

31
2oja

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



PROBLEMAS EN LA PERFORACION Y TERMINACION
DE POZOS DE AGUA EN EL VALLE DE XICO.

T E S I S

QUE PRESENTA:

CARLOS FERNANDO TAPIA GARCIA.

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO.

MEXICO, D.F.

1992.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice.

	Página.
Capítulo I. Introducción.	1
Capítulo II. Generalidades sobre la perforación de pozos de agua.	3
II.1. Antecedentes.	3
II.2. Equipos de perforación de pozos.	5
II.2.1. Equipo de percusión.	5
II.2.2. Máquina rotatoria.	6
II.2.3. Máquina neumática.	7
II.3. Métodos de perforación de pozos.	8
II.3.1. Perforación a percusión.	8
II.3.2. Perforación a rotación.	20
II.4. Lodos de perforación.	35
II.4.1. Características de un lodo de perforación.	35
II.4.2. Aditivos de los lodos de perforación.	42
II.5. Principios básicos.	48
II.6. Profundidad del pozo.	48
II.7. Tubería de ademe.	49
II.8. Diámetro de la cámara de bombeo.	49
II.9. Longitud de tubería productora.	52
II.10. Aberturas del tubo cedazo.	54
II.11. Diseño del filtro de grava.	56
Capítulo III. Perforación de pozos de agua en el Valle de Xico (Cuenca de México).	59
III.1. Geología regional.	59
III.2. Programa de perforación de pozos en la Cuenca del Valle de México.	63
III.3. Terminación de pozos.	67

	Página.
Capítulo IV. Problemas específicos en la perforación en el Valle de Xico.	74
IV.1. Causas que originan las pérdidas de circulación.	75
IV.2. Tipos de formaciones en las que frecuentemente ocurren pérdidas.	81
IV.3. Técnicas para controlar las pérdidas de circulación de lodo empleadas en la perforación de pozos para explotación de agua.	88
IV.4. Materiales para combatir las pérdidas de circulación.	95
Capítulo V. Conclusiones.	105

CAPITULO I.

INTRODUCCION.

La perforación de pozos profundos para la explotación de agua, se entiende como la horadación del terreno - por medio de máquinas y herramientas mecánicas a profundidades mayores de lbs 30 m, con lo cual se pretende localizar y explotar aguas subterráneas.

En el caso de las aguas subterráneas, la perforación puede tener varias finalidades; el alumbramiento de las mismas con fines de riego, de uso doméstico, abrevadero o industrial.

Actualmente la perforación de pozos para agua ha cobrado gran importancia, ya que existen localidades en gran parte del país donde el abastecimiento de agua es problemático porque no se cuenta con algún río u otro tipo de abastecimiento, además en muchos casos las poblaciones han crecido y junto con ellas sus necesidades de agua, por lo que la perforación se ha convertido indispensable en este tipo de regiones.

La perforación de pozos es el sistema de captación de aguas subterráneas más extendido y, en particular, -

los construidos mediante el empleo de máquinas perforadoras en alguna de sus variedades: perforación a percusión y perforación a rotación.

Ya que la zona en donde se realiza el desarrollo de este trabajo proviene de un ambiente ígneo, los principales problemas que se presentan en la perforación de pozos son debido a las pérdidas de circulación del lodo de perforación, por lo que este trabajo se enfoca a las causas y efectos que lo originan así como a las técnicas y materiales que se emplean para controlarlas.

Capítulo II.

Generalidades sobre la perforación
de pozos de agua.

II.1. Antecedentes.

Desde los primeros albores históricos de la humanidad, se practicaban algunos trabajos de alumbramiento de aguas subterráneas por medio de la construcción de pozos, sin embargo, en el pasado este tipo de trabajos fue demasiado escaso, y sólo cobró gran incremento hasta mediados del siglo pasado, cuando se inventaron y perfeccionaron máquinas y herramientas que permitieron la realización de perforaciones económicas y eficientes.

Gracias al constante progreso tecnológico, durante los últimos cien años, la práctica de perforación de pozos ha venido alejándose cada vez más de su original carácter empírico, hasta convertirse en una auténtica técnica muy especializada que se auxilia de valiosas máquinas y herramientas que en la actualidad nos permiten la exploración, acceso y explotación, aún de acuíferos muy profundos, cuya existencia se ignoraba apenas hace algunas décadas, al grado de que hoy en día la principal limitación que se suele presentar es la derivada del aspecto económico, puesto que en general, en tanto más pro

fundo, más costoso resultará un pozo, no sólo por lo que respecta a la inversión inicial que su perforación significa, sino mayormente, por el costo de su explotación, en virtud de que la inmensa mayoría de las aguas subterráneas tienen que ser bombeadas.

II.2. Equipos de perforación de pozos.

II.2.1. Equipo de percusión.

Este tipo de equipo de perforación, en general está compuesto por la herramienta de perforación que en el extremo inferior lleva montado la barrena o trépano que golpea, fragmenta y mezcla con el lodo que se encuentra en el fondo del pozo que posteriormente es extraído por la cuchara que también recibe el nombre de cubeta.

Principales componentes:

- a) Motor de combustión interna (diesel o gasolina).
- b) Dos malacates, uno enrolla el cable de la herramienta de perforación y otro el de la cuchara.
- c) Una viga tipo balancín que mediante un mecanismo de biela y manivela imparte a la herramienta un movimiento alternativo.
- d) Un mástil, que al estar izado, lleva unas poleas en la parte superior atravesadas por los cables de manobras de perforación y maniobras de limpieza.
- e) El vástago de perforación, formado por la barrena, barrón, tijera o destrabador, montera y el cable de perforación.

(ver figura II.1).

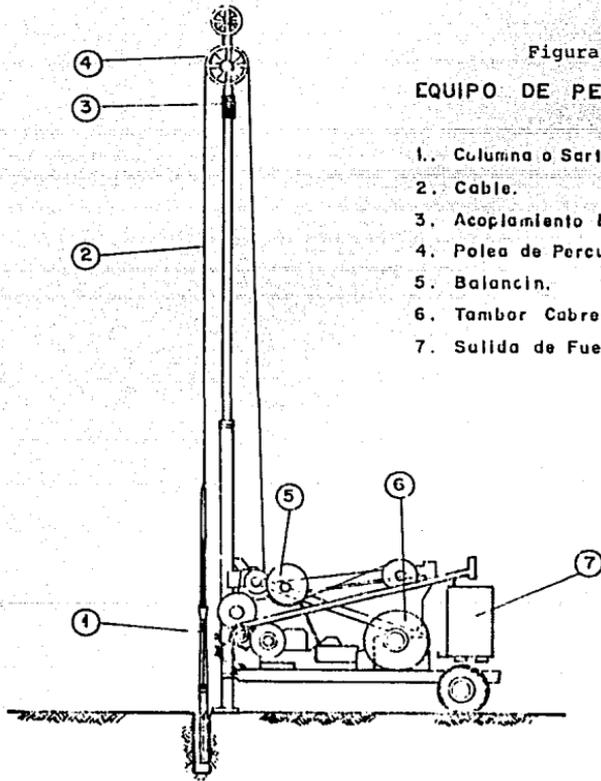


Figura II.1

EQUIPO DE PERCUSIÓN

1. Columna o Sarta de Perforación.
2. Cable.
3. Acoplamiento Elástico.
4. Polea de Percusión.
5. Balancín.
6. Tambor Cabrestante.
7. Salida de Fuerza.

II.2.2. Máquina rotatoria.

Este tipo de equipo de perforación es el que se utiliza con mayor frecuencia en la perforación de pozos, a continuación se mencionan las partes principales de que se compone:

- a) Mástil, el cual sostiene el peso de la tubería y herramienta de perforación.
- b) Mesa rotatoria, la cual se utiliza para transmitir el movimiento rotatorio a la tubería de perforación.
- c) Plataforma, en la cual se instala un malacate con tambores para maniobras de izado de tubería o cualquier objeto pesado.
- d) Equipo de bombeo, que se utiliza para la circulación de lodo de perforación al interior del pozo.
- e) Tubería de perforación, la cual transmite el movimiento giratorio a la barrena así como conductora del fluido de perforación.

(Ver figura II.2.)

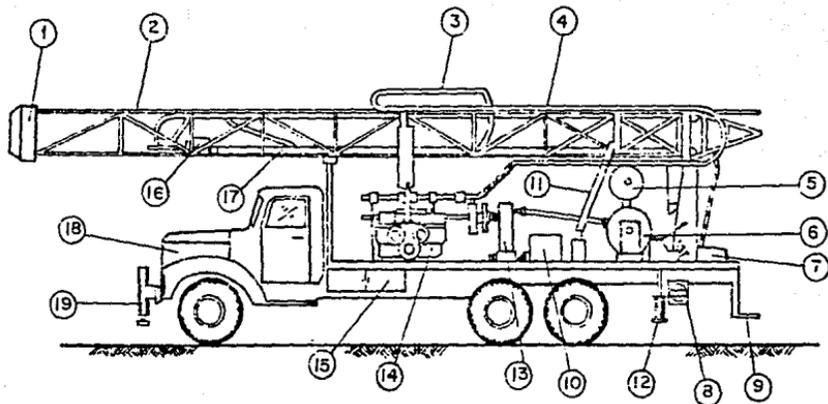


Figura II.2. Equipo rotatorio autotransportado.

- | | | |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1. Corona. | 8. Perno. | 15. Caja de herramientas. |
| 2. Mástil. | 9. Plataforma. | 16. Unión giratoria. |
| 3. Manguera de presión. | 10. Transmisión hidráulica. | 17. Flecha cuadrada. |
| 4. Tubo vertical. | 11. Cilindros hidráulicos. | 18. Motor. |
| 5. Tambor de maniobras. | 12-19. Gatos de soporte. | |
| 6. Tambor de perforación | 13. Caja de transmisión. | |
| 7. Plataforma. | 14. Bomba de lodos. | |

11.2.3. Máquina neumática.

Por lo general, este tipo de equipos de perforación son una adaptación del equipo de perforación rotatorio con un martillo neumático, al cual al inyectar le aire por medio de un compresor, realiza un movimiento recíproco de arriba hacia abajo que aunado al movimiento rotatorio hace que la penetración sea más efectiva en formaciones muy duras.

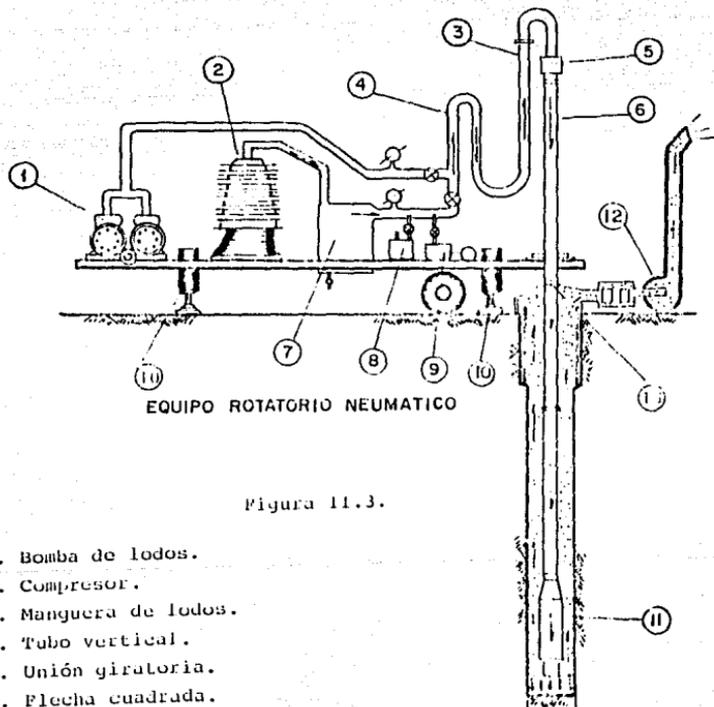
Principales componentes:

En general, son los mismos que los del equipo rotatorio más los siguientes:

- a) Un martillo neumático con insertos de carburo de tungsteno.
- b) Un compresor para inyectar aire.
- c) Una bomba que inyecta un espumante, el cual lubrica y enfría el martillo y levanta el recorte producido.

(Ver figura 11.3.)

7 a



EQUIPO ROTATORIO NEUMATICO

Figura 11.3.

1. Bomba de lodos.
2. Compresor.
3. Manguera de lodos.
4. Tubo vertical.
5. Unión giratoria.
6. Flecha cuadrada.
7. Tanque.
8. Lubricador.
9. Bomba dosificadora de espuma.
10. Gato hidráulico.
11. Martillo.
12. Descarga de polvos.
13. Sello giratorio.

II.3. Métodos de perforación de pozos.

II.3.1. Perforación a percusión.

La perforación a percusión es un método antiquísimo, con este método se realiza la perforación mediante el movimiento recíproco (bajada y subida) de una pesada masa que en su caída va fracturando o disgregando la roca semejante al efecto de un cincel y martillo, desprendiendo de la misma trozos de variado tamaño, que después son extraídos por medio de una cuchara de limpieza.

Los elementos fundamentales que intervienen en la realización de un pozo por el procedimiento de percusión son :

- a) La columna o sarta de perforación.
- b) El cable, que imprime a la sarta el movimiento de subir y bajar que le comunica el balancín de la máquina perforadora.
- c) El equipo de perforación, que desde la superficie del terreno proporciona a la sarta (por medio de un balancín) el movimiento de subir y bajar.

II.3.1.1. Columna o sarta de perforación.

La columna o sarta de perforación está formada de abajo hacia arriba de la siguiente manera:

- A) Barrena. Es la herramienta que realiza el trabajo de

rotura, disgregación y trituración de la roca. Su función en la perforación puede descomponerse en penetrar, triturar, escariar y mezclar.

Sus formas son variadas, para tratar de ajustarse a ellas a determinadas funciones específicas, así pueden citarse:

- Barrena normal (fig.II.4.A)
- Barrena en estrella o cruciforme (fig.II.4.B).
Adecuado para perforar formaciones estratificadas con echado, donde exista una tendencia a producirse desviaciones en la perforación. Con esta barrena cruciforme de longitudes comprendidas entre 1.00 y 1.60 m se obtienen muy buenos resultados en cuanto a rendimiento en cualquier clase de roca, independientemente de su utilidad para minimizar desviaciones.
- Barrena californiana. De hombros escurridos y biselados para evitar atranques en su movimiento hacia arriba.
- Barrena de hombros rectos. Permite golpear hacia arriba o escariar.
- Barrena salomónica. Adecuada para formaciones blandas, con tendencia al desprendimiento, sobre todo si son plásticas, pues las caras del trépano alisan y compactan con su roce las paredes del pozo.

(Ver fig.II.4.C)

En las figuras II.5,II.6 se indican los nombres de las distintas partes de una barrena especialmente ligadas a sus funciones específicas.

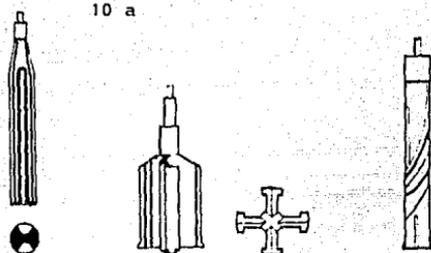
Las características geométricas de una barrena deben ser función de las correspondientes al terreno a perforar.Según la formación de que se trate deben predominar unas u otras funciones de aquel,para que su trabajo de perforación sea óptimo.

Así,para rocas duras,las funciones más importantes son fracturar y escariar, por lo que se elegirán:

1. Barrenas con ángulo de penetración agudo y amplio ángulo de despeje en rocas no abrasivas,como calizas.
2. Angulo de penetración obtuso,amplia superficie de desgaste y poco ángulo de despeje, en rocas duras y abrasivas como el granito.

Por el contrario,para rocas blandas,como pizarras,--margas,y en general rocas arcillosas,la función principal es la mezcladora,por lo que se elegirán barrenas con poco ángulo de penetración,amplio ángulo de despeje,gran superficie de trituración y pequeña sección del cuerpo de barrena ,para que los pasos de agua sean grandes.

Los diámetro de las barrenas para perforación con ca



a. Barrena normal tipo californiano. b. Barrena cruciforme. c. Barrena salomónica.

Figura II.4. Diversos tipos de barrenas.

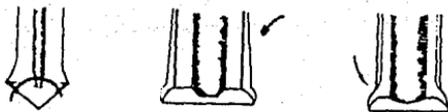


Figura II.5. Partes de la porción inferior de la barrena.

1. Superficie de trituración.
2. Borde de esca-riador,
3. Pasos de agua.

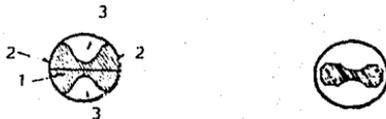


Figura II.6 Aspesto del barreno en sección y visto por debajo.

ble no están tan normalizados como las herramientas para perforación a rotación (coronas y triconos). Aunque los barrenos están sujetos a fácil variación de su diámetro original los diámetros más comunes son:

580 - 590 mm para entubar con 500 mm.

480 - 490 mm para entubar con 400 mm.

380 - 390 mm para entubar con 300 mm.

300 - 310 mm para entubar con 250 mm.

250 - 260 mm para entubar con 200 mm.

200 - 210 mm para entubar con 150 mm.

Principalmente el material con que se fabrican estos barrenos son acero al carbón, aceros de aleación y aceros al crisol.

B) Barrón. Inmediatamente arriba del barreno y enroscado a él, se coloca una barra cilíndrica (fig. II.7.A) de acero forjado, cuya función consiste en dotar a la sarta del peso necesario para la perforación, y en servir de guía, debido a su longitud, colaborando de forma importante al mantenimiento recto y vertical de la perforación. La longitud del barrón de perforación varía normalmente entre 3 y 5 m y su peso entre 400 y 1000 kg.

- C) Destrabador o tijera. Roscada al barrón va esta herramienta (fig. II.7.B) que constituye un elemento de seguridad ante posibles atascamientos de la barrena.

Los dos eslabones de que consta permiten un juego longitudinal, de unos 20 ó 30 cm, gracias al cual se puede golpear hacia arriba, mediante tirones de cable y utilizar la masa de éste, de la montera y de la parte superior de la tijera.

En terrenos conocidos, duros y coherentes, donde -- por experiencia anterior se sepa que no hay peligro de desprendimientos, puede prescindirse del uso de esta herramienta. Por el contrario, y aunque disminuya -- algo el rendimiento en terrenos deleznable o propensos a desprendimientos, y en aquellos en que falte la experiencia de perforaciones anteriores, es medida de elemental prudencia usar el destrabador.

- D) Montera. Es el elemento colocado en la parte superior de la sarta y sirve para unirla al cable (fig. II.8). Esta unión se hace mediante un "Bul'on" que se aloja en el interior de la montera propiamente dicha.

Esta unión es uno de los puntos débiles en el conjunto sarta-cable, por lo que debe revisarse cada 50 horas de trabajo aproximadamente.

Otro de los puntos débiles de la sarta son las u-

12 a

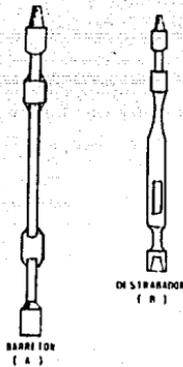


Figura II.7. Barrón y destrabador (tijera) de la sarta de perforación a percusión.



Figura II.8. Montera con su bulón de sujeción.

niones roscadas de cada uno de los elementos o herramientas que la componen. La correcta elección de estas roscas de unión tiene gran importancia, por lo que han sido normalizadas por el American Petroleum Institute (A.P.I.) como puede verse en la tabla II.1 señalándose en la figura II.9 las diferentes partes aludidas.

II.3.1.2. Cable.

El segundo elemento que interviene en la realización de un pozo a percusión es el cable de perforación, del que pende la sarta y por medio del cual se comunica a ésta el movimiento de vaivén, que a su vez le transmite el balancin del equipo.

Este cable está sometido a un duro trabajo debido principalmente a las tensiones alternantes que se producen al elevar y soltar la herramienta, así como por las continuas sacudidas al tensar.

También es importante el desgaste producido por el continuo contacto con el agua y lodo, debido a las partículas abrasivas que contienen, que desgastan los alambres del cable; así mismo, pero con mayor intensidad, ocurre al rozar el cable con las paredes del pozo. Un factor que produce fatiga en el cable es el continuo enrollamiento y desenrollamiento en el tam

Tabla II.1. Normalización A.P.I. para las juntas de las herramientas para perforación a percusión. Dimensiones en pulgadas. Ver figura II.9 para las diferentes partes.

Diámetro de la perforación	Diámetro nominal de la junta A x B	No. de hilos rosca por pg.	Longitud del macho C	Tamaño del cuadrado D	Diámetro del cuello macho E
3 a 3½	1 1/8 x 1 3/4	8	2½	1 3/4	2½
4 a 4½	1½ x 2 1/4	8	3	2½	3 1/8
4½ a 5	1 5/8 x 2 5/8	7	3½	2 3/4	3 5/8
6 a 6½	2½ x 3½	7	4	3½	4½
8½ y mayor	3 x 4	7	4 3/4	4½	6
10 y mayor	4 x 5	7	5½	5½	7
12 y mayor	4½ x 6	7	7	6	8½



Figura II.9. Juntas de las herramientas para perforación apercusión.

bor del cabrestante en las operaciones de extracción e introducción de la sarta. Para soportar estos esfuerzos, el cable debe reunir características adecuadas, tales como suficiente resistencia a la tensión, flexibilidad y resistencia al desgaste por abrasión.

Los cables más usados, que cumplen razonablemente estas condiciones, son los del tipo SEALE, de acero sin galvanizar, con alma de cáñamo o polivinilo de composición $6 \times 19 + 1$ (6 cables torcidos, de 19 hilos cada uno, más el alma), arrolamiento cruzado, con una resistencia a la tensión de 16,000 a 18,000 kg/cm^2 (fig. II.10).

La torsión de estos cables debe ser a la izquierda, para que al ponerse en tensión y producirse el descableado y girar, lo hagan de izquierda a derecha, o sea en el sentido de apretar las roscas de la herramienta que componen la sarta.

En base a la experiencia obtenida en campo para la utilización óptima de un cable, existe un diámetro mínimo del tambor en que debe enrollarse y de las poleas que deben guiarlo. A estos efectos es conveniente seguir los consejos dados por el fabricante para su conservación, manipulación y engrase.

En forma general se recomienda que los tambores y las poleas tengan aproximadamente el diámetro que co

responda con arreglo a lo indicado en la tabla II.2

En la tabla II.3 se indican las dimensiones de -- los cables más usados en perforación a percusión, el tipo de rosca adecuado y la resistencia correspondiente. Comúnmente los diámetros de cables para perforar pozos para agua son de 5/8 y 3/4".

II.3.1.3. Equipo o máquina de perforación.

Por último, el tercer elemento que interviene en la perforación a percusión es la máquina de perforación.

Las funciones principales que esta máquina perforadora tiene que realizar son: mover la sarta de perforación, colocar las tuberías de revestimiento y extraer los detritus producidos por la barrena.

Diversos son los elementos utilizados para el movimiento de la sarta. Sin embargo, por ser con el que vienen dotados casi de forma exclusiva las máquinas, se describirá solamente el denominado balancín.

El balancín recibe su movimiento oscilante por medio de un mecanismo de biela y manivela (fig. II.11). La manivela va unida a un engrane de diámetro grande, que engrana con uno de diámetro más pequeño solidario al eje central del equipo, que recibe el movimiento directamente del motor por medio de una transmisión.

Tabla II. 2. Diámetros de tambores y poleas adecuados según tipo de cable.

Cable	Diámetro tambor o polea
6 x 7	42 veces \varnothing cable
6 x 19	30 veces \varnothing cable
6 x 37	18 veces \varnothing cable
8 x 19	21 veces \varnothing cable
8 x 7	34 veces \varnothing cable

Tabla II. 3. Dimensiones de cables de perforación.

Diámetro del cable (pg)	Dimensiones de la junta (pulgadas) hilos/pg	Peso de la sarta en kg	
5/8	1 1/2 x 2 1/4	8 API	hasta 700
5/8 ó 3/4	1 5/8 x 2 5/8	7 API	de 700 hasta 1200
5/8 ó 3/4	2 x 3	7 API	de 700 hasta 1200
5/8 ó 3/4	2 1/4 x 3 1/4	7 API	de 700 hasta 1200
3/4 ó 7/8	2 3/4 x 3 3/4	7 API	de 1200 hasta 1800
3/4, 7/8 ó 1	3 1/4 x 4 1/4	7 API	de 1200 hasta 4000
7/8, 1 ó 1 1/8	4 x 5	7 API	de 1800 hasta más de 4000

Un tambor, movido por cadena a través del eje central sujeta el cable de perforación, que pasa por las dos poleas indicada en la figura II.11. Cuando el tambor del cable brestante está frenado y por lo tanto sujeto al cable, el extremo libre de éste (del que pende la sarta) queda sometido a un movimiento de bajada y subida al oscilar el balancín, produciendose de esta manera el trabajo de la herramienta de perforación. A medida que esta avanza, se va dejando salir más longitud del cable enrollado en el tambor.

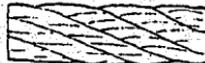
La altura de caída del barreno se regula alargando o acortando la longitud de la manivela, para lo cual tiene varios puntos donde acoplar en ella la biela. También, regulando la velocidad del motor se regula la del balancín, hasta conseguir que la caída de la herramienta sea libre (dentro del agua o lodo de perforación), sin que quede frenada por la polea del balancín, obteniendose con esa velocidad el mayor rendimiento de la perforación.

La polea del cable de perforación colocada en la cima del mástil, va sobre un dispositivo amortiguador, formado por un conjunto elástico de discos alternantes de goma y acero, cuya misión es aumentar la elasticidad del cable de perforación y evitar vibraciones a la torre de la máquina y a esta misma.

16 a



6 x 19 + 1 SEALE torsión izquierda



6 x 7 + 1 Normal



Figura II.10. Cables para perforación a percusión.

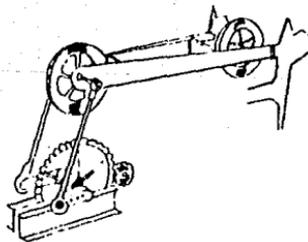


Figura II.11. Mecanismo del balancín de una máquina de perforación a percusión.

Para la extracción de los detritus producidos por el barreno, se dispone de una segunda línea de cable con su cabrestante, que permite la rápida introducción y extracción de una cuchara de limpieza.

Los diámetros más usados para cable de limpieza, con indicación de los pesos recomendados en su trabajo, vienen dados en la tabla II A.

El tipo de cable más comunmente usado para la limpieza es el de acero sin galvanizar en composición 6 x 7 + 1 normal, con una resistencia a la tensión de 14,000 a -- 16,000 kg/cm².

Las cucharas que se utilizan para extracción del detritus de la perforación son, en esencia, unos tramos de tubería terminados en su parte inferior en una válvula que puede ser plana o de dardo.

La plana, llamada también de charnela, es la más utilizada para la extracción del detritus y hace mejor la -- limpieza del fondo del pozo (fig. II 12).

Las dimensiones de las cucharas de limpieza deben -- ser, en cuanto a su diámetro, muy próximas al de la perforación (sólo tres o cuatro centímetros menos), y en cuanto a su longitud, relativamente largas de 3 m, para poder conseguir volúmenes apreciables de detritus.

En cuanto a la función de colocar tubería de revestimiento, la cumplen por medio de un tercer cabrestante, --

17 a



Figura II.12. Cuchara de limpieza
tipo charnela.

con otra polea en la torre y una tercera línea de cable. El cabrestante y polea para entubación son normales y el cable debe ser del tipo antigiratorio, para la correcta colocación de las tuberías.

Su composición, 18 x 7 + 1, alma de cáñamo, preformado antigiratorio con arrollamiento cruzado, torsión a derecha y fabricado con alambres sin galvanizar, con una resistencia a la tensión de 14,000 a 16,000 kg/cm².

Los diámetros más usados para este tipo de cables son indicados en la tabla II.5.

En el trabajo de perforación a percusión pueden distinguirse dos tipos de terreno fundamentales que condicionan, por lo menos parcialmente, el procedimiento a seguir.

En formaciones rocosas consolidadas, la perforación puede hacerse sin necesidad de que siga inmediatamente al avance el revestimiento, y en algunos casos puede prescindirse definitivamente de éste. Por el contrario, en formaciones no coherentes, o poco consolidadas o arcillosas, es preciso que el revestimiento de las paredes del pozo con tubería de acero, siga, en general muy de cerca, al avance de la perforación.

Con respecto al avance en la profundidad de la perforación de un pozo, ésta se encuentra condicionada por los siguientes factores:

Tabla II.4. Dimensiones de cables para limpieza.

Diámetro (pg)	Resistencia (kg)	Peso reco mendado (kg)
5/16	2800	560
3/8	4000	800
7/16	5400	1100
1/2	7000	1400
9/16	8800	1750

Tabla II.5. Dimensiones de cables de entubación.

Diámetro (pg)	Resistencia (kg)	Peso reco mendado (kg)
5/8	12000	2400
3/4	17000	3400
7/8	23000	4600

- La resistencia de la roca.
- El peso de la sarta de perforación.
- La altura de caída de la misma.
- El diámetro del trépano.
- El número de golpes por minuto.
- La calidad y densidad del lodo de perforación.

Con respecto al número de golpes por minuto, una ca--
dencia normal de golpeo en la perforación es de 45 a 50
golpes por minuto, sin quitarle mérito a la habilidad -
del perforador.

II.3.2. Perforación a rotación.

El procedimiento de perforación a rotación - con circulación directa, comenzó a utilizarse en 1900, - adquiriendo gran auge en la perforación de pozos desde 1910, paralelamente al desarrollo de la industria petrolera.

En la perforación de pozos para agua se aprovechan los conocimientos y técnicas que se utilizan en la perforación de pozos petroleros, pero con las lógicas simplificaciones de todo orden que se derivan de su menor profundidad y del tipo de fluido a extraer.

La perforación a rotación se realiza mediante el giro de una herramienta de corte, que es impulsada por la columna o sarta de perforación. El giro que la sarta de perforación transmite a la herramienta de corte o barrenadora se lo proporciona, desde la superficie del terreno, una mesa de rotación que es parte integrante de la máquina de perforar. El recorte de la roca producido en el avance es extraído a la superficie por medio de un lodo, que es impulsado por una bomba, circula por el interior de la sarta de perforación, para retornar al exterior, arrastrando el recorte por el espacio anular existente entre la sarta y la pared del pozo (fig. --- II.13).

Los elementos fundamentales que intervienen en la -

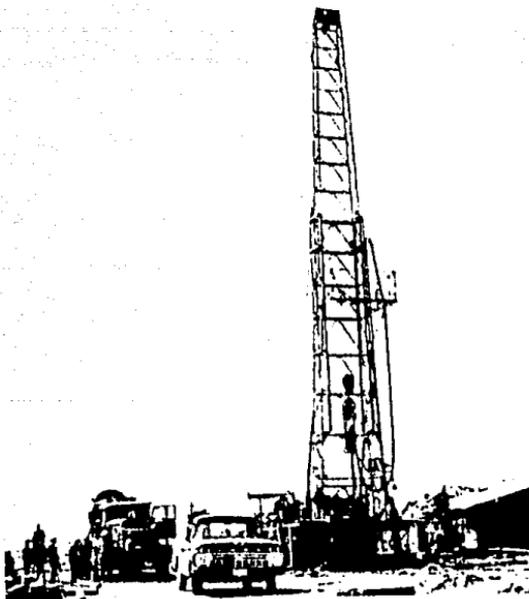


Figura II.13. Equipo de perforación a rotación con circulación directa.

realización de un pozo a rotación son:

- a) La columna o sarta de perforación.
- b) Máquina de perforación. Desde la superficie del terreno, proporciona a la sarta el movimiento de giro y -- avance que se transmite a la barrena.
- c) El fluido de perforación. En general, es un lodo bentonítico, con ciertos aditivos para adecuar sus características físicas a las necesidades de la perforación

II.3.2.1. Columna o sarta de perforación.

La columna o sarta de perforación está formada por una serie de elementos cuya disposición de abajo hacia arriba es la siguiente:

1. Barrena.
2. Porta barrena.
3. Tubería lastrabarrena.
4. Reducción de roscas de tubería lastrabarrena a tubería de perforación.
5. Tubería de perforación.
6. Acoplamiento de roscas de tubería de perforación a barretón cuadrado.
7. Barretón cuadrado (flecha o kelly).
8. Unión giratoria.

1. Barrena.

Es el elemento que está en contacto directo con el terreno, que al girar produce la rotura y disgregación del mismo en partículas pequeñas, que deben ser arrastradas a la superficie por la circulación del lodo de perforación.

Las barrenas son herramientas de corte formadas por un cuerpo fijo para unirlo a la sarta de perforación -- por medio de rosca y para soportar a los conos (fig. -- II.14).

La parte fija o cuerpo de la barrena tiene interiormente unos orificios para la circulación del lodo de perforación, dispuestos de forma tal para limpiar eficazmente el fondo del pozo.

Los conos son elementos dentados de acero, diseñados y contruidos para perforar en condiciones óptimas cada clase de terreno.

Puede establecerse que para terrenos blandos las barrenas tienen pocos dientes y largos, aumentando su número y disminuyendo su longitud a medida que aumenta la dureza del terreno, lo cual va acompañado de una mayor dureza en el acero para hacerlo más resistente al desgaste, así mismo, el ángulo de los dientes es agudo para formaciones suaves y obtuso para formaciones duras, semejjandose la acción de ataque a la de un zapapico y a la de un cincel golpeado por un martillo, respectivamente.



A. BARRENA DE DIENTES
DE ACERO



B. BARRENA CON INSERTOS
DE CARBURO DE TUNGSTENO

Figura II.14. Barrenas.

Cada fabricante tiene sus diseños y calidades, pero todas dentro de las normas del International Association Drilling Contractors (I.A.D.C.).

En la tabla IJ6 se exponen en forma resumida los tipos de barrena de cada fabricante, con una indicación somera de la dureza de la roca en la que su empleo es óptimo.

Con el fin de orientar, pueden considerarse comprendidas en cada orden de dureza las rocas siguientes:

- Muy blando: formaciones blandas (pizarras arcillosas margas, lutitas, caliza blanda), formaciones no consolidadas.
- Blando: formaciones de dureza blanda o media (las anteriores más duras).
- Medio: formaciones de dureza media (pizarras duras, calizas duras, dolomías). Formaciones algo abrasivas de dureza media (pizarras sílicas, esquistos, areniscas, caliza duras, dolomías).
- Duro: formaciones análogas a las anteriores, más silicificadas y más duras, incluyendo también cuarcitas y granitos.
- Muy duro y abrasivo: formaciones muy duras y abrasivas tales como las areniscas, cuarcitas, basaltos, etc.

CODIGO IADC	SMITH			HUGHES			REED		
	STD (1)	"M" GAGE (2)	INSERT (3)	STD (1)	"M" GAGE (2)	INSERT (3)	STD (1)	"M" GAGE (2)	INSERT (3)
1-1-	DS			OSC3A			Y11		
1-2-	DT	DTT		OSC3			Y12		
1-3-	DG	DGT	DGH	OSC1G	C1G	ODG	Y13	Y13T	Y13G
2-1-	V1		V1H	OW4		ODV	Y21		Y21G
	V2		V2H	OWV					
2-3-	T2		T2H	OWC			Y23		Y23G
3-1-	L4		L4H	W7		WD7	Y31		Y31G

Tabla II. 6. Clasificación y equivalencia de las barrenas.

En cuanto a los diámetros, también existen las normas A.P.I. y son los indicados en la tabla II.7, si bien no todas las casas fabrican todos los diámetros ni la misma casa todos los tipos.

Cada barrena requiere, para trabajar en condiciones óptimas, un peso y una velocidad adecuados. La elección de estos dos parámetros intervienen fundamentalmente el diámetro de la barrena y la dureza de los terrenos a perforar.

En forma experimental puede establecerse que el peso debe ser proporcional al diámetro y a la dureza de la formación. Como regla general, para formaciones intermedias, puede tomarse el que resulte a razón de 1000 kg por pulgada de diámetro. El peso aproximado se conseguirá disminuyéndolo para formaciones blandas y aumentándolo para las duras siempre observando el comportamiento en el aumento o disminución en la velocidad de penetración.

La velocidad de rotación debe ser menor cuanto mayor es el diámetro de la barrena y mayor la dureza de la formación, estando también aquella ligada en el mismo sentido con el peso sobre la barrena. Es decir, a mayor peso, menor velocidad.

Un complemento de las barrenas son los ensanchadores (fig. II.15), herramientas de corte que sirven para -

24 a

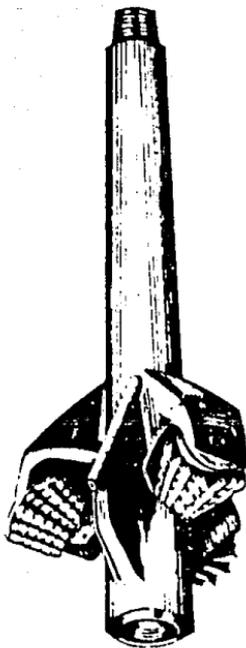


Figura II.15. Ensanchador.

aumentar el diámetro de una perforación ya efectuada.

Costan, como las barrenas, de un cuerpo fijo que me diante rosca se une a la sarta de perforación y que so porta en su extremo final una barrena, también rosca da, que hace de piloto en el avance, y lateralmente -- tres o más rodillos, también móviles, que son los que realizan el trabajo de ensanche.

El empleo de ensanchadores es en tanto más necesari o cuanto mayor es el diámetro perseguido en la perforación y menor el par de torsión en la máquina perforadora, salvo con máquinas más potentes, difícilmente puede perforarse de una sola vez, sobre todo a partir de ciertas profundidades, con diámetros superiores a ---- $12\frac{1}{4}$ " por lo que es preciso recurrir a uno o varios ensanches una vez perforado previamente con el mayor diámetro adecuado a la máquina empleada y al terreno a -- atravesar.

Una orientación a este respecto puede darla la tabla II.8 donde se indican el diámetro de perforación -- previos y los sucesivos ensanches para llegar hasta -- 20" en función de las profundidades a alcanzar.

Finalmente, a las herramientas de corte de rodillos móviles se pueden añadir los escariadores, que sirven para mantener y perfilar el diámetro de una perforación. Su empleo es en general muy conveniente antes de proceder a realizar las operaciones de ademe en una --

Tabla II.7. Diámetros normalizados de las barrenas (A.P.I.).

Roscas	Diámetros en pulgadas					
2 3/8 regular	3 3/4	3 7/8	4 1/8	4 1/4	4 1/2	
3 1/2 regular	4 5/8	4 3/4	4 7/8	5 5/8	5 3/4	6
4 1/2 regular	7 5/8	7 7/8	8 3/8	8 1/2	8 5/8	9
6 5/8 regular	11	12 1/4	13 3/4			

Tabla II.8. Ensanches máximos (catalogo Reed) en pulgadas.

Para pozo de 7 7/8 ensanche máximo a 12 1/4	
"	" 9 " " 13 3/4
"	" 9 5/8 " " 17 1/2
"	" 12 " " 20
"	" 20 " " 28

perforación. Al igual que las barrenas y ensanchadores están formados por un cuerpo fijo y unos rodillos móviles que están dispuestos lateralmente, alrededor del cuerpo, normalmente en número de tres (fig. II.16).

En la tabla II.9. se da una relación de escariadores de uso normal.

2. Lastrabarrenas.

Son tuberías de acero de pared muy gruesa, cuyo objetivo principal es proporcionarle peso a la barrena, haciéndole que trabaje en las condiciones más adecuadas para que su avance sea el óptimo en cada clase de terreno. Se colocan inmediatamente encima de la barrena. Colaboran también en el mantenimiento de la verticalidad del pozo y por bajar el centro de gravedad de la sarta de perforación, con lo cual ésta trabaja extendida en vez de comprimida evitando así la tendencia de desviarse cuando la tubería de perforación se pandea al llegar a comprimirse.

La tubería lastrabarrena está construida con acero de alta calidad y debe responder a las especificaciones A.P.I. Puede ser toda la pieza del mismo material o por el contrario, estar formados por una barra central y dos extremos soldados de acero de superior calidad, maquinados con las roscas macho y hembra corres-

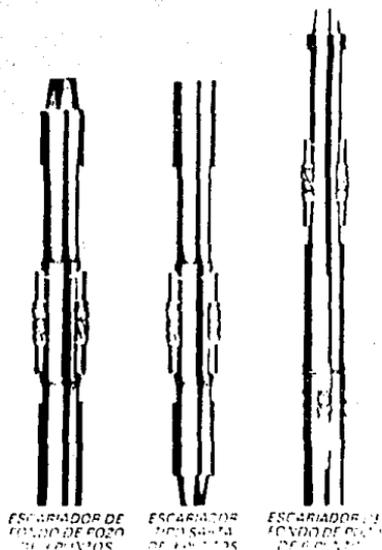


Figura II.16. Escariadores.

pondientes.

Debe de utilizarse tubería lastrabarrena del mayor diámetro compatible con el de la perforación, de esta forma disminuye el pandeo y la fatiga del material.

La tubería lastrabarrena más común es la de sección circular, si bien las hay también de sección cuadrada y otras de forma helicoidal (Fig. II. 17).

En cuanto a su longitud lo normal es que sean de 6 m y hasta de 3 m, por no tener algunas máquinas capacidad ni en altura de la torre ni en el malacate.

El material empleado en la fabricación de la tubería lastrabarrena es de acero de aleación al cromo-molibdeno.

3. Tubería de perforación.

Son tuberías de acero de pared delgada en comparación con la tubería lastrabarrena, roscadas en los extremos por donde se unen unas a otras, y tienen tres objetivos fundamentales:

- Suspender a la barrena y tubería lastrabarrena.
- Transmitir el movimiento de giro que le proporciona la mesa rotatoria a la barrena.
- Conducir por su interior el fluido de perforación.

Este tipo de tubería debe trabajar a tensión. Es con

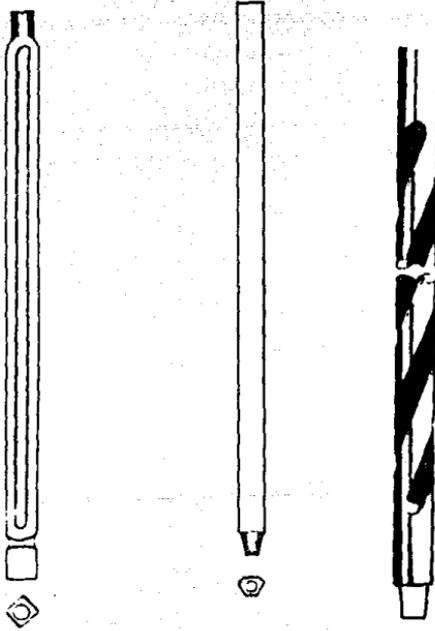


Figura II.17. Lastrabarrenas.

veniente saber, para el diseño de la sarta de perforación a emplear, que el punto neutro debe estar siempre dentro de los lastrabarrenas, ya que son más resistentes, y no dentro de la tubería de perforación, elemento más debil. El punto neutro es donde cambian los esfuerzos de tensión a compresión, teniendo en cuenta el empuje del lodo, que quita peso a los lastrabarrenas.

Suele considerarse de forma aproximada un peso efectivo de 0.85 del peso sin sumergir, empleando lodos con un peso específico cercano a 1.10 g/cm^3 .

La calidad del acero de las tuberías de perforación están especificadas en las normas A.P.I., estando establecidos dos grados para pozos de agua, denominados D y E según se expone en la tabla II.10.

Uno de los tipos de tubería de perforación que se utilizan en la perforación son las denominadas de recalcadura externa (external upset), según que la recalcadura en las uniones (tool joint) la tenga hacia fuera o hacia dentro.

Las más usadas en la perforación de pozos para agua tienen diámetros de $2 \frac{7}{8}$ y $3 \frac{1}{2}$ ", preferentemente el primero. Las características de esta tubería y de sus inmediatos más próximos se exponen en la tabla II.10.

La longitud más común de la tubería de perforación es de 6.10 m (20 pie).

Tabla II.9. Diámetro de escariadores (pulgadas)

Para pozo de ϕ	Escariador	
	ϕ mínimo	ϕ máximo
5 5/8	5 1/2	5 7/8
6 a 6 1/4	6 1/8	6 1/4
7 1/2 a 7 7/8	7 1/4	7 7/8
8 3/8 a 8 5/8	8 1/4	8 5/8
8 3/4 a 9	8 3/4	9 1/4
10 5/8 a 11	10 1/2	11
12 1/4	11 3/4	12 3/4
13 3/4	13 1/4	14
15	15	16
22 a 24	21 3/4	24
26	24 1/2	27 3/8

Tabla II.10. Características de aceros para tubería de perforación según las normas API.

Características	Grado D	Grado E
Límite elástico, kg/cm ²	38,700	52,700
Carga de rotura, kg/cm ²	66,800	70,300
Alargamiento %	1.8	1.8

La unión entre tuberías se hace por medio de juntas roscadas (tool joint), existen tres tipos de uniones - denominados REG, FHE, IF (regular, full-hole e internal flush), cuyas características pueden verse en la figura II.18 que corresponden a especificaciones A.P.I. En la técnica de perforación de pozos para agua, se emplea preferentemente el del tipo internal flush.

4. Barretón cuadrado (flecha o kelly).

Del barretón cuadrado, llamado también flecha o kelly, pende toda la sarta de perforación y su función es transmitir el giro que le proporciona la mesa rotatoria a la tubería de perforación, permitir su ascenso y, sobre todo, el descenso al estar girando, así como conducir por su interior el lodo de perforación que ha de circular por toda la sarta de perforación.

En su extremo superior va roscada la cabeza giratoria de circulación que a su vez sirve para suspender toda la sarta de perforación. En su extremo inferior es donde se rosca la primera tubería de perforación de la sarta, lo cual se hace inetrponiendo un acoplamiento, conocido en campo como substituto, que es el que sufre el desgaste de todas las maniobras de roscado cada vez que se añade un nuevo tubo de perforación a la sarta, impidiendo el deterioro del propio barretón cuadrado, que es un elemento costoso (fig. II.19).

TUBERIA DE PERFORACION GRADO E
DE PESO ESTANDAR

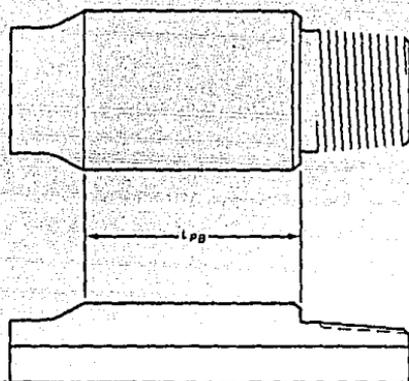


Figura No. 48

TUBERIA DE PERFORACION
GRADO E DE PARED GRUESA

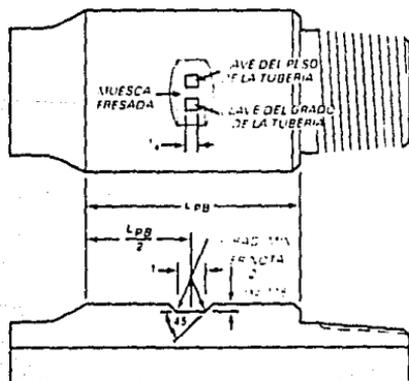


Figura II.18. Uniones de tubería de perforación

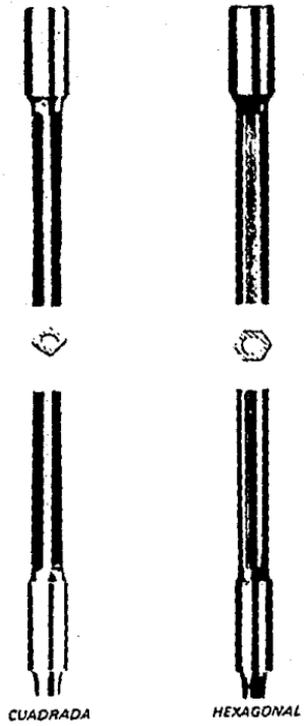


Figura II.19. Barras Kelly.

5. Cabezal giratorio.

Es una pieza (fig. I120) cuya triple misión consiste en:

- Suspender la sarta durante el trabajo de perforación.
- Permitir al mismo tiempo el giro de la tubería de perforación.
- Hacer posible el paso del fluido de perforación desde la manguera de descarga de la bomba hasta la sarta de perforación mientras ésta está girando y avanzando.

Para que esta pieza pueda suspender y al mismo tiempo permitir el giro de la tubería de perforación, está compuesta de dos partes: una superior sujeta al gancho de la polea viajera y otra inferior roscada al barretón cuadrado, que pueden girar independientemente merced a unos rodamientos de bolas o rodillos que han de ser de gran capacidad de resistencia al empuje axial (o vertical), ya que de él pende toda la sarta de perforación que puede ser fácilmente de hasta 80 toneladas en pozos para agua.

Como la cabeza giratoria de circulación y suspensión tiene que permitir, mientras la columna gira, el paso del fluido de perforación, la unión de las dos partes indicadas tiene que ser hermética, por lo que van dotadas de una junta hermética de caucho, fibra sintética o similar, de gran calidad, toda vez que a la presión que trabaja el

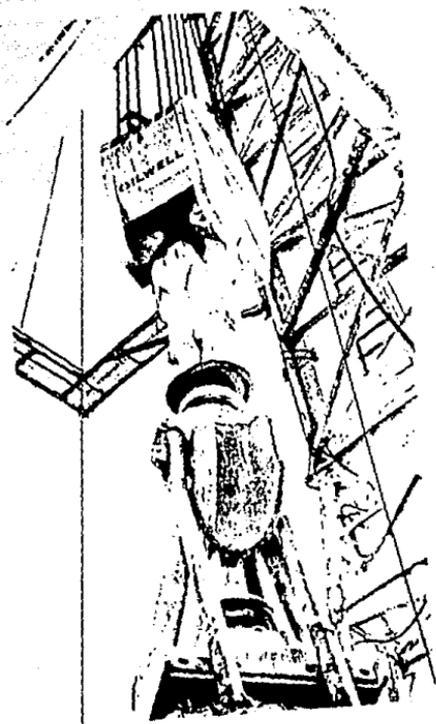


Figura II.20. Cabeza giratoria.

circuito de lodos (normalmente de unos 20 kg/cm^2 pudiendo llegar en algunos momentos o situaciones a 30 kg/cm^2) no de ha de producir fugas del fluido que salgan al exterior o dañen a los cojinetes por su alto poder de abrasión.

II.3.2.2. Máquina de perforación.

La sarta o columna de perforación es movida desde la superficie del terreno por la máquina perforadora o de perforación (fig.II21).

La máquina perforadora debe estar equipada con los elementos necesarios para cumplir las siguientes funciones:

1. Hacer girar y permitir el avance de la sarta de perforación.
2. Introducir, suspender y extraer la columna de perforación.
3. Impulsar el fluido de perforación a través de la sarta o columna de perforación para extraer la roca ya fragmentada en su retorno.
4. Instalar e introducir las tuberías de revestimiento.

Para realizar la primera función, la máquina de perforación debe estar dotada de una mesa rotatoria (fig.II22) por cuyo interior pasa el barretón cuadrado o kelly, que

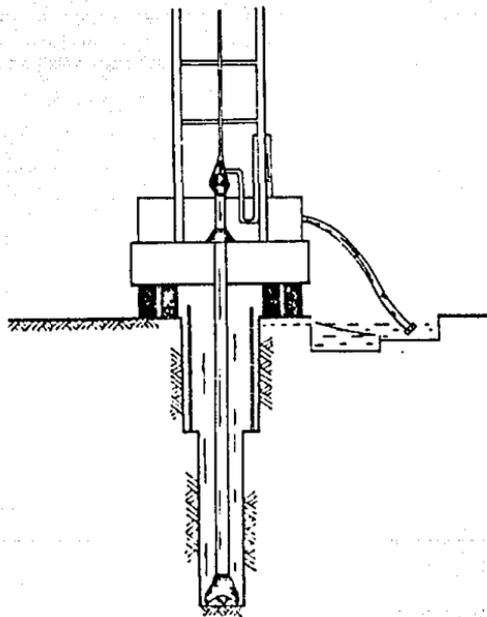


Figura 11.21. Máquina perforadora a rotación con circulación directa.

es la que recibe directamente el movimiento de rotación_ que a su vez trasmite al resto de la columna. El aloja-- miento que tiene la mesa rotatoria para el kelly permite el deslizamiento de ésta a medida que se va produciendo_ el avance de la sarta.

Aunque, como se ha dicho, el peso propio de la columna y fundamentalmente de los lastrabarronas, es el que debe_ producir el avance de la barrena, algunas máquinas vienen dotadas de un dispositivo de empuje (pull-down) que se - emplea preferentemente (casi únicamente) al principio - de la perforación, cuando todavía no se tiene carga sufi- ciente sobre la herramienta de corte.

Como el peso de la columna puede ser superior al con- veniente para la perforación, es preciso disponer de un__ malacate (cabrestante) con su juego de poleas adecuado - para suspender parte del peso de la sarta durante la -- perforación y la totalidad del mismo durante las manio- bras de extracción.

Del mismo modo, para poder realizar las operaciones de revestimiento del pozo y eventual colocación de los fil- tros adecuados, la máquina debe disponer de otro cabres-- tante y la línea de cable correspondiente para realizar_ estas operaciones.

Tanto la mesa rotatoria como el sistema de empuje (si lo tiene la máquina) y los cabrestantes citados, reciben_

la fuerza necesaria de un motor, por medio de una serie de transmisiones y embragues. La potencia de este motor (prácticamente siempre diesel), para máquinas normales de perforación de pozos para agua, oscila entre 40 y 90 h.p..

Finalmente, para hacer circular el lodo de perforación la máquina debe disponer de una bomba adecuada. las que se utilizan con esta finalidad son de pistón, generalmente "duplex", con caudales que oscilan entre 500 y 1500 l/min y presiones de 30 kg/cm^2 (fig. II.23). Estas bombas se suelen denominar expresando (en pulgadas) su diámetro y su carrera.

Dicha bomba está accionada por un motor independiente que es normalmente de potencia análoga o superior al motor que suministra la energía al resto de los elementos de la máquina.

Una serie de conexiones, acopladas elásticamente, completan el circuito de lodos desde la presa de succión, donde son succionados a través de la tubería de succión, hasta el cabezal giratorio, por donde son impulsados a la columna de perforación.

La capacidad de la bomba debe de elegirse en función del diámetro del pozo y del diámetro de la tubería de perforación utilizada (es decir, en función del espacio anular entre la pared del pozo y la tubería de perforación), procurando que la velocidad de ascenso del lodo por

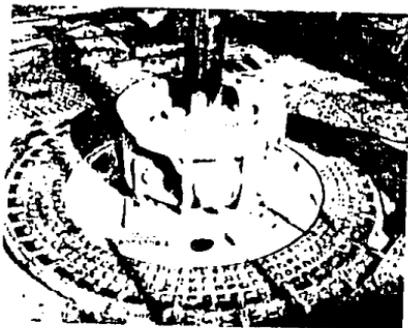


Figura II.22.Mesa rotatoria.



Figura II.23. Bomba de lodos.

el espacio anular sea la mayor posible. Con los diámetros usuales de tubería de perforación ($2\frac{7}{8}$ o $3\frac{1}{2}$), es difícil conseguir velocidades superiores a 2 m/s, para diámetros mayores de 12" (300 mm), salvo que se dispongan de bombas desproporcionadas a la máquina. Las velocidades recomendadas de circulación del lodo, de viscosidad normal, por el anular, están comprendidas entre 0.40 m/s y 0.60 m/s pero en general con los equipos normales son inalcanzables.

La presión antes indicada, de unos 31 kg/cm^2 , es necesaria para vencer las pérdidas de carga en el cabezal giratorio, en el interior de la tubería de perforación, en la barrena y en el espacio anular por donde retorna el fluido de perforación con las partículas de roca que arrastra, y para poder desatascar las obturaciones que se produzcan accidentalmente, tanto en los conductos de la herramienta como por sedimentación de recortes.

II.4. Lodos de perforación.

II.4.1. Características de un lodo de perforación.

En la perforación a rotación juega un papel importantísimo el lodo de perforación, que es un fluido -- que cumple los siguientes cometidos:

- Enfriar y lubricar la barrena.
- Transmisión de potencia hidráulica a la barrena.
- Transporte y acarreo de los recortes a la superficie.
- Estabilidad de las paredes del pozo.
- Sustentación de la sarta de perforación y revestimiento.
- Suspensión de los recortes.
- Control de las presiones de la formación.

El lodo es una suspensión coloidal de arcilla en agua con los aditivos necesarios para cumplir las funciones - antes expuestas. La arcilla preferentemente usada es la bentonita. La característica principal de estas suspen--siones bentoníticas es la tixotropía, que puede definirse como la propiedad que tienen de pasar de un estado - gel a un estado líquido mediante agitación y viceversa, - es decir, se comporta como un gel cuando está en reposo_ y como un líquido cuando está en movimiento.

En un lodo de perforación deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

1. Densidad.

Su determinación en campo se hace pesando en una balanza un volumen conocido de lodo. La escala de la balanza (Baroid) da directamente el valor de la densidad -- del lodo (Fig. II24). La densidad de los lodos bentoníticos pueden variar desde poco más de la unidad hasta --- 1.20 g/cm^3 aproximadamente. Para conseguir densidades mayores y que el lodo siga siendo bombeable, es preciso_ añadir aditivos como el sulfato de bario (barita), que - tiene una densidad comprendida entre 4.20 y 4.35 g/cm^3 - con lo que se consiguen lodos de hasta 2.40 g/cm^3 de -- densidad. Otro aditivo, menos usado, para aumentar la densidad de un lodo es la hematita, con cuya adición pueden alcanzarse densidades análogas.

En los lodos preparados para la perforación de pozos para agua las densidades oscilan entre 1.04 y 1.14 g/cm^3 sin que sean más eficaces cuando se sobrepasa esta cifra, toda vez que aparecen problemas de bombeo y peligro de tapar con ello horizontes acuíferos. Por otro lado - el aumento de la densidad del lodo no tiene un efecto - grande en el mantenimiento de las paredes del pozo. In-- fluyen más sus propiedades tixotrópicas y la adecuación de los restantes parámetros a la litología y cantidad - de las aguas encontradas.

La densidad tiene una influencia directa en la capa-

cidad de extracción del detritus, pues al regirse, de forma aproximada por la ley de Stokes, es proporcional a la densidad del fluido considerado.

2. Viscosidad.

Puede tomarse como la resistencia de un fluido a circular. En bombeo, a doble viscosidad, doble potencia necesaria, pero por otra parte, según la fórmula de Stokes, la velocidad de caída del detritus en el fluido es inversamente proporcional a su viscosidad, y por lo tanto, la capacidad de arrastre lo es directamente. Es preciso, por tanto, una solución cuya viscosidad no sea muy grande para que el lodo sea fácilmente bombeable, pero no tan pequeña que impida al lodo extraer el recorte de roca producido.

La medida de la viscosidad del lodo se hace en campo mediante el embudo Marsh (fig. II.25), según normas A.P.I. expresándose por el tiempo (en segundos) que tarda en salir por un orificio calibrado, un determinado volumen de lodo, (en este caso, viscosidad cinemática).

Para perforación de pozos, pueden fijarse como cifras deseables para la viscosidad, valores comprendidos entre 35 y 45 segundos, preferentemente al rededor de 38. La viscosidad Marsh del agua es de aproximadamente 26 segundos.

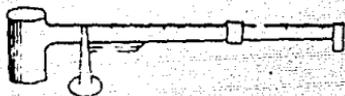


Figura II.24. Balanza de lodos.

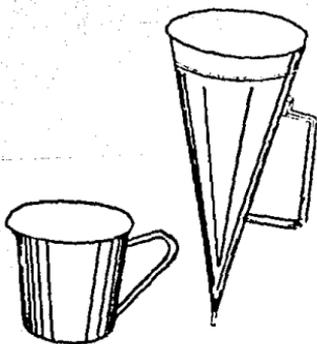


Figura II.25. Embudo Marsh.

3. Tixotropía.

Como se ha indicado, es la propiedad que tienen las suspensiones bentoníticas de pasar de un estado de gelatinosidad a uno líquido mediante agitación. Es una propiedad fundamental, independientemente de su densidad, por lo que los lodos colaboran de forma eficaz en el mantenimiento de las paredes de perforación, aunque se trate de formaciones poco cohesivas. La gelatinosidad de los lodos ayuda a mantener en suspensión el recorte de la roca al interrumpirse la circulación de los mismos (ya sea debido a la extracción de la tubería de perforación, averías en la bomba o en el circuito, etc.) - evitando en buena parte que se depositen sobre la barrena, atascandola.

Para que un lodo bentonítico pase de un estado líquido a gelatinoso inmediatamente despues de dejarlo de agitar, se requieren concentraciones del orden del 20 % en peso de bentonita. Hasta concentraciones del 3 % --- practicamente no gelifica, haciendolo algún tiempo despues de haberse detenido la agitación para concentraciones comprendidas entre el 5 y el 10 %. Estas últimas -- son las que normalmente se utilizan para lodos de perforación.

La medida de la viscosidad puede hacerse valiendose de un viscosímetro rotativo (fig. II.26).

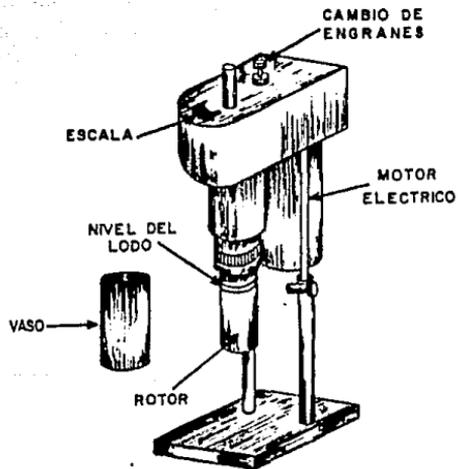


Figura II.26. Viscosímetro Baroid, preparado para determinar propiedades tixotrópicas de los lodos de perforación.

4. Enjarre y filtrado.

Parte del líquido del lodo que es impulsado por el espacio anular comprendido entre la pared exterior de la tubería de perforación y la pared del pozo, se filtra a través de ésta, depositando en la misma partículas coloidales que forman una costra, a esta costra se le conoce como enjarre.

Los lodos de perforación tienen una habilidad para sellar las formaciones permeables expuestas por la barrenas debido a la creación de una delgada capa a la cual ya se mencionó que se le conoce como enjarre, la cual se presentará principalmente en aquellas formaciones que sean permeables, por lo cual requerirá una permeabilidad baja del filtrado en el enjarre para una buena terminación del pozo. Consistentemente el lodo invade las formaciones permeables si el enjarre no fue formado.

Para la formación del enjarre es esencial que el lodo contenga algunas partículas de un tamaño diminutamente pequeño (para el cierre de los poros de la formación).

Estas partículas construirán un puente hacia la formación ya que son atrapados en la superficie de los poros, por lo que las partículas finas son las primeras en ser acarreadas al fondo de la formación.

La zona taponada en la superficie de los poros comienza a atrapar sucesivamente pequeñas partículas y en pocos segundos sólo líquidos invaden la formación. Al líquido que entra subsecuentemente se le conoce como filtrado del lodo.

Para medir el filtrado y enjarre de un lodo de perforación se emplea un filtro-prensa normalizado (fig. 11. 27), haciéndose pasar el lodo durante 30 minutos, trabajando la prensa a una presión de 7 kg/cm^2 .

5. pH.

El factor pH es la medida de la acidez o alcalinidad de una solución electrolítica.

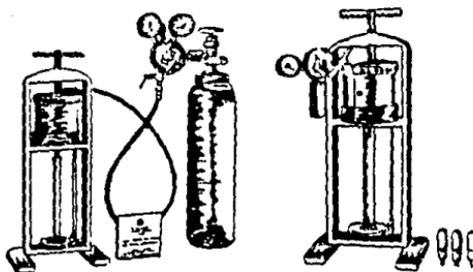
El factor pH tiene valores que varían de 1 a 14.

Una solución neutra (agua destilada) tiene $\text{pH} = 7$.

La disminución del pH de 7 a 1 indica un grado de acidez y el aumento del pH de 7 a 14 indica un grado de alcalinidad.

La estabilidad de la suspensión de bentonita en un lodo de perforación es esencial para que cumpla su función como tal. Esta estabilidad se pierde cuando se produce la floculación, que acarrea la posterior sedimentación de las partículas usadas.

Se comprueba que, en general, un lodo bentonítico es



Modelo (Beroid)

Figura II.27. Filtro prensa.

estable cuando su pH está comprendido entre 7 y 9.50, aproximadamente, precipitando fuera de este intervalo.

Es por tanto mantener el control del pH lo cual suele hacerse por medio de papeles indicadores (sensibilidad alrededor de 0.50 unidades) sin que sea necesario recurrir a un pH-metro más perfecto, ya que son delicados y caros para usarlos habitualmente en campo.

La variación del pH de un lodo durante la perforación, puede ser indicio del paso de formaciones salinas yesosas, calcáreas, o de horizontes acuíferos cargados con esas sales.

Para corregir y mantener el pH dentro de los límites adecuados, existen diferentes productos, de los que se hablará más adelante.

6. Contenido de arena.

Un lodo de perforación de buenas condiciones no debe tener un contenido de arena superior al 2 ó 3%.

Inicialmente, si para su fabricación se usan productos de calidad, debe estar exento de arena. A medida que la perforación avanza, el lodo se va cargando de arena empeorando sus condiciones, pues además de aumentar ficticiamente su densidad, afecta a la viscosidad y tixotropía, aparte de ser un elemento muy nocivo para las bombas, a las que desgasta prematuramente.

Deben combatirse estos efectos disponiendo de desarenadores; la forma más elemental consiste en dejar decantar en una presa el lodo que retorna de la perforación aspirándolo nuevamente en otra a la que ha llegado de la anterior. Procedimientos más rápidos y eficaces y a la larga menos costosos, son las cribas vibratorias y los desarenadores centrífugos.

En un lodo se considera arena a la fracción que pasa por un tamiz 200 (200 hilos por pulgada, equivalente a 0.074 mm). Para determinar la arena que contiene, se toma una muestra de lodo de 100 cm³ pasandola por la malla del tamiz 200. El residuo retenido sobre el tamiz después de lavado con agua, se vierte en un tubo de cristal graduado en %, de 100 cm³ de volumen, expresandose el contenido de arena por la lectura correspondiente.

II.4.2. Aditivos de los lodos de perforación.

El lodo bentonítico puro es una suspensión coloidal de arcilla montmorillonítica en agua. En perforaciones, aunque la base es la suspensión citada, se adicionan ciertos productos para conseguir unas características y propiedades del lodo que se aproximen a la que la experiencia señala como óptimas.

Entre estos aditivos, figuran como esenciales los pro

ductos siguientes:

1. Sulfato de bario o barita ($Ba SO_4$).

Raramente necesario en la perforación de pozos para agua; es un cuerpo inerte que no causa reacción química.

Con la adición de barita, que tiene una densidad comprendida entre 4.20 y 4.35 g/cm³, se consiguen densidades en el lodo superiores a 2.35 ó 2.40 g/cm³, sin que el aumento de sólidos en el lodo perjudique de forma notable su viscosidad.

2. Carboximetil-celulosa (C M C).

Es un coloide orgánico (almidón sódico) que se utiliza mucho en la preparación de lodos para pozos. Contribuye a mantener un enjarre fino y resistente, reduciendo el volumen de agua filtrada. Los hay de alta y baja viscosidad que transmiten estas propiedades al lodo tratado. No es muy propenso a la fermentación, la cual, en caso de presentarse puede corregirse con la adición de sosa cáustica.

3. Quebracho.

Es un tanino de buena calidad, que sirve para fluidificar el lodo, mejorando las condiciones de bombeo, sin que disminuya notablemente su capacidad de suspensión de sólidos. No aumenta el agua de filtrado. Tiene muy buen comportamiento frente a contaminaciones salinas. -

4. Lignosulfonatos.

Estas sales complejas de linina actúan en forma análoga a la del quebracho, pero en forma más enérgica, -- aligerando la viscosidad del lodo y reduciendo su agua de filtrado. Son muy resistentes a la contaminación por residuos de roca y por é \acute{o} llo están indicados en la perforación de estratos con yeso, ya que éste aumenta extraordinariamente la viscosidad del lodo.

Es mucho más caro que el quebracho y su empleo presenta algunas dificultades, principalmente por la gran producción de burbujas que dificultan el bombeo. Estas burbujas (parecidas a la espuma de un detergente) se eliminan con la adición de estreato de aluminio disuelto normalmente en diesel.

5. Sosa cáustica.

Se utiliza para evitar fermentaciones, por ejemplo de C M C, y para corregir el pH cuando está bajo. Frecuentemente se asocia al quebracho. Es preciso tomar precauciones para la preparación y manipulación de lodos con sosa, protegiéndose con guantes y equipo adecuado.

6. Floculantes.

Son usados para flocular sólidos perforados de grandes conglomerados de manera que se pueden remover ya sea por asentamiento o medio mecánico. La floculación es el único método para remover los sólidos de tamaño coloidal que se producen durante la perforación.

7. Polifosfatos.

Son sales sódicas que actúan energicamente como fluidificantes o dispersantes. Más que en la preparación o corrección de lodos, se utilizan principalmente en la limpieza y desarrollo de pozos, cuyos horizontes permeables hayan podido ser inundados por el lodo al hacer la perforación, y en la destrucción del enjarre.

Los más conocidos de esta serie son: los pirofosfatos neutro o ácido, el tetrapolifosfato y el hexametapofosfato, que es el más usado por su eficacia para disminuir la viscosidad. En el caso de su empleo para el desarrollo del pozo, se usa a razón de 5 kg por m^3 de agua. Para fluidificar el lodo a la terminación del pozo antes de proceder al ademe, se emplea aproximadamente 1.5 kg por m^3 de lodo.

II.4.3. Composición de un lodo para perforación de pozos.

Indicadas ya las características y propiedades de los lodos y los valores óptimos de sus parámetros principales, así como los aditivos más usuales para modificar los valores de esos parámetros, se indica a continuación la composición de los lodos tipo que se utiliza cuando no existen formaciones geológicas o ---

aguas que lo contaminen en forma notable, en cuyo caso se hacen las correcciones oportunas utilizando los aditivos antes indicados.

1. Lodo para formaciones no arcillosas (por m^3 de agua).
De 50 a 60 kg de bentonita.

2. Lodo para formaciones arcillosas (por m^3 de agua).
De 60 a 100 kg de bentonita.
2 a 3 kg de quebracho.
1.5 a 2 kg de C M C.
1.5 a 2 kg de sosa cáustica.

El ajuste y corrección de la dosificación se hace - midiendo el pH hasta conseguir situarlo entre 7 y 9.50 al mismo tiempo que se acotan la densidad y la viscosidad entre 1.04 y 1.06 g/cm^3 y 35 y 45 s respectivamente.

En los casos en que se contamina el lodo tipo al -- atravesar horizontes yesosos, se adiciona lignosulfonatos, empleándose entonces la siguiente composición aproximada:

60 a 100 kg de bentonita
1 a 10 kg de lignosulfonato

1.50 a 2 kg de C M C

1.50 a 2 kg de sosa caústica.

Diseño de pozos.

II. 5. Principios básicos.

Los pozos para explotación de aguas subterráneas deben diseñarse para obtener la mayor productividad, -- asociada con el máximo gasto, para reducir al mínimo -- los gastos de operación y mantenimiento, a cuyo efecto se seleccionan materiales que garanticen la vida económica del pozo, dimensionando sus elementos estructura-- les a fin de obtener costos de construcción razonables.

Los principios básicos del diseño, bastante sencill-- os, son aplicables tanto a pozos en materiales consolidados, con pequeñas variantes de carácter secundario.

II.6. Profundidad del pozo.

La profundidad total de un pozo se rige fundamentalmente por los factores siguientes:

- a) Del espesor y niveles relativos del acuífero o acuíferos que se vayan a explotar, puesto que el pozo se llevará a una profundidad que garantice un gasto alto, y el mayor abatimiento que permita incrementar la producción, razonablemente.
- b) De la profundidad a que se encuentra la cima del --- acuífero más profundo por explotar, cuando existen --- varios.

- c) De la salinidad y dureza del agua, factores que en ocasiones limitan la profundidad y en otras la propie cian. Así mismo, del caudal deseado, si técnicamente se pronostica su obtención racional.

II.7. Tubería de ademe.

En pozos alojados en materiales granulares, la tu bería de ademe suele estar formada por una parte de tubo ciego o liso, que forma la cámara de bombeo; y por el cedazo o tubo filtro, que constituye la tubería de producción.

II.8. Diámetro de la cámara de bombeo.

Queda definido fundamentalmente por el gasto que se va a explotar, ya que de éste depende el diámetro de los tazones de la bomba. Generalmente al ademe ciego -- que formará la cámara de bombeo, se le asignará un diámetro de los tazones de la bomba.

Respecto al diámetro de los tazones, en términos generales, se debe tomar como una mera fórmula práctica, es igual, en pulgadas, a la raíz cuadrada del gasto máximo expresado en litros por segundo, más 1".

Ejemplo:

Se espera bombear un gasto de 125 l/s, por lo que se desea fijar las características generales del pozo.

Solución:

- Diámetro de tazones. $\sqrt{125} + 1 = 13"$ (comercial).
- Diámetro del ademe. $13" + 3" = 16"$ (comercial).
- Diámetro de la perforación. $16" + (3" \times 2 \text{ espacio anular para filtro de grava}) = 22"$, en el tramo que alojará a la cámara de bombeo.

Procediendo con este criterio, se satisfacen los siguientes requisitos, indispensables por especificaciones:

- a) La bomba turbina, ya sea o no con motor sumergible, se puede alojar holgadamente en la cámara de bombeo.
- b) Se tiene una satisfactoria eficiencia hidráulica, -- con pérdida por fricción razonable.
- c) Se absorben pequeñas desviaciones y torceduras de la cámara, con lo que la columna de la bomba queda sensiblemente vertical.

Por excepción, en casos muy especiales, el diámetro de la cámara podrá ser tan sólo 2" mayor que el del exterior de los tazones, para diámetros pequeños de éstos.

Con respecto al espesor de la tubería, en general, el

de las tuberías lisas son de acero grado 'B' y su espesor se determina con la siguiente fórmula recomendada por el A.P.I.:

$$H = 28.64 \times 10^6 / ((D/t)(D/t - 1)^2)$$

en la que la relación D/t (diámetro exterior de la tubería entre el espesor de la misma), es un número indicional, y H es la profundidad de diseño del pozo, expresado en metros. El espesor del cedazo depende de las especificaciones del fabricante.

Cuando se tengan problemas derivados de activa corrosión electrolítica, los espesores obtenidos mediante la fórmula propuesta se incrementan en 6.35 mm ($\frac{1}{4}$ ").

Normalmente se usan los espesores comerciales más próximos disponibles en el mercado nacional.

El diseño del cedazo o tubería productora, depende de los siguientes factores, tanto para pozos con filtro natural como artificial:

- a) Longitud. Se fija en función de la permeabilidad y espesor de los estratos productores.
- b) Abertura. Se selecciona para proteger el material de las formaciones alrededor del tubo filtro, impidiendo el paso de finos al interior de éste, ya sea con o sin el auxilio del filtro artificial de grava.
- c) La distribución y número de las aberturas depende del diseño que se realice, así mismo como del fil--

tro proyectado.

d) Diámetro. Se determina en función de la velocidad -- del agua a través del cedazo, la cual no deberá ser mayor de 3 m/s, para minimizar las pérdidas por fricción a través de las ranuras, reducir las posibilidades de arrastre de las arenas finas y contrarrestar los fenómenos de incrustación y corrosión de las -- aguas.

Por consiguiente, se debe de revisar la velocidad en función del gasto esperado. Por vía ilustrativa en la - figura II.28 se grafican las áreas de infiltración en - función de los diámetros y aberturas del cedazo tipo - rejillas.

II.9. Longitud de tubería productora.

Depende básicamente del tipo de acuífero, del abatimiento máximo factible y del espesor y estratificación de los acuíferos.

Por lo demás, no es necesario que el cedazo cubra totalmente el espesor del acuífero para obtener la máxima producción del pozo.

En acuíferos confinados, el abatimiento de proyecto corresponderá al desnivel entre el nivel piezométrico y un punto ubicado un poco arriba de la cima del acuífero.

Si la formación es homogénea, la longitud del tubo -

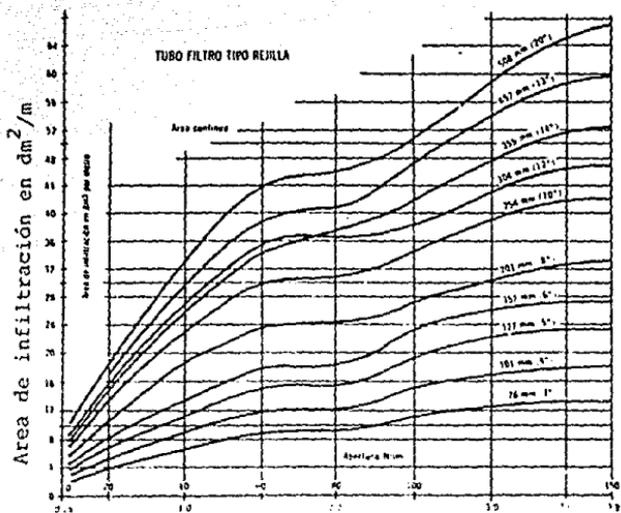


Figura II.28 Abertura en mm.

de cedazo se seleccionará entre un 70 y un 80 % del espesor del acuífero, obteniéndose así el 90 ó 95 % del máximo gasto requerido para el mismo tubo de longitud igual al espesor del acuífero. Para normar un criterio general de los porcentajes que se deben aplicar en función del espesor de los acuíferos, se establece aproximadamente, y para espesores definidos:

- a) Para espesores menores de 10 m, el tubo cedazo tendrá una longitud aproximadamente del 70 % del espesor.
- b) Para espesores mayores o iguales a 10 m, pero menores de 20 m, la longitud del cedazo podrá ser del orden del 75 % de ellos.
- c) Para espesores mayores o iguales a 20 m, la longitud del tubo cedazo será del orden del 80 % del espesor.
- d) Para espesores iguales o mayores de 40 m, la longitud del tubo filtro será igual al 50 % del espesor, si se satisfacen los requisitos de gasto.

Si la formación es heterogénea, el tubo cedazo se colocará frente a él o los estratos más permeables o productivos, y su longitud será igual al 90 ó 100 % de la de los estratos aprovechados.

En acuíferos libres, el abatimiento de proyecto quedará definido por el desnivel disponible entre el nivel piezométrico y un punto situado arriba y próximo --

al borde superior del tubo cedazo.

Cuando la formación es homogénea, la teoría y la --- práctica han demostrado que con un buen diseño, el tubo cedazo conviene situarlo en la parte inferior del acuífero, con una longitud entre un tercio y un medio de su espesor, tendiendo a ser mayor en tanto se quiera mejorar la eficiencia y obtener un elevado gasto.

II.10 Aberturas del tubo cedazo.

Dependerá directamente de la curva granulométrica de las formaciones acuíferas y de la dureza y salinidad del agua, así como de la granulometría de la -- grava del filtro.

En formaciones homogéneas, de arenas finas y gruesas las aberturas del tubo cedazo se fijarán para el tamaño del material que retenga el 30 % del acumulado (según - la curva granulométrica) cuando el agua es excesivamente incrustante; el 40 % si es ligeramente corrosiva; el 50 % si es extremadamente corrosiva y, el 40 ó 50 % si es ligeramente incrustante o el acuífero es delgado y -- linda con formaciones de materiales finos no consolidados, o bien, si el tiempo que dure el desarrollo es limitado. Se anexa gráfica ilustrativa (fig. II.29 y 30).

Por otra parte, en formaciones homogéneas de arenas y gravas gruesas, una abertura correcta puede correspon

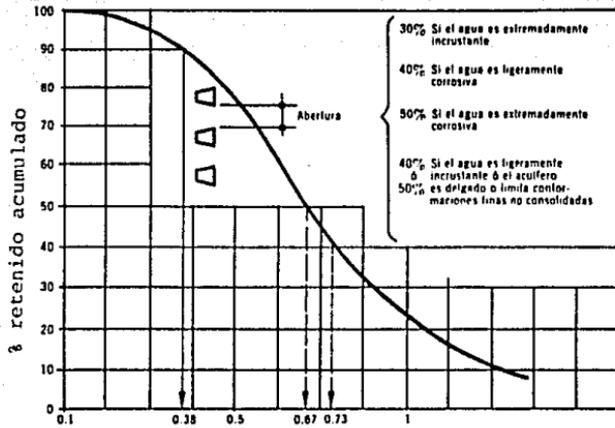


Figura II.29 Abertura del tubo cedazo en mm, formaciones homogéneas de arenas finas y gruesas.

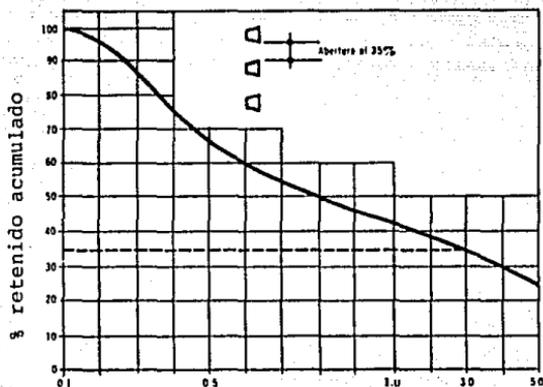


Figura II.30 Abertura del cedazo en mm, formaciones de arenas y gravas gruesas.

der al 35% del material retenido acumulado. Esta se -- ilustra en la gráfica siguiente (fig. II.31).

En formaciones homogéneas de arenas finas y uniformes en general, se justifica el diseño de pozos con filtro artificial de grava; sin embargo, en algunos casos, y cuando el proyecto lo amerita, se puede seleccionar una abertura que corresponda al 40 y el 50 % del material retenido acumulado.

En un tubo cedazo tipo rejilla, se recomiendan aberturas mínimas de 0.25 mm (#10) y 0.50 mm (#20), para -- aguas extremadamente corrosivas e incrustantes, respectivamente.

En formaciones heterogéneas, la abertura del tubo cedazo se seleccionará aplicando el mismo criterio de -- las formaciones homogéneas. Cuando una formación de material fino se encuentra supreyaciendo a otra de material grueso, el tubo cedazo, con aberturas para material fino, penetrará 1 m en la formación de material grueso y la abertura correspondiente a la formación de material grueso, será menor o igual a dos veces la del material fino, teóricamente.

Finalmente, si la formación requiere la colocación de un filtro de grava, entonces, la abertura será menor -- que dos veces el tamaño del material retenido, para las aberturas antes mencionadas; esto es: $A_c \leq 2TGr$.

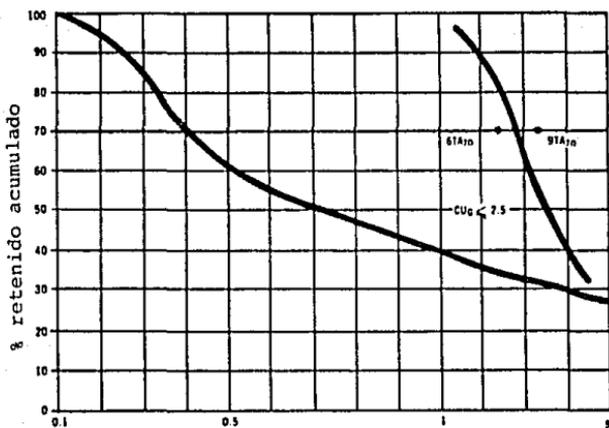


Figura II.31 Curva granulométrica para filtros en zonas áridas y semiáridas. Abertura del cedazo en mm.

donde A_c son las aberturas del tubo cedazo y TGr el tamaño del grano de material retenido.

II.11. Diseño del filtro de grava.

El relleno de grava es un procedimiento que consiste en colocar grava seleccionada entre la parte de afuera de la rejilla y la pared del acuífero. Para hacer un relleno de grava artificial, se perfora en el pozo con mayor diámetro que la rejilla o tubo cedazo, se centra la rejilla en el agujero y luego se rellena el espacio anular alrededor de la rejilla con grava debidamente seleccionada. Después de colocar el relleno de grava se llevan a cabo los procedimientos de desarrollo para quitar los materiales finos y no estables y para estabilizar la grava.

A continuación se describe el método de Terzaghi para seleccionar el material del filtro de grava, pero antes habrá que definir los siguientes conceptos:

d_x tamaño de las partículas tal que el x por ciento es más pequeño, es decir, $100 - x$ representa el porcentaje retenido por la malla de abertura x .

Coefficiente de uniformidad: razón del tamaño d_{60} al tamaño d_{10} del material. En el caso de que la curva granulométrica represente el tanto por ciento retenido, en vez del porcentaje que pasa, el coeficiente de uniformi

dad se define por la razón d_{40}/d_{90} . El coeficiente de uniformidad de las arenas es pequeño.

Tamaño efectivo: tamaño del tamiz que retiene el 90 % de las arenas del acuífero, o que deja pasar el 10 %.

Según Terzaghi (1943), para construir sistemas filtrantes aplicados a estructuras hidráulicas:

$$\frac{d_{85} \text{ filtro}}{d_{85} \text{ acuífero}} < 4 < \frac{d_{15} \text{ filtro}}{d_{15} \text{ acuífero}}$$

con el mismo coeficiente de uniformidad, y según Fuchs debe ser :

$$12 < \frac{d_{15} \text{ filtro}}{d_{15} \text{ acuífero}} < 40$$

$$12 < \frac{d_{50} \text{ filtro}}{d_{50} \text{ acuífero}}$$

Estas fórmulas son suficientemente aceptables en la práctica cuando se trata de cálculos preliminares.

Ejemplo:

Sean los tipos de material acuífero siguientes:

Material acuífero A (arena fina homogénea):

Número de malla	200	150	100	72	52
Tamaño de grano (mm)	0.075	0.105	0.14	0.205	0.295
% en peso que pasa	16	31	67	83	93

Material acuífero B (arena heterogénea):

Número de malla	400	300	200	150	85
Tamaño de grano (mm)	0.037	0.052	0.075	0.105	0.18
% en peso que pasa	4	17	30	43	63

Número de malla	60	30	18
Tamaño de grano (mm)	0.23	0.5	0.085
% en peso que pasa	72	90	98

valores característicos:

Tamaño (mm)	d_{95}	d_{90}	d_{85}	d_{75}	d_{60}	d_{40}
Acuífero A	0.30	0.25	0.21	0.17	0.135	0.12
Acuífero B	0.65	0.5	0.4	0.25	0.15	0.12

Tamaño (mm)	d_{30}	d_{15}	d_{10}
Acuífero A	0.095	0.075	0.065
Acuífero B	0.075	0.05	0.042

Coefficiente de uniformidad (d_{60}/d_{10}): A:2.1 B:3.6

Aplicando la fórmula de Terzaghi:

Filtro de grava para el acuífero A:

$$d_{85} \quad 0.021 \times 4 = 0.84 \text{ mm}$$

$$d_{15} \quad 0.075 \times 4 = 0.30 \text{ mm}$$

$$d_{60}/d_{10} = 2.1$$

Filtro de grava para el acuífero B:

$$d_{85} \quad 0.4 \times 4 = 1.6 \text{ mm}$$

$$d_{15} \quad 0.05 \times 4 = 0.2 \text{ mm}$$

$$d_{60}/d_{10} = 3.6$$

Capítulo III

Perforación de pozos de agua en el Valle
de Xico (Cuenca de México).

III.1. Geología regional.

La zona del Valle de Xico se encuentra localizada sobre el Eje Neovolcánico de México, en la provincia fisiográfica denominada "Zona de Fosas Tectónicas" (Alvarez Jr, 1957) ubicada en la parte suroriental de la Cuenca del Valle de México.

Por su posición estratigráfica las formaciones geológicas de la Cuenca del Valle de México y sus alrededores pueden agruparse en los siguientes periodos:

- a. Cretácico superior (Ks).
- b. Terciario inferior (Ti).
- c. Terciario medio (Tm).
- d. Terciario superior (Ts).
- e. Cuaterio (Q). (fig. III.1).

- a. Cretácico superior (Ks).

Este periodo se encuentra representado por rocas carbonatadas y terrígenas, de las formaciones Cuautla y Mezcala, que les suprayace el material ígneo del terciario.

La formación Cuautla está constituida por capas de caliza de espesores delgados y gruesos con fósiles y nodulos de pedernal, variando en coloración de gris claro

Era	Sistema	SERIE	(C.J. Schlaepfer)	(A. Araujo Mendieta)	
			CUENCA DEL VALLE DE MEXICO	AREA DE ESTUDIO	
Cenozoico	Terciario	RECIENTE Y PLEISTOCENO	1	Formación Chichinautzin. Roca Volcánica. Formación Tarango.	Capas lacustres Formación Chichinautzin. Roca Volcánica. Formación Tarango.
				===== ? =====	===== ? =====
		Plioceno	13	Formación Las Cruces. Formación Ajusco. Formación Zempoala. Formación Iztaccihuatl. Formación Tlaloc	Formación Ajusco. Formación Iztaccihuatl.
				===== ? =====	===== ? =====
		Mioceno	25	Rocas Volcánicas Formación Tepoztlalan	Formación Tepoztlalan Rocas Volcánicas.
		Oligoceno	36	Formación Balsas	
		Eoceno	58		Formación Balsas
Paleoceno	63				
Mesozoico	Cretácico	Superior	99	Formación Mezcala	Formación Mezcala.
				Formación Cuautla	Formación Cuautla.

Figura III.1). Tabla de correlación estratigráfica.

a obscuro y en ocasiones se observan capas arcillosas.

La formación Mezcala está constituida por capas delgadas de calizas, interstratificadas con lutitas y limolitas.

b. Terciario inferior (Ti) (Paleoceno y Eoceno).

Se cree (Fries, 1960) que a fines del Cretácico o principios del Terciario, las rocas de la Cuenca del Valle de México fueron afectadas por la orogénia Laramide, como consecuencia de la subducción de la placa oceánica de Cocos, bajo la placa continental Americana, lo cual ocasionó que las rocas sufrieran grandes plegamientos y levantamientos, quedando expuestas a cientos de metros de altura. Al término de la etapa de plegamiento y levantamiento, tuvo lugar una etapa distensiva causada por esfuerzos tensionales, originando con ello grandes sistemas de afallamientos normales y formando las llamadas "fosas tectónicas".

Al actuar la erosión sobre las rocas preexistentes se fueron depositando grandes cantidades de sedimentos continentales, fragmentos de calizas con pedernal y productos piroclásticos derivados de la actividad volcánica, consistentes en brechas y lavas de composición basáltica a lo que se le llama "Formación Balsas".

c. Terciario medio (Tm) (Oligoceno y Mioceno).

Las rocas volcánicas más antiguas en la Cuenca, se les ha llamado "rocas volcánicas del Terciario Medio" y comprenden: tobas, brechas, andesitas, riolitas, basaltos y productos volcánicos erosionados que se encuentran a los pies de las sierras de Las Cruces, Río Frío, Nevada, Guadalupe, Cerro de Chapultepec, Peñon de los Baños y bases de Iztaccihuatl y Ajusco.

La formación Tepotztlan aflora bajo los derrames de la formación Chichinautzin y está compuesta por rocas volcánicas piroclásticas, asociadas con derrames de lavas andesíticas, depositadas por corrientes de agua o lodos en capas de 0.50 a 10 m de espesor.

d. Terciario superior (Ts) (Plioceno).

Este periodo se caracteriza por un nuevo ciclo de vulcanismo y afallamiento, el cual está representado por: lava basáltica y dacitas (Sierras de Pachuca y Guadalupe), lavas andesíticas, dacitas y piroclásticos (Sierra Nevada y de las Cruces).

En la época de los primeros movimientos de la Zona de fallas Clarión, se originaron los complejos volcánicos andesíticos de las prominencias del Ajusco y posteriormente el volcán Popocatepetl.

Durante el Plioceno superior, los productos volcánicos consistieron en andesitas y basaltos formando exten

sas cordilleras, interrumpiendo desde entonces la conexión directa que pudo existir hacia el norte de la Cuenca acumulándose rápidamente potentes espesores de aluviones y sedimentos lacustres, interestratificados con horizontes piroclásticos derivados de la constante actividad volcánica, a los que se le llama formación Tarango.

e. Cuaternario (Q) (Pleistoceno).

Durante el Cuaternario, las condiciones climatológicas cambiaron dominando el frío y la humedad, formándose glaciares. Las lluvias y los deshielos formaron grandes arroyos y barrancas profundas en la formación Tarango, originando extensos valles que se extendían hacia el sur, estos sistemas fluviales erosionaron casi toda la formación Tarango.

Contemporáneamente al desarrollo de esta red fluvial se intensificaron las erupciones volcánicas, rellenando los drenes con avalanchas y materia brechoide, a partir de entonces hubo continua actividad volcánica, tanto en el norte como en el sur de la Cuenca.

El material volcánico con espesor cerca de 300 m (Mo ser, 1961), interrumpió definitivamente el drenaje de la Cuenca al sur, obturando el gran espacio situado entre las bases del Ajusco y la Sierra Nevada, creando así una enorme cuenca cerrada, la Cuenca de México.

Al actuar los agentes erosivos y seguir la constante actividad volcánica, la cuenca se rellenó rápidamente -- con cantos rodados, gravas, arenas, cenizas y arcillas con espesores de 800 m.

Toda esta secuencia ha sido afectada finalmente, por efectos de tectonismo que originó fallas transcurrentes NE-SW, notándose en las unidades litológicas más recientes, plegamientos incipientes y fracturas en los materiales de relleno asociados con ellas.

Esto se puede observar en varias localidades de la Cuenca del Valle de México, por ejemplo Tepotzotlan y Tlalmanalco.

III.2. Programa de perforación de pozos en la Cuenca del Valle de México.

La perforación de pozos para agua en todo el Valle de Xico alcanza una profundidad un poco variable, que se encuentra en el rango de los 70 a los 200 m.

Una vez definida la índole del uso del agua (riego, uso doméstico o abrevadero), para conocer cada uno de los estratos cortados por la barrena, ubicación de los acuíferos por explotar o de aquellos que por su condición de salinidad o contaminación sea necesario aislar por medio de cementaciones, y en resumen tener bases para analizar el diseño de construcción del pozo, conviene elaborar un programa de trabajo en base a estudios pre-

vios al que se le conoce como programa de perforación.

En el programa de perforación se especifica:

1. Tipo y capacidad de equipo.
2. Profundidad por alcanzar.
3. Diámetros de perforación.
4. Diámetros y profundidades de tubería de ademe y tubería tipo rejilla o cedazo.
5. Lodo de perforación a emplear.
6. Registro eléctrico.

A continuación se presenta un programa típico para perforación de pozos en el Valle de Xico.

Nombre del pozo: Pino # 324.
 Elevación: 2237.08 m.s.n.m.
 Localidad: Sta. María Nativitas.
 Municipio: San Salvador Atenco, Méx.
 Profundidad total: 165 m.
 Tipo de máquina a emplear: Winter Weiss Mod. 522
 "Porta Drill".

Profundidad (m)	Diámetro de perforación (mm)	Ademe (mm)
0 - 42	609.6 (24")	508 (20")
42 - 112	457.0 (18")	356 (14")
112 - 165	311.0 (12½")	177.8 (7")**

** Tubo tipo rejilla.

64 a

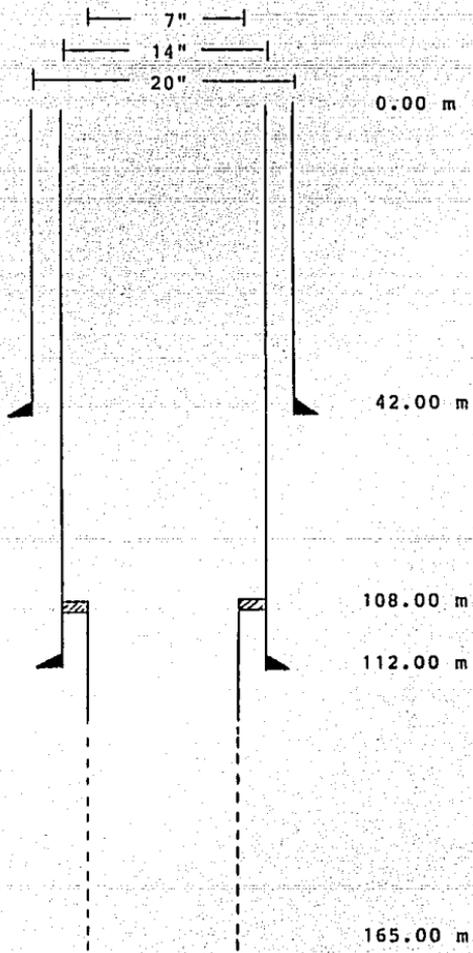


Figura III.2. Pozo Pino #324.

Tipo de lodo de perforación a emplear:

Bentonítico de densidad igual a 1.04 g/cm^3 y viscosidad igual a 38 segundos.

Durante la perforación se deberá obtener muestras de los materiales atravesados a cada 2 m de avance en la perforación. Además, se tomarán muestras adicionales en los cambios de formación.

Las muestras obtenidas deberán guardarse en frascos de vidrio, etiquetándolos con el nombre o número de identificación del pozo, número progresivo de la muestra y profundidad a la que corresponda.

Cuando se prevea la existencia de acuíferos salinos, se deberá llevar un registro de mediciones de resistividad de los lodos de acuerdo a las indicaciones del Ingeniero Residente.

El peso sobre la barrena y la velocidad de rotación de ésta, dependen directamente de las recomendaciones dadas por el fabricante.

A continuación se proporcionan algunas sugerencias para la perforación de pozos para agua en la región de Xico:

1. Preferentemente se deben utilizar barrenas con cojinetes de rodillos ya que estos responden mejor a altas revoluciones por minuto.
2. Como la mayoría de las formaciones que se perforan en esta zona provienen de un ambiente ígneo, se deben utilizar, en algunos casos, las barrenas con inserciones de carburo de tungsteno.
3. El peso sobre la barrena y la velocidad de rotación se debe de incrementar gradualmente.
4. Principalmente, un análisis de costo por metro perforado puede ayudar a decidir que tipo de barrena utilizar.

Con respecto a las dimensiones de las presas o fosas para lodos varían a criterio, pero es de recomendarse -- tengan amplitud suficiente, tanto para el asentamiento -- de los recortes que se extraen del pozo como para una -- mejor alimentación de la bomba; presas de 3 x 2 m y --- 1.50 m de profundidad proporcionan muy buenos resulta-- dos.

La presa de asentamiento se recomienda tenga profundidad mayor que la de succión con el fin de que cumpla_ sus funciones, de 0.30 a 0.50 m más bajas, son medidas re_ comendables en este caso.

El desasolve de las presas debe efectuarse con fre--

cuencia, para evitar por acumulación, el paso de los re cortes de la presa de asentamiento a la de succión y fi nalmente a la bomba de lodos, ya que esto produciría -- desgastes en la bomba y otros problemas ya mencionados.

III. 3. Terminación de pozos.

Una vez comprobado que se estabiliza el nivel_ del agua en el pozo despues de pruebas de productividad el corte litológico con las muestras de las formaciones obtenidas durante la perforación y complementando con - el registro eléctrico o de otros tipos que se ejecuten, se determinará si la perforación es positiva o negativa y en consecuencia se realizará el proyecto de termina-- ción con las ampliaciones en dado caso que hayan de rea_ lizarce, así como el engravado, ademado y cementación_ del pozo.

Las ampliaciones comprenden los trabajos necesari- os para proporcionar las dimensiones definitivas al - pozo, conforme al diseño que se haya proyectado.

Es muy importante indicar la posición, diámetros, es pesos, tipos y demás especificaciones de la tubería - para ademe, lisa y cedazo, destacando la longitud co--- rrespondiente a la cámara de bombeo.

Las especificaciones de la tubería para ademe, lisa y

cedazo. están bajo normas A.P.I. -5LX o A.S.T.M. A-53 y A-120. Serán fabricadas con lámina nueva y cada tramo - deberá estar biselado a 30° en sus extremos, presentando una sola costura longitudinal soldada eléctrica y automáticamente a tope. La longitud de cada tramo será de 6.10 m (20') o bien aquellas que la residencia determine.

La "corrida" de la tubería de ademe se realizará en una sola operación continuada, previo acondicionamiento del pozo y para el soldado de los tramos se emplearán - soldaduras de alta resistencia a la tensión (E 6011, -- 6012 ó 6013), en cordones de 1.587 mm (1/16") mayores - que el espesor de la tubería, constituidos por lo menos de dos capas de soldadura, usando electrodos de diámetro igual o menor al espesor de la pared de la tubería, de acuerdo con las normas de la American Welding Society - (A.W.S.).

El ademe se formará con tramos completos de tubería y de cedazos soldados a tope.

La longitud total del ademe será tal, que sobresalga 1 m del terreno natural.

La tubería entrará holgadamente en la perforación y - deberá girar libremente cuando esté suspendida, no debiendo ser hincada en ningún caso. Invariablemente la -

columna de ademe y cedazo deberá quedar colgada mediante anclaje adecuado desde la superficie del terreno y - cuando por problemas de construcción, se tenga necesidad de telescopiar la tubería traslapando la de menor - diámetro se usarán soldadores para mantenerla colgada - mientras se coloca el filtro de grava.

El ademe deberá quedar centrado en la perforación, - para lo cual deberá estar provisto de los centradores - necesarios.

Cuando en el programa de terminación se consigne la necesidad de colocar un filtro de grava para contener - los finos de las capas acuíferas, se deberá disponer de existencia suficiente apegandose a lo siguiente:

- a. La calidad de la grava se basará en su constitución petrográfica, redondez, y deberá tener una determinada granulometría lo que deberá ser verificado al inicio de la obra.

- b. La grava se proporcionará en la calidad y tamaño que se haya determinado, cribada y lavada, y no se permi tirá el inicio de una "corrida" de tubería tipo rej illa si no se cuenta con disposición suficiente de -- grava en el sitio.

c. No se deberá aceptar material para el filtro, de composición calcárea y fácilmente alterable, se preferirá la grava de cuarzo. Tampoco se aceptará material triturado.

El filtro de grava se colocará por gravedad en el espacio anular entre la tubería de ademe y la pared del agujero, facilitando su descenso mediante circulación de lodo diluido, es decir de baja viscosidad.

Como consecuencia de los trabajos de perforación, se tendrá que lavar el pozo con circulación de agua limpia y se entenderá como las operaciones que se tendrán que efectuar para extraer del pozo los sólidos y coloides en suspensión.

Para poder llevar a cabo lo anterior, se deberá introducir tubería de perforación franca hasta el fondo del pozo, para circular agua exclusivamente, hasta que por el pozo salga "agua limpia".

Después de las operaciones anteriores se verterá al pozo un producto dispersor de arcillas en el volumen y concentración que se determine.

Intimamente ligado a los trabajos de perforación y terminación de pozos, está el uso del cemento, estas operaciones se realizan cuando en el transcurso de la perforación se pretenda aislar acuíferos de alta salinidad o bien para evitar la contaminación de los acuíferos de buena calidad factibles de explotación.

La cementación de un pozo consiste en inyectar cemento de manera que éste ocupe el espacio anular comprendido entre la tubería de ademe y la pared del agujero.

Para lograr un buen trabajo de cementación es indispensable analizar cada uno de los factores que intervienen para que ésta se realice con éxito, entre ellos se tienen: el cemento mismo, la correcta relación agua-cemento, el uso del equipo adecuado y las condiciones del pozo.

La correcta relación agua-cemento que debe tenerse en cuenta al preparar una lechada, es de gran importancia para obtener una buena cementación; al prepararla, es necesario usar la suficiente agua para asegurar una completa hidratación e hidrólisis de los elementos constituyentes.

El cemento "común", requiere aproximadamente un 20% de su peso en agua, para lograr una hidratación completa pero se ha previsto por pruebas de laboratorio, que se necesita casi el doble de esta cantidad de agua para --

que la mezcla pueda ser bombeable. En ocasiones pueden usarse lechadas "gruesas" utilizando poca cantidad de agua; estas mezclas ayudan a desplazar el lodo por delante, teniendo menor peligro de contaminaciones con el fluido de perforación, pero también se corre el riesgo de que el cemento empiece a fraguar antes de haber alcanzado la profundidad deseada. Otras veces la lechada puede ser preparada con un alto porcentaje de agua (70%) la cual puede dar resultados satisfactorios siempre y cuando tenga el tiempo de reposo suficiente para que fragüe; pero se tiene el inconveniente de que fácilmente pueda infiltrarse a través de formaciones permeables.

Antes de introducir la tubería que se va a cementar, se recomienda acoplarle una zapata de diámetro interior igual a la misma, formada por materiales fácilmente perforables, y que además de guiar el extremo inferior del tubo a través de las irregularidades que puedan existir en el agujero, sirve para permitir la circulación de la lechada de cemento del interior al exterior de la tubería de ademe e impedir la circulación en sentido inverso. En su defecto, en un tramo de tubo de diámetro igual a la tubería por cementar y longitud aproximada a 1.50 m, se colocará un tapón de cemento de aproximadamente 60 cm el que hará las veces de zapata.

Una vez fraguada la lechada que constituye el tapón

y una distancia aproximada de 20 cm, se cortarán con soplete y en forma perimetral, de 6 a 8 secciones rectangulares de 10 x 4 cm, y que se utilizarán para expulsar la lechada.

Capítulo IV.

Problemas específicos en la perforación
en el Valle de Xico.

Debido a que el Valle de Xico se encuentra en una zona de origen ígneo, en la perforación de pozos para agua los principales problemas que se tienen son debido a las características físicas de las formaciones del subsuelo, que por lo general están compuestas por materiales no consolidados, en la parte más somera, y por rocas extrusivas en la parte más profunda, las cuales pueden estar fracturadas.

Las características anteriores originan pérdidas de circulación, lo cual repercute en el avance del programa de obra y, en sí, en todas las actividades derivadas de éllo.

Se entiende como pérdida de circulación la ausencia parcial o total de un determinado volumen de lodo de perforación, el cual se filtra hacia una formación que posee una alta permeabilidad, lo cual trae como consecuencia la realización de operaciones extraordinarias para controlarlas y que implica el uso de materiales y técnicas adecuadas.

A continuación se describen los tipos de formaciones en que ocurren así como los materiales y técnicas principales que se utilizan para controlarlas.

IV.1. Causas que originan las pérdidas de circulación.

Las causas que originan una pérdida de circulación pueden presentarse de dos maneras: naturales o inducidas. Las naturales se presentan en formaciones con fracturas o cavernas inherentes a ellas y las inducidas son aquellas que son provocadas por presiones excesivas en el agujero.

Las presiones excesivas en el fondo del pozo pueden provenir de diferentes fuentes, pero quizá la más importante es la presión hidrostática.

La presión hidrostática necesaria para contrarrestar la presión de los fluidos de la formación, puede ser suficiente para fracturar formaciones superiores al fondo, ésto da como resultado la pérdida de circulación.

A continuación se mencionan las causas por las cuales la presión de fondo puede incrementarse:

1. Alta densidad del lodo de perforación.

Una de las funciones del lodo de perforación es contrarrestar las presiones subsuperficiales y la densidad es el medio por el cual se logra obtener la presión requerida para mantener controladas dichas presiones subsuperficiales.

La densidad está expresada en términos de masa por -

unidad de volumen, teóricamente el lodo debe tener una densidad como la del agua para alcanzar velocidades de penetración óptimas y evitar las pérdidas de circulación, sin embargo, en la realidad son necesarias densidades más altas que la del agua para controlar las presiones subsuperficiales en el fondo del agujero.

Cuando el valor de la densidad es muy alto, la presión hidrostática del fluido de control sobre la formación puede provocar una fractura inducida, perdiéndose la circulación parcial o total ocasionando con ésto el posible derrumbe de la pared del pozo.

2. Alta viscosidad del lodo de perforación.

La viscosidad se define como la resistencia interna de los líquidos o de los gases al flujo. La viscosidad puede expresarse en medidas absolutas o relativas, las relativas son la viscosidad del embudo Marsh o viscosidad aparente, la absoluta son valores de características no Newtonianas como la viscosidad plástica, el punto de cedencia y el esfuerzo cortante.

La viscosidad de los lodos disminuye al aumentar la temperatura. Un aumento en la presión produce incremento en la viscosidad, aunque este efecto es más notable a presiones altas, debe tener suficiente "viscosidad efectiva" para separar los recortes del lodo en la su-

perficie y tener suficiente gelatinosidad para mantener los recortes en suspensión cuando el fluido no esté en movimiento.

El efecto de la viscosidad sobre la velocidad de perforación origina lo siguiente:

- Al aumentar la viscosidad disminuye la eficiencia hidráulica de las bombas de lodo.
- Al aumentar la viscosidad se incrementan las pérdidas de presión por fricción en el sistema circulatorio, lo cual significa inadecuada limpieza del fondo del agujero.
- La alta viscosidad proporciona un colchón viscoso que disminuye la fuerza de impacto de los dientes de la barrena sobre la formación.

Todo lo anterior trae como consecuencia un aumento en la presión sobre la formación expuesta, la cual se puede fracturar causando pérdida de circulación.

3. Excesiva velocidad de circulación.

Antes de que se introdujeran las barrenas tricónicas las bombas se operaban usualmente al gasto correspondiente a la mínima velocidad de circulación requerida para levantar los recortes; actualmente esta práctica continúa hasta cierto punto.

Si las toberas se calculan de tal forma que la presión superficial (con el gasto mínimo óptimo) sea igual a la presión superficial máxima permisible, entonces la velocidad en las toberas será la máxima que pueda alcanzar y aún levantar los recortes.

Por lo tanto, si tenemos una velocidad excesiva tendremos mayores pérdidas por fricción incrementándose -- considerablemente la densidad equivalente de circulación la cual trae como consecuencia un aumento sobre la formación expuesta, con el riesgo de romper la misma.

4. Alta gelatinosidad.

Las funciones de la gelatinosidad son evitar que los recortes se asienten en el fondo del pozo cuando por alguna razón se detiene la perforación y la circulación del fluido de perforación, manteniéndolas en suspensión. La gelatinosidad puede ser frágil o progresiva, la frágil tiene valores iniciales medios y sufre pequeños incrementos en su determinación final, mientras que la -- progresiva reporta valores iniciales bajos y valores finales elevados, corriéndose riesgos de fracturar la formación por pistoneo al bajar la tubería de perforación o alcanzar presiones de bombeo muy elevadas en el intento de romper la circulación, incrementándose la presión sobre las paredes del pozo; este parámetro se suma a la

presión ejercida por la columna hidrostática del lodo de perforación; también se pueden ocasionar derrumbes de la pared del pozo al sacar tubería por el efecto de succión.

5. Restricciones en el espacio anular.

Los hules protectores en la tubería de perforación utilizados para evitar el desgaste de las tuberías de revestimiento al estar rotando la tubería de perforación, que en ocasiones se abusa de ellos, ocasionan reducción del espacio anular, con el consecuente incremento en las caídas de presión por fricción en cada restricción y esto trae como consecuencia incrementar la presión de bombeo para obtener el eficiente acarreo de los recortes a la superficie.

El empleo de lastrabarrenas de sobremedida es otra de las causas de reducción del espacio anular.

Los fluidos de perforación tienen la cualidad de sellar las formaciones permeables expuestas por la barrena debido a la formación de una delgada película de lodo en la pared del pozo llamada enjarre, ésta película se va formando a medida que la perforación avanza; este revestimiento de lodo, arcilla y demás coloides se forma por el efecto de filtración originado por la presión de la columna hidrostática del lodo de perforación, se-

parando algo del agua que se filtra a la formación. Un enjarre demasiado grueso provoca fricciones al sacar tubería del pozo, así mismo al meter la barrena u otra herramienta, y como reduce el espacio anular se necesita incrementar la presión de bombeo originandose con esto un riesgo de llegar a fracturar la formación.

6. Movimientos de tubería.

Debido a la tixotropía del lodo y a su casi nulo coeficiente de compresibilidad, cada vez que se introduce una tubería se incrementa la presión ejercida por la columna del lodo de perforación contra las paredes del pozo, el incremento es mayor a medida que aumenta la velocidad con que sea bajada la tubería y herramientas (efecto de pistón), también aumenta en función de la profundidad del pozo o con la reducción del diámetro del agujero. Todos estos efectos sumados a la presión hidrostática pueden causar una fractura inducida perdiendo fluido de perforación; la pérdida puede presentarse en forma parcial o total, según la severidad del caso - (ver fig. IV.1).

El asentamiento de la tubería de revestimiento a profundidades inadecuadas es la causa por la cual puede -

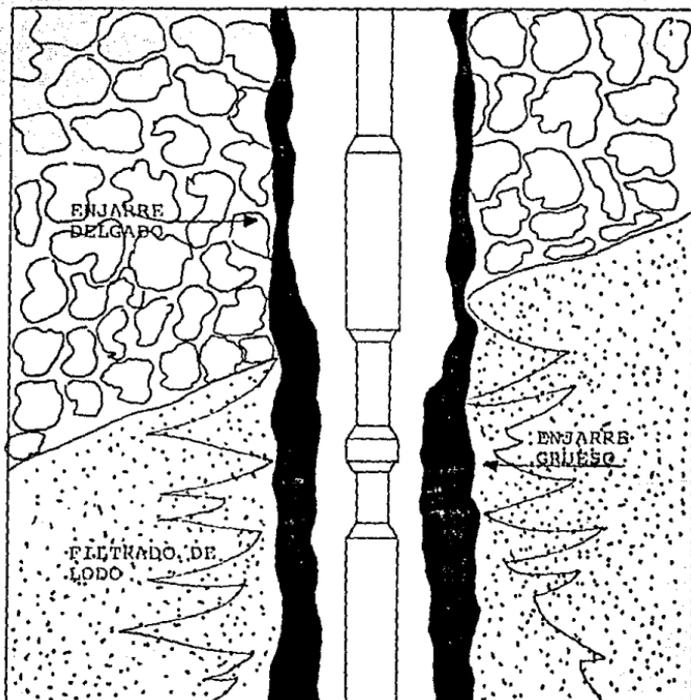


Figura IV.1. Filtrado y enjarre.

ocurrir pérdida de circulación, ya que ésta pudo ser colocada demasiado arriba de una formación de baja presión, la cual se puede fracturar cuando la densidad se incrementa al valor requerido para continuar la perforación de la siguiente etapa.

IV.2. Tipos de formaciones en las que frecuentemente ocurren pérdidas.

Los tipos de formación por las cuales parte o todo el lodo puede ser perdido, las podemos clasificar en:

- a. Formaciones cavernosas.
- b. Formaciones no consolidadas o de alta permeabilidad.
- c. Formaciones con fracturas naturales.
- d. Formaciones fácilmente fracturables.

a. Formaciones cavernosas.

Los estratos que contienen cavernas son a menudo no identificados geológicamente y la profundidad a la cual se encuentran son hasta cierto punto predecibles en un área donde ya se hayan perforado varios pozos. Las cavernas

nas pueden variar en magnitud desde unos cuantos milímetros hasta metros (fig. IV.2). En estas formaciones la barrena normalmente puede caer desde varios centímetros hasta algunos metros cuando penetra uno de estos huecos, entonces, la pérdida puede ser repentina y severa a tal grado que el nivel del lodo en el pozo disminuye algunos metros, desbalanceando la columna y con esto se puede provocar la penetración de fluidos en zonas donde la presión de formación sea mayor que la hidrostática que resulte debido a la disminución de nivel. La pérdida puede presentarse cuando la presión hidrostática es ligeramente mayor que la presión de fractura de la formación.

El sellamiento de una formación cavernosa depende en gran parte del tamaño de los huecos y de la dureza de la matriz de la roca. Las alternativas para penetrar la zona cavernosa son perforar en ciego (no hay retorno de el fluido de perforación a la superficie), o trabajar -- con aire y espuma. Después de haber pasado la formación cavernosa se puede cementar una tubería de revestimiento para aislar las cavernas y poder seguir perforando.

b. Formaciones no consolidadas.

Un ejemplo de este tipo de formación son las gravas sueltas y arenas comunicadas que se encuentran a -- profundidades someras (fig. IV.3) y los fluidos que con-

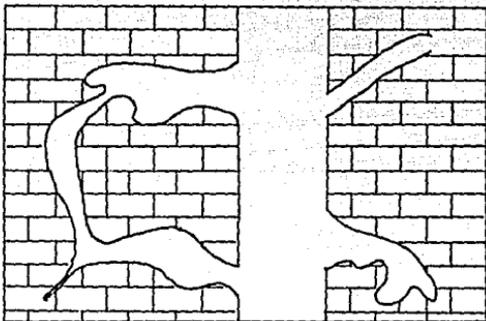


Figura IV.2. Formaciones Cavernosas.

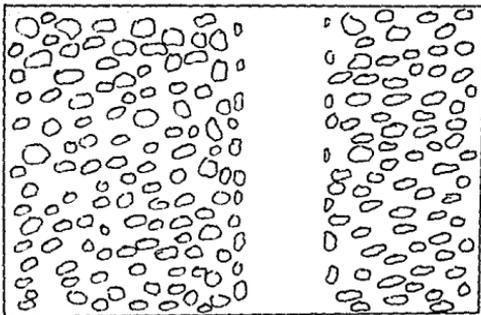


Figura IV.3. Formaciones no Consolidadas.

tienen son difícilmente encontrados a una presión anormal. En la mayoría de los casos, el problema se puede solucionar disminuyendo la densidad del fluido de perforación al mínimo posible.

c. Formaciones con fracturas naturales.

Son fracturas inherentes a la formación y se pueden encontrar en cualquier tipo de roca, esta fractura natural se puede definir como la interfase entre dos planos de roca los cuales tienen poco vínculo químico entre sí. Cuando los planos son horizontales, están unidos por la sobrecarga; cuando la interfase es aproximadamente vertical, las fuerzas con las cuales los planos se mantienen unidos pueden ser considerablemente menores y mayores que la de la sobrecarga, esto depende de los esfuerzos tectónicos de la localidad. Cuando las presiones críticas son alcanzadas, tales fracturas pueden ceder y admitir lodo; una fractura que ha comenzado a admitir lodo, puede ampliarse y admitir más lodo a más baja presión (fig. IV.4).

En este tipo de fractura, basta solamente con que la presión hidrostática sea ligeramente mayor que la de la formación fracturada para presentarse la pérdida, la cual es por lo regular lenta y parcial, de continuar perforando al quedar expuestas un mayor número de fracturas, la

pérdida puede ser total. El fluido de perforación penetra estas fracturas permitiendo que la presión actúe en direcciones perpendiculares a sus planos, aumentándolas de tamaño.

La manera más efectiva para prevenir las pérdidas de circulación en fracturas naturales, es mantener al mínimo posible la densidad del lodo y evitar crear presiones de surgencia. Los materiales utilizados para remediar pérdidas de circulación pueden ayudar a prevenir la pérdida en un lodo de baja densidad y de bajo contenido de sólidos.

d. Inducción de fracturas.

Son debidas a una excesiva presión del fluido de perforación sobre la formación (fig. IV.5), es por esto que la principal recomendación para evitar este tipo de problemas, es mantener esta presión al mínimo y para lograrlo es conveniente:

- Mantener el peso del lodo lo más bajo posible.
- Conservar lo menos viscoso el fluido de perforación.
- Bajar o subir la tubería de perforación a velocidades adecuadas.
- Iniciar suavemente el bombeo del fluido de perforación.

Las fracturas inducidas pueden algunas veces sellar

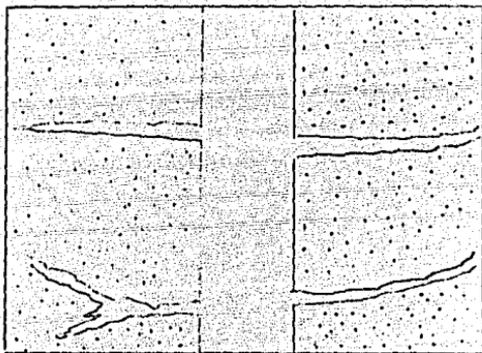
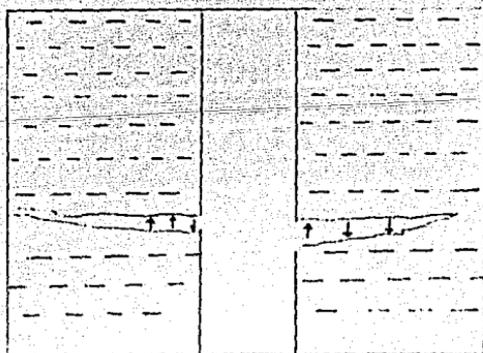


Figura IV.4. Fracturas Naturales.

Figura IV.5. Formaciones fácilmente
fracturables.

con el tiempo, en un periodo de espera de 6 a 12 horas, - despues de haber perdido la circulación; se puede circular lodo de la misma densidad controlando cuidadosamente las propiedades del flujo y el manejo de las herramientas de perforación.

Se han observado varios casos donde la mayoría del lodo perdido regresa después de suspender el bombeo, tales retornos del flujo pueden conducir a una mala interpretación en ese flujo de lodo con la bomba parada.

Todo pozo en perforación, cualquiera que sea su profundidad, si el fluido no está circulando, en el fondo se ejerce una presión hidrostática que depende exclusivamente de la profundidad vertical del pozo y de la densidad del fluido. Al iniciarse la circulación se presentan dos presiones, la presión hidrostática más la presión necesaria para hacer circular el lodo por el espacio anular hacia la superficie. La suma de estas dos presiones representa el valor de la presión de circulación de fondo.

Por lo tanto (en el fondo del pozo), estas dos presiones vienen a modificar aparentemente la densidad del fluido y a esta densidad resultante siempre superior a la original, se llama Densidad Equivalente de Circulación.

Las propiedades reológicas del fluido de perforación

que afectan a la densidad equivalente de circulación son el punto de cedencia (Y_p) y la viscosidad plástica (V_p).

Mientras mayor sea la densidad equivalente de circulación, habrá un consumo excesivo de potencia de la bomba para circular el lodo, y sobre todo, será más factible - inducir pérdidas del mismo a la formación, principalmente en zonas de fácil fracturamiento.

Tabla IV.1.

Características para identificar las zonas de pérdida de circulación.

- | | |
|------------------------------|---|
| Formaciones no consolidadas. | <ul style="list-style-type: none"> - Disminución gradual del nivel de lodo en las presas. - La pérdida se puede convertir en total si se continúa la perforación. |
| Fracturas naturales. | <ul style="list-style-type: none"> - Pueden ocurrir en cualquier tipo de roca. - La pérdida es observada por una disminución gradual del nivel del lodo en las presas. Si se exponen más fracturas, se puede presentar una pérdida total del fluido. |
| Fracturas inducidas. | <ul style="list-style-type: none"> - Pueden ocurrir en cualquier tipo de rocas, pero podrían ser esperadas en formaciones con características de planos débiles. - La pérdida usualmente es súbita y acompañada de una pérdida total del fluido. Una de las condiciones que nos conducen a la formación de frac |

turas inducidas es cuando el peso - del lodo excede a la densidad equivalente de fractura de las formaciones expuestas.

- La pérdida puede continuar despues de una repentina presión de surgencia, (repentino incremento de la presión hidrostática por efecto de pistoneo al introducir la barrena.)
- Cuando ocurre la pérdida de circulación y los pozos vecinos no experimentaron pérdidas de circulación, se debe pensar en una fractura inducida.

Zonas caver
nosas.

- La pérdida del fluido puede ser súbita y total.
- La barrena puede caer desde unos -- centímetros hasta unos metros, justo antes de la pérdida.
- La perforación puede tornarse aspera antes de la pérdida (trepidación, golpeteo).

Severidades de la pérdida
de circulación.

1. Pérdidas por filtrado (19 a 1590 l/h). Ocurren en -- cualquier tipo de formación porosa y permeable, cuando los materiales con que se fabrica el lodo de perforación no son lo suficientemente finos para formar un sello y evitar que el agua del lodo penetre en la formación.
2. Pérdida parcial (1.60 a 7.00 m³/h). Ocurren en formaciones constituidas por gravas, en formaciones con -- fracturas inducidas muy pequeñas y en formaciones con fracturas naturales.
3. Pérdida total. Abatimiento del nivel de la columna -- del lodo sin retorno a la superficie, se presentan en formaciones cavernosas y en extensas fracturas naturales e inducidas.

IV.3. Técnicas para controlar las pérdidas de circulación de lodo empleadas en la perforación de pozos para explotación de agua.

A continuación se van a describir tres técnicas empleadas para controlar las pérdidas de circulación en la perforación de pozos para la explotación de agua, las cuales últimamente se han empezado a emplear en la región de la Cuenca de México. Este tipo de técnicas son las más comúnmente empleadas y se espera diversificarlas en poco tiempo.

Técnica 1.

Esta técnica es denominada "sacar y esperar". Consiste en levantar la sarta de perforación hasta la zapata manteniéndola ahí durante un determinado periodo de tiempo. Se aplica cuando se presentan pérdidas parciales en fracturas inducidas.

La sarta de perforación se levantará y se mantendrá ahí durante un periodo de 4 a 8 h sin efectuar alguna intervención al pozo. Durante el periodo de espera puede prepararse una mezcla de 4 m^3 de lodo con material obturante, o una lechada de alta pérdida de agua; después de dicho periodo de espera, puede bajarse la sarta len-

tamente para evitar la ruptura de la formación y, mediante circulación, se aplica la mezcla que se preparó.

Esta técnica regularmente se aplica en fracturas inducidas profundas.

Técnica 2.

Colocación de un tapón de materiales obturantes. Esta técnica se aplica cuando se presentan pérdidas parciales y muy pocas veces en pérdidas totales. A continuación se explica como se prepara y coloca el tapón de materiales obturantes.

1. Determinar el punto aproximado por donde se está perdiendo el lodo, la densidad del lodo, nivel estático y la severidad de la pérdida. Si se sospecha de una fractura en la formación debido a la presión de surgencia al observar variaciones en la presión de bombeo, lo más probable es que el punto de pérdida se encuentre abajo de la zapata de la última tubería de revestimiento.
2. Sacar la sarta de perforación eliminando las toberas de la barrena o dejar la tubería de perforación franca, de acuerdo con el tamaño del material obturante, para evitar el taponamiento de la misma, y situarla frente a la zona problema para posteriormente, mediante circulación, aplicar el tapón de la

mezcla que a continuación se describe su elaboración.

3. Mezclar en proporción necesaria, de 16 a 70 m³ de lodo con material obturante granular, fibroso y laminar (gruesos, medios y finos, ver tabla IV.2).

Procedimiento:

Agregar de 29 a 57 kg/m³ de bentonita a 13 m³ de agua, la cual ha sido preparada con 1.5 kg/m³ de carbonato de sodio y 0.7 kg/m³ de sosa cáustica para eliminar los iones de calcio y magnesio.

Mezclar bien la bentonita para obtener un mejor rendimiento. Agregar 1.5 kg/m³ de cemento.

Agregar 14 kg/m³ de una mezcla de material fibroso medio y grueso (madera o caña de azúcar), 14 kg/m³ de una mezcla de material fibroso fino y medio (madera, caña de azúcar, fibras) y 14 kg/m³ de recortes de papel celofán. Agregar 43 kg/m³ de cáscara de nuez o una mezcla de corteza de nogal con cáscara de nuez, estos materiales pueden sustituirse por otros granulares gruesos. El tamaño de los obturantes, está en función de la severidad de la pérdida. Se disminuirá el filtrado del tapón únicamente para evitar un derrumbe en el agujero.

La densidad del lodo de perforación deberá incrementarse frente a determinadas formaciones, para controlar las presiones de las mismas. Los materiales obturantes

pueden agregarse a todos base agua de acuerdo con el tipo de pérdida de circulación.

4. Colocar el tapón utilizando la tubería de perforación franca frente a la zona de pérdida. Bombear a un gasto de 160 l/min hasta que se elimine la pérdida. Si no se tiene éxito, repetir una vez más el procedimiento, si después del segundo intento no se logra controlar la pérdida, aplicar la técnica 3. Si se llega a llenar el agujero, no quiere decir que se ha resuelto el problema, en tal caso, inyectar por el espacio anular con una presión de 3.5 kg/cm^2 durante 30 minutos.
5. Si se restablece la circulación y el lodo empleado contiene pocos sólidos, proceder a eliminar el material obturante.

Técnica 3.

Inyección de una lechada de alta pérdida de agua.

Esta técnica se emplea cuando se presentan pérdidas parciales y muy pocas veces contra pérdidas totales.

La preparación y aplicación de la lechada de alta pérdida de agua, varía de acuerdo con el tipo de pérdida, la diferencia principal entre las lechadas, es el ta

maño de los materiales obturantes, el cual está en función del tipo de formación.

Se determinará la severidad de la pérdida, tomando en cuenta el nivel estático del lodo en el agujero y la intensidad de la misma, a continuación se determinará la localización aproximada de la zona y el tipo de formación. Si la presión de bombeo varía continuamente es probable de que se trate de una fractura en la formación, situada inmediatamente abajo de la zapata.

a. Pérdida parcial.

1. Preparar 16 m^3 de lechada de cemento.

A 13 m^3 de agua, agregar de 29 a 43 kg/m^3 de atapulgita o sepiolita. Si no se dispone de este tipo de arcillas, entonces preparar el agua de la siguiente manera: agregar 1.5 kg/m^3 de cemento, 143 kg/m^3 de tierra de diatomeas o caliza molida. Utilizar bari-ta si la densidad del lodo debe ser de 1.40 g/cm^3 - en adelante.

Agregar 23 kg/m^3 de material obturante granular (cáscara de nuez o almendra), 11.4 kg/m^3 de material fibroso medio (caña de azúcar o madera), 3 kg/m^3 de material fibroso fino (caña de azúcar, papel periódico o fibras), 9 kg/m^3 de papel celofán.

2. Colocar la tubería de perforación franca en la parte superior o frente a la zona de pérdida.
3. Desplazar 4 m^3 de lechada en la zona de pérdida a razón de 0.3 a $0.7 \text{ m}^3/\text{min}$.
4. Interrumpir la operación durante 20 ó 30 min.
5. Desplazar otros 4 m^3 de lechada a un gasto de 0.3 a $0.7 \text{ m}^3/\text{min}$.
6. Continuar con el procedimiento alternadamente esperando y desplazando, hasta llenar el pozo. La tubería de perforación deberá moverse hacia arriba y hacia abajo para evitar una pegadura.
7. Al llenar el agujero se deberán cerrar las válvulas de salida del lodo y desplazar la lechada lentamente a razón de $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ hasta alcanzar una presión de 3 kg/cm^2 . Una vez alcanzada la presión mantenerla durante 30 ó 60 min.
8. Sacar la tubería, conectar la barrena y bajar para continuar perforando.

b. Pérdidas totales.

Se aplica el procedimiento de las pérdidas parciales. Excepto la composición de la lechada.

1. Agregar 23 kg/m^3 de material obturante granular (cáscara de nuez o de almendra de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ "), 9 kg/m^3 de ma

terial fibroso medio y grueso (madera o caña de azucar) 9 kg/m³ de una mezcla de material fibroso fino y medio (madera, caña de azucar, fibras, etc) y 9 kg/m³ de celofan.

Los siguientes pasos son similares a los de las pé-
ridas parciales.

IV.4. Materiales para combatir las pérdidas de circulación.

Uno de los métodos empleados para controlar las pérdidas de circulación del fluido de perforación, -- consiste en agregar materiales obturantes al fluido y circularlos a través de la zona de pérdida, con el -- fin de introducirlos a los poros o fracturas por donde se está perdiendo el lodo, formandose con ésto y -- las arcillas propias del lodo un sello por medio de -- dichos materiales. Por lo tanto, los materiales obturantes son aditivos del lodo de perforación empleados para evitar la pérdida hacia la formación perforada.

A continuación se van a describir algunos de los -- materiales que más se emplean en este tipo de traba-- jos.

1. Materiales fibrosos.

Los obturantes fibrosos son principalmente fibras_ de plantas, aún cuando se tienen también fibras de -- animales y minerales, así como fibras sintéticas como vidrio, rayón y asbesto. La longitud máxima de las fi bras es de mayor importancia en su uso y provecho que el material de que está compuesto.

La naturaleza física y química del material presenten

tan ciertas limitaciones, tanto como la graduación de tamaño y la resistencia a su desintegración así como la degradación cuando se circula en el sistema de lodo.

El tamaño máximo de las fibras de asbesto es, por ejemplo, más pequeño que el obtenido con bagazo o fibras de corteza; el bagazo y el algodón en rama exhiben mayor resistencia a la desintegración que algunos materiales como el musgo.

El más efectivo de los obturantes fibrosos sella arenas y gravas de aberturas de hasta 5/8" de grueso o espesor, la efectividad sobre grietas y fracturas parece limitarse a aberturas menores de 1/8" de ancho para los materiales más finos.

- Paja. Son fibras de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{8}$ ", su concentración recomendada es de 29 a 34 kg/m³ para fracturas de hasta 1/8".
- Aserrín. Son partículas de 1/16 a $\frac{1}{4}$ ", su concentración es de 29 kg/m³ para fracturas de 1/12", en tamaños de 1/16" su concentración es de 57 kg/m³.
- Corteza de semilla de algodón. Son fibras de 3/8" - de tamaño, se usa con una concentración de 29 kg/m³ para fracturas de 1/8".
- Madera desmenuzada. Son fibras de $\frac{1}{4}$ " de tamaño, su concentración es de 23 kg/m³ para fracturas de ----

1/12" de ancho.

- Dril seal. Material fibroso a base de asbesto, usado principalmente como obturante en agua salada, -- mezclado con el "drilcon" su concentración es de -- 15 kg/m³ de agua salada.

2. Materiales granulares.

Los obturantes de este tipo más usados incluyen a la perlita, cáscara de nuez, hule molido, bentonita gruesa, asfalto quemado, gilsonita, ladrillo y carbónatos. Los obturantes granulares en grados de tamaños adecuados, son efectivos en gravas de 3/4", aún cuando la perlita no selle gravas de 3/8 a 1/2".

Sobre las fracturas, la perlita es efectiva en las de 1/8", la cáscara de nuez de tamaño normal (malla - 10 ó más fina) es efectiva en las de 2/8" de tamaño, y el plástico molido es efectivo en las fracturas de 1/4" o cerca del doble del tamaño de la grieta que puede ser sellada con obturante fibroso o laminar.

- Cáscara de nuez. Triturada y graduada en forma granular, está disponible en tres tamaños: gruesa, mediana y fina. Las fracturas anchas frecuentemente se taponan y su gran fuerza mecánica permite que al tas columnas de cemento detrás de la tubería resistan mediante el sello de la cáscara de nuez.

La cáscara de nuez de tamaño medio a grueso se usa en concentraciones de 1 a 5 lb por cada saco de cemento en tareas de cementación de las tuberías de revestimiento. Con cáscara de nuez y cemento se recomienda un mínimo de 4% de bentonita para facilitar el bombeo de la lechada. La bentonita tiene la ventaja de aligerar el peso de la columna de cemento. A diferencia de la gilsonita, la cáscara de nuez puede ser utilizada a grandes temperaturas, sin embargo, el efecto de obturante es muy similar en zonas de pérdidas de circulación. Químicamente es inerte, su densidad es de 1.28 g/cm^3 .

- Gilsonita. Mineralógicamente la gilsonita está clasificada como un hidrocarburo natural en forma de granulos; se utiliza para preparar lechadas de cemento de baja densidad y para controlar grandes pérdidas de circulación. Su densidad es de 1.07 g/cm^3 , su requerimiento de agua es de 0.333 l/kg , aumenta el volumen de la lechada de cemento pero no incrementa el peso de la misma.

No acelera ni retarda los tiempos de fraguado, su principal efecto es reducir la densidad de la lechada y sus efectos menores son la de incrementar el agua para mezcla reduciendo la resistencia inicial y final del cemento.

No tiene efecto alguno sobre la viscosidad, tiempo de bombeo y filtrado.

De 6 a 14 kg por saco de cemento es generalmente la cantidad adecuada para controlar casi cualquier zona de pérdida de circulación, con excepción de -- las más graves en formaciones débiles. Permite el uso de lechadas de 1.5 a 1.6 g/cm³ con excelentes resultados de cementación.

Su característica de obturante granular es lo suficientemente fuerte para soportar presiones de inyección moderada y lo bastante blanda para permitir la deformación bajo presión, proporcionando un sello efectivo contra la pérdida de circulación.

- Perlita expandida. Es una roca volcánica (mineral de perlita) la cual es tratada con calor para formar un material granular con huecos o estructuras celulares. Se utiliza como obturante en formaciones porosas y fracturadas. Sus efectos principales son los de reducir la densidad de la lechada de cemento e incrementar el volumen de agua para mezcla y sus efectos menores son los de reducir la resistencia inicial y final a la compresión del cemento.

No produce efecto alguno sobre la viscosidad, tiempo de bombeabilidad y filtrado.

Para evitar que la perlita flote, se deberá in--

crementar del 2 al 6% de bentonita para aumentar la viscosidad. Comúnmente se usa en una concentración de 14 a 50 kg por saco de cemento.

El peso de la lechada disminuido de esta forma y el efecto granular de obturante hacen a este tipo de lechadas apropiado para cementar zonas de pérdidas de circulación.

- Perlita seis. Es una mezcla de perlita expandida y "Pozmix A" (aditivo para cemento), se utiliza como agente obturante en formaciones porozas y fracturadas. Su requerimiento de agua es de 1.27 l/kg y se utiliza en concentraciones de 14.7 a 58 l/sc.

Sus dos efectos principales son los de reducir la densidad de la lechada e incrementar el agua para la mezcla, sus efectos menores son los de incrementar el tiempo de bombeo, reducir la resistencia inicial y final del cemento y no tiene efecto alguno sobre la viscosidad y filtrado de la lechada.

- Pedacería de ladrillo. Cuando se está perforando y se observa una pérdida total de circulación, se debe tener la seguridad de que la pérdida es en el fondo del agujero.

El procedimiento consiste en arrojar por gravedad un volumen de pedacería de ladrillo equivalente a 10 ó 15 m de longitud por el área del agujero, ba

jar con barrena a la cima del tabique y aplicar peso hasta que la pedacería quede a la mitad de la zona de pérdida, intentar circular con el gasto mínimo que la bomba del equipo pueda proporcionar; en el caso de obtener circulación continuar aplicando peso y un poco de rotación hasta llegar al fondo, si no se restauró la circulación, formar bolas con bentonita, aserrín y un poco de agua, arrojarlas -- por gravedad y en seguida otro volumen de pedacería de ladrillo, circular para verificar el retorno del fluido de control, si existe circulación, rebajar el ladrillo y continuar perforando; en caso de continuar la pérdida intentar repetir la operación.

- Bentonita de alto rendimiento. Esta arcilla, debido a sus propiedades coloidales, absorbe y mantiene varias veces su peso en agua, proporcionando así un gel-cemento de la más alta calidad. Algunas de sus ventajas son aumentar el volumen real de la lechada, este mayor volumen se debe a las propiedades de absorción del agua de la arcilla coloidal, la cual requiere un volumen mayor de agua de mezcla para mantener una lechada bombeable.

El peso de la columna de cemento se reduce cuanto mayor sea el porcentaje de esta bentonita y mayores serán los requerimientos de agua y menor el pe-

so de la lechada. Este factor es útil en áreas donde las formaciones no resisten presión hidrostática alta y donde se requiere la circulación de la lechada de cemento hasta la superficie.

La bentonita, en lechadas de cemento, mejora las características de suspensión para mantener mejor distribución de otros aditivos como el Flocele, perlitas, etc. La sedimentación de las partículas de cemento o la separación del agua de la lechada también se reduce al mínimo y disminuye así la causa principal de la formación de bolsas de agua en la columna de cemento fraguado detrás de la tubería de revestimiento.

- Circotex (obturante granular calcáreo). Es una mezcla de diferentes tamaños de carbonatos, de peso específico igual a 2.76 g/cm^3 .

Está diseñado para sellar los poros de la formación y permitir que el material para filtrado construya un buen enjarre.

Puede ser agregado directamente a cualquier sistema para mezclado. Es efectivo en situaciones difíciles de pérdidas donde son requeridas características de sello superiores. Bajo estas condiciones, de 29 a 143 kg/m^3 de Circotex deberán ser agregados a una lechada compuesta por lignosulfonatos, polímeros sintéticos y partículas de diferentes tamaños -

de carbonatos.

3. Materiales laminares.

Estos materiales son efectivos para sellar pequeñas fracturas y como aditivo para controlar pérdidas por filtrado.

Los obturantes laminares más comunes son el celofán la mica y la cáscara de semilla de algodón. Tanto el celofán como la mica, se encuentran disponibles en tamaños grueso y fino. El tamaño grueso es efectivo en gravas gruesas y sobre fracturas de hasta 1/8"; el tamaño fino es efectivo en gravas de grado medio y fracturas hasta de 1/16"; los tamaños más finos de las micas pasarán a través de malla #12, permitiendo la eliminación de algunos recortes mientras se circula con material obturante en el lodo.

- Escamas de celulosa (celofán). Es útil para minimizar las pérdidas en formaciones permeables durante la cementación de tuberías de revestimiento y se usa también como aditivo contra pérdidas de circulación del lodo de perforación.

Es químicamente inerte, no afecta la resistencia del cemento, se mezcla y se maneja fácilmente en bombas; para ser utilizado en cemento se recomiendan las escamas de 3/8".

La masa de la escama por unidad de peso es grande

y los compuestos de cementación de $\frac{1}{4}$ a 1% en peso -- previenen la pérdida de cemento o fluido de perforación en muchas formaciones permeables. Para condiciones extremas se usan mayores porcentajes.

Las escamas de celulosa pueden suministrarse como aditivo o premezclado con cemento a granel para trabajos de cementación.

4. Lechadas de fraguado rápido.

Son lechadas ligeras que forman materiales semisólidos cuando se mezclan con agua o lodos de perforación.

La lechada de cemento, al estar en contacto con la formación y someterse a presión, pierde agua y comienza a fraguar de inmediato.

Los cementos que se utilizan son especiales para la fabricación de la lechada, y ésta, al bombearse en la vecindad de la zona de pérdida produce buenos efectos de sello.

Concentración	Abertura de la ranura por sellar.	Prueba de decarga estática. Volumen final a 1000 psi.	Prueba estática de calma de balines. Volumen final a 1000 psi.		Prueba de Shot Bed. Volumen final a 1000 psi.
			ml	sella	
1b/bl	pg	ml	ml	ml	ml
10	0.10	500	total	no	1700 si
20	0.13	250	1900	si	2050 si
30	0.16	400	1700	si	800 si
40	0.20	300	1700	si	1800 si

Tabla IV.2. Funcionamiento de las concentraciones de varias mezclas de materiales obturantes en el lodo.

Capítulo V.

Conclusiones.

1. En el presente trabajo se presentaron algunos de los métodos que se emplean para controlar las pérdidas - de circulación en la perforación de pozos para explotación de agua subterránea en la Cuenca de México.

Aunados a los anteriores, se deben de incrementar las técnicas para resolver este tipo de problemas, - ya sea consultando a los institutos de enseñanza superior, empresas de servicios e institutos de investigación (Instituto Mexicano del Petróleo, Instituto de Investigaciones Eléctricas).

2. Los Ingenieros que se encargen de realizar la perforación de pozos para extracción de agua, deben de estar capacitados para poder realizar este tipo de trabajos, además de comprender lo que sucede en el subsuelo al momento de penetrarlo con las herramientas de perforación.
3. Los análisis de costos son imprescindibles en las tareas de toma de decisiones por lo que se debe de abundar en el tema en los centros de enseñanza.

4. Son notables los incrementos de costos debido a las pérdidas de circulación, por lo que debe de continuar las investigaciones en campo y en laboratorio - para reducirlos.

Bibliografía.

1. Hidrología subterránea (Vol. I y II). Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón. Ed. Omega, S. A. Barcelona, 1976.
2. Técnicas y análisis de costos de pozos profundos y aguas subterráneas. Vargas Alcántara, Vicente. Ed. Limusa, S. A. México, 1980.
3. El equipo rotatorio y sus componentes. Instituto Mexicano del Petróleo. México, 1980.
4. Manual Drilco de conjuntos de perforación. Smith Internacional. Houston, Texas. 1988.
5. "Cómo perforar un pozo". World Oil. Gulf Publishing. Houston, Texas. Septiembre, 1976.
6. Especificaciones y Técnicas generales para la construcción y rehabilitación de pozos. Comisión Nacional del Agua. México. Julio, 1992.