujo turbulento para fluidos, y se encontró que el término equivalente al factor de fricción de Moody para una mezcla gas sólido está dada por:

$$\beta - 1 = A r \left(\frac{D}{d} \right)^2 \left(\frac{\rho}{W} \frac{r}{Re} \right)^k \dots (16)$$

Siendo A y R constantes empíricas que son función del grupo adimensional:

$$\sqrt{\frac{(W - \rho) \rho_g d^3}{2}}$$

DONDE:

- D Diámetro de tubería cm
- d Diámetro de partícula cm
- ρ Densidad del fluido gr/cm³
- W Densidad de los sólidos gr/cm³
- Re Número de Reynolds adimensional

Combinando las ecuaciones (12) y (15) tenemos:

$$\frac{M}{2Z, RT_1} (P_2^2 - P_1^2) + \frac{g}{g_c} \rho_y^2 z + \frac{G^2}{g_c} \ln\left(\frac{T_2 P_1}{z, T_1 P_2}\right) + \frac{2FG^2 L}{g_c (D_u - D_t)}$$

$$+ r \left(\frac{P_2 - P_1}{P_s} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{g_c} + \frac{g}{g_c} z + dLw \right) = 0 \quad \dots (17)$$

Simplificando y sabiendo que $z=L=H$

$$\frac{g}{g_c} (\rho_y + r) H + \frac{rV_2^2}{2g_c} + \frac{r(P_2 - P_1)}{P_s} + \frac{G^2}{g_c} \ln\left(\frac{T_2 P_1}{z, T_1 P_2}\right) + \frac{M(P_2^2 - P_1^2)}{2Z, RT_1} + \frac{2FG^2 H}{g_c (D_u - D_t)} = 0 \quad \dots (18)$$

$$\frac{M(P_2^2 - P_1^2)}{2Z, RT_1} = \frac{g}{g_c} (\rho_y + r) H + \frac{rV_2^2}{2g_c} + \frac{r(P_2 - P_1)}{P_s} + \frac{G^2}{g_c} \ln\left(\frac{T_2 P_1}{z, T_1 P_2}\right) + \frac{2\beta FG^2 H}{g_c (D_u - D_t)} \quad \dots (19)$$

Despejando P_1

$$P_1^2 = \frac{2Z, RT_1}{M} \left[\frac{P_2^2 M}{Z, RT_1} + \frac{g}{g_c} (\rho_y + r) H + \frac{rV_2^2}{2g_c} + \frac{r(P_2 - P_1)}{P_s} + \frac{G^2}{g_c} \ln\left(\frac{T_2}{z, T_1}\right) + \frac{2\beta FG^2 H}{g_c (D_u - D_t)} \right] \quad \dots (20)$$

Finalmente el volumen de gas será

$$V = 60 \frac{mg}{\rho_y}$$

y Medido a condiciones base

$$V_{c.b.} = \frac{V(P_1)(T_2)}{(P_2)(T_1)} \quad \dots (21)$$

El metodo de solución que se emplea es el de ensaye y -- error, en este caso se supone una P y se sustituye en la ecuación (20), de esta manera se calcula otra P ; efectuado esto, se comparan las presiones, si estan dentro de un rango, se procede a calcular m_g y luego el volumen a condiciones base, si no, el valor de la presión calculada se le da a la supuesta y se repite el calculo.

REFERENCIAS

- 1.- R.A. HOOK, L.W. COOPER, B.R. PAYNE. Air, gas and foam drilling. Amoco Production Company. Pag. 1-7
- 2.- Magcobar Division. Air drilling Handbook. Agosto 1976.
- 3.- L. BRODIE PUCH. Uses of air and gas in Rotary Drilling. - Canadian Petroleum. Abril 1971. Pag. 22-23
- 4.- R.A. HOOK, L.W. COOPER, B.R. PAYNE. Amoco's Experience Give right air drilling techniques, The oil and gas journal. Junio 27 1977. Pag. 160-174
- 5.- HOWARD LORENZ. Air mist and foam drilling has world wide - application. World oil Junio 1980. Pag. 187-192
- 6.- RICARDO VALDEZ ALEJANDRO. Perforación con aire en vez de - lodo. Petroleo Internacional Nov. 1977. Pag. 144-145
- 7.- LESTER CHARLES UREN. Perforación a presión reducida. Ingeniería de producción del Petróleo. Pag. 429-433
- 8.- M.D. ROBIE. Design Change Produces Better Tool Joint for air drilling. The oil and gas journal, Junio 20 1977. Pag. 72-74.
- 9.- LUIS URRUTIA R. Perforación con espuma-agua aerada en los yacimientos agotados del campo la Paz, Edo. de Zulia, Venezuela. Maraven S.A.
- 10.- MIKE HILLMAN. Preformed Satabilized Foam. Drill Bit Enero de 1971. Pag. 12,13,16,17.

- 11.- BERNARD HIGGING. Modified stable foam can give. Petroleum International. Pag. 12-16
- 12.- AMIEL DAVID, SULLIVAN S. MARSDEN. The Rheology of Foam. - SPE 2544.
- 13.- JACK A. KRUG. Charts help find volume pressure needed for foam drilling. The oil and gas journal Feb. 7, 1972. Pag. 208-211
- 14.- Desarrollan espuma estable para tareas de perforación y - producción. Petroleo Interamericano, Enero 1967. Pag. 20 23.
- 15.- RAY WILLIAMS. Drilling rate changes when air drilling is switched to mist drilling. Bartlesville Energy Research - Center. Pag. 1-7
- 16.- MARTIN A. KUETZING. Air mist drilling. Drilling DCW, Junio 1981 Pag. 62,64,66,141,143,146
- 17.- Roy A. BOBO. New air/mud system can control los circulation. The oil and gas journal Abril 29 1968. Pag. 64-69
- 18.- ROY A. BOBO. New air/mud system can boost bit performance. The oil and gas journal. Mayo 6 1968. Pag. 114-118.
- 19.- J.N. HOWELL. Air-liquid drilling Fluids. The drilling contractor, Marzo-Abril 1966. Pag. 54
- 20.- ROY A. BOBO. GEORGE S. ORMSBY, R.S. HOCH. Phillips Tests air-mud drilling. The oil and gas journal.

21.- Estudio de Técnica de perforación con aire. IMP Subdirección de Tecnología de la Explotación. División de Perforación. -- Agosto de 1980.

22.- L.W. MURRAY. Parasite Tubing String Solves Lost-Circulation - Problems. Tenneco oil Co. Pag. 17-20