

37
2 y



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**"PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS EN EL
CAMPO CERRO PRIETO"**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TITULO DE:
Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A:
*Miguel Angel Terrazas Avila***

México, D. F.

1985



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.

I N D I C E

	PAG.
CAPITULO I	
INTRODUCCION	1
CAPITULO II	
GENERALIDADES	2
II.1 La energía geotérmica	2
II.2 Yacimientos geotérmicos	2
II.3 Usos de la energía geotérmica	5
CAPITULO III	
PERFORACION Y PROBLEMAS ESPECIFICOS EN EL CAMPO CERRO PRIETO	6
III.1 Geología del Campo	6
III.2 Descripción general de equipo de perforación rotatoria para pozos geotérmicos	13
III.3 Fluido de perforación	23
III.4 Perforación	33
III.5 Tuberías de revestimiento	68
III.6 Cementaciones	78
CAPITULO IV	
TERMINACION DEL POZO	100
IV.1 Criterio de terminaciones	100
IV.2 Etapas para iniciar la producción	108
CAPITULO V	
CONCLUSIONES	122

CAPITULO I.

INTRODUCCION.

Actualmente México es un país en vías de desarrollo con alto índice de crecimiento demográfico y por consiguiente con gran demanda de un número infinito de necesidades para sus habitantes, tarde o temprano se enfrentará a uno de los problemas más grandes que vislumbra el mundo en la actualidad: la falta de recursos energéticos convencionales para satisfacer sus necesidades primarias.

En materia de energéticos reclamados en la vida moderna, han sido fuente de éstos, los hidrocarburos, el carbón, la potencialidad hidráulica en desniveles de rios y últimamente de energía atómica, pero casi todos éstos recursos son limitados. Día a día disminuyen, por lo que es necesario encontrar nuevas fuentes de energía que aseguren el bienestar de las futuras generaciones.

Los yacimientos geotérmicos se consideran una fuente no convencional de energía, y en México es evidente que el aprovechamiento de la energía geotérmica se ha iniciado apenas en las últimas décadas, por lo que se considera que estamos viviendo la etapa de arranque de la explotación de los campos geotérmicos de nuestro país, que cuenta con un gran potencial en este tipo de energía.

La explotación de un campo geotérmico requiere la perforación de pozos al igual que la explotación de un campo petrolero. La perforación de pozos en un proyecto geotérmico abarca aproximadamente el 60% del costo total del proyecto, lo cual es un indicador de la importancia de perforar pozos correctamente.

Este trabajo se realizó con el fin de dar a conocer en términos generales los trabajos de perforación de un pozo geotérmico en el Campo "Cerro Prieto", en el estado de Baja California Norte.

CAPITULO II.- GENERALIDADES.

II.1. ENERGIA GEOTERMICA

El calor natural de nuestro planeta normalmente se encuentra a grandes profundidades, pero existen ciertas zonas en las que se localiza a profundidades relativamente someras. Si en alguna de estas zonas existen además - acuíferos, el calor es transferido a estos cuerpos debido al fenómeno de -- convección, y el agua al calentarse almacena una considerable cantidad de - energía calorífica, se tiene como resultado lo que se conoce como energía - geotérmica.

II.2. YACIMIENTOS GEOTERMICOS

Un yacimiento geotérmico es una acumulación subterránea de agua con -- una considerable cantidad de energía calorífica en un receptáculo limitado- por barreras geológicas.

Para que el fluido geotérmico se acumule en un yacimiento se requieren ciertas condiciones esenciales como son:

- A).- Una fuente de calor relativamente somera.
- B).- Un acuífero abierto sobre la fuente de calor.
- C).- Una roca sello que impida que el agua del acuífero bajo presión y - -- temperatura emigre hacia la superficie.
- D).- El yacimiento debe tener la forma de una trampa que contenga al fluido geotérmico y le impida moverse en sentido lateral por efecto de la --- presión de la recarga del acuífero.

Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse de acuerdo a su -- - temperatura y presión original en relación a un diagrama de fases "Presión Temperatura".

La figura II.2.1. Muestra un diagrama de este tipo, en el cual se --- señala el punto crítico del agua y otros cinco puntos que representan

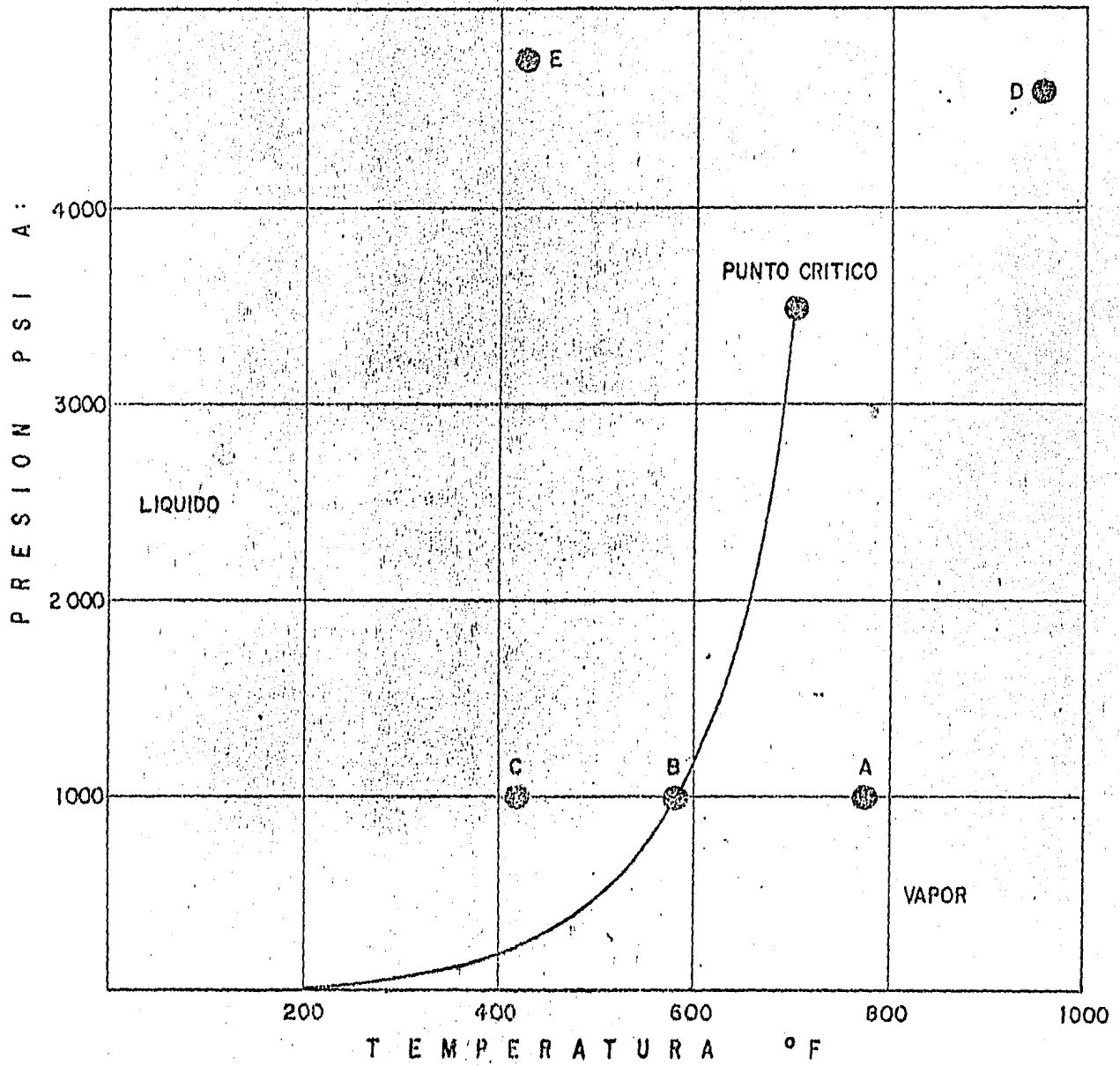


FIG.II.2.1. DIAGRAMA PRESION-TEMPERATURA PARA EL AGUA.

posibles condiciones iniciales para un yacimiento geotérmico,

Para simplificar esta exposición se supone que no existe recarga de fluidos al yacimiento, o sea se limitará al caso más simple de un sistema cerrado.

El punto A corresponde a un yacimiento cuyas condiciones iniciales se localizan en la fase vapor. El proceso de producción del vapor es aproximadamente isotérmico.

El punto B corresponde a un yacimiento en el cual las condiciones iniciales coinciden con la curva de presión de vapor, en donde dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, la producción del yacimiento puede variar desde agua saturada con vapor a vapor saturado, o cualquier mezcla de agua y vapor con una entalpia que va desde la del agua hasta la del vapor, a las condiciones específicas de presión y temperatura. (Entalpia es el contenido de energía calorífica de un sistema, y está en función de su energía interna, presión y volumen).

El punto C representa a un yacimiento geotérmico que a condiciones iniciales contiene agua caliente. Diferiendo del punto A en que eventualmente al declinar la presión del yacimiento se alcanzarían condiciones que coinciden con la curva de vapor. El mecanismo de producción a partir de aquí será similar al del caso B. Para condiciones de presión superior a la presión de vapor, el flujo en el yacimiento será aproximadamente isotérmico e isoentálpico.

Los puntos (D y E) representan la posibilidad de dos condiciones iniciales adicionales. El punto D está a una temperatura más elevada que la crítica, y representa a un yacimiento geotérmico el cual, al declinar la presión, alcanzará condiciones similares a la del yacimiento de vapor cuyas condiciones iniciales están dadas por el punto A. El punto E representa las condiciones iniciales de un yacimiento geotérmico, en el cual al declinar la presión, como consecuencia de la producción del fluido, se comportará en forma semejante a lo discutido para los puntos C y B.

II.3. USOS DE LA ENERGIA GEOTERMICA.

Los fluidos geotérmicos con baja entalpia pueden ser utilizados para procesos de calentamiento en industrias, en el calentamiento de habitaciones o en trabajos de agricultura especializados.

Los fluidos geotérmicos con alta entalpia se usan para generar energía eléctrica básicamente.

CAPITULO III.- PERFORACION Y PROBLEMAS ESPECIFICOS EN EL CAMPO CERRO PRIETO.

III.1. GEOLOGIA DEL CAMPO

El campo geotérmico de Cerro Prieto, está localizado en la planicie aluvial del Valle de Mexicali, aproximadamente a 30 km al Sureste de la ciudad del mismo nombre, como se indica en la figura III.1.1., en el estado de Baja California Norte, por lo tanto, en la región más Noroeste de nuestro país. La planicie aluvial del Valle de Mexicali, está constituida en partes por sedimentos cuaternarios de pie de monte de la Sierra Cucapah, y deltáicos depositados por las corrientes divagantes del Río Colorado, siendo la única prominencia dentro del Valle, el volcán Cerro Prieto. Los depósitos cuaternarios están sobreyaciendo a sedimentos cenozoicos metamorfizados, los que a su vez sobreyacen discordantemente sobre el basamento granítico del cretácico superior.

El actual campo de explotación, se localiza dentro del patrón tectónico denominado San Andrés, del cual se derivan diferentes ramales, siendo el ramal Cerro Prieto donde encontramos la zona geotérmica (ver figura III.1.2.).

Las unidades litológicas que conforman actualmente al campo, son tres, las unidades A, B y C, como se indica en la figura III.1.3.

La unidad litológica A, compuesta por sedimentos continentales no consolidados y semiconsolidados, a los que se les han asignado una edad cuaternaria no diferenciada, integrada por arcillas, limos, arenas y gravas en forma repetitiva. En la parte inferior de esta unidad y sobreyaciendo la unidad B, se presentan regularmente capas de lutitas semiconsolidadas de color café.

Esta unidad A, por su estado no consolidado y semiconsolidado, se comporta plásticamente al ocurrir movimientos telúricos, los que al provocar fracturamientos en los sedimentos son rápidamente cerrados por las

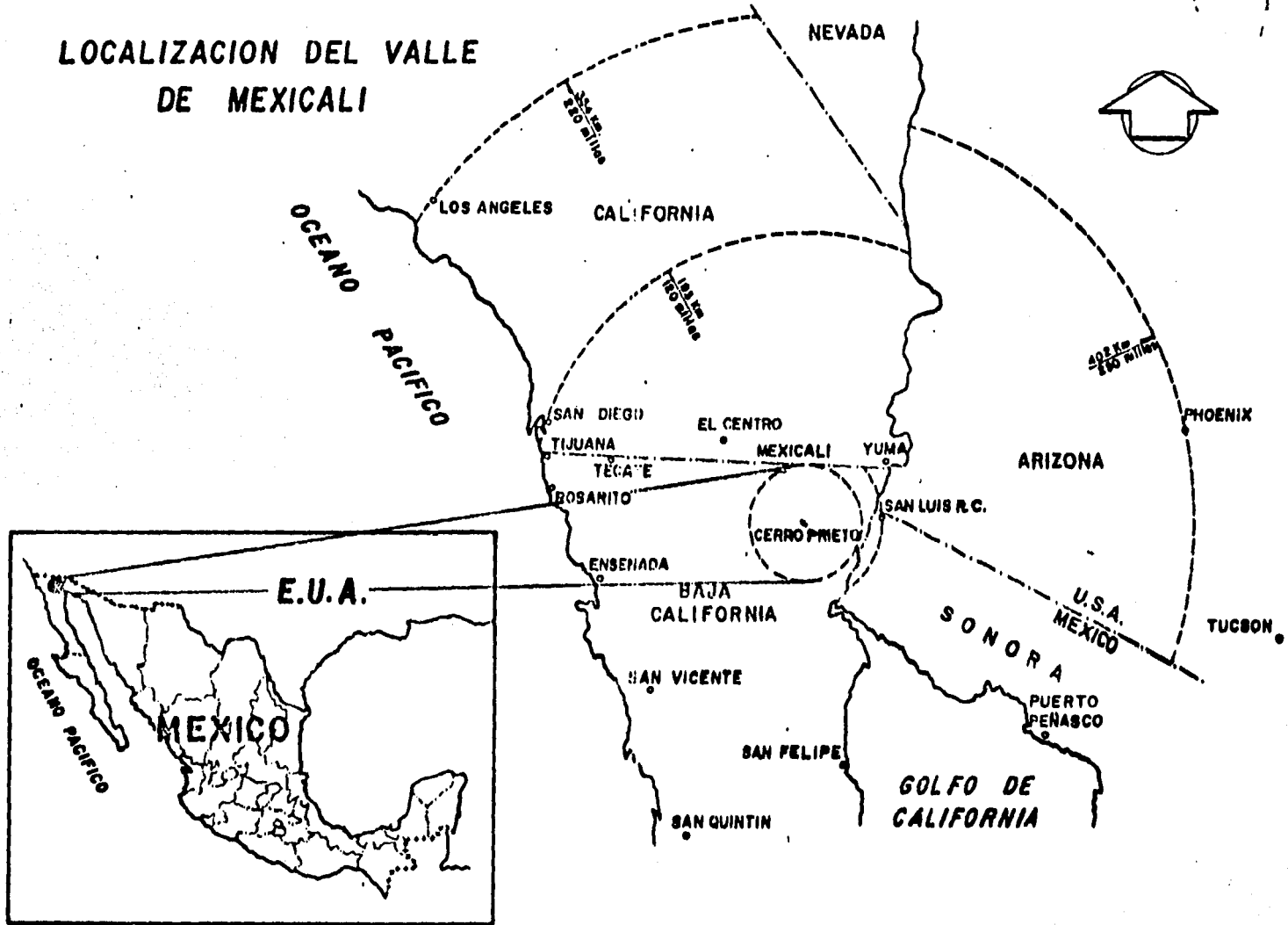


FIG. III.1.1. LOCALIZACION DEL CAMPO GEOTERMICO CERRO PRIETO.

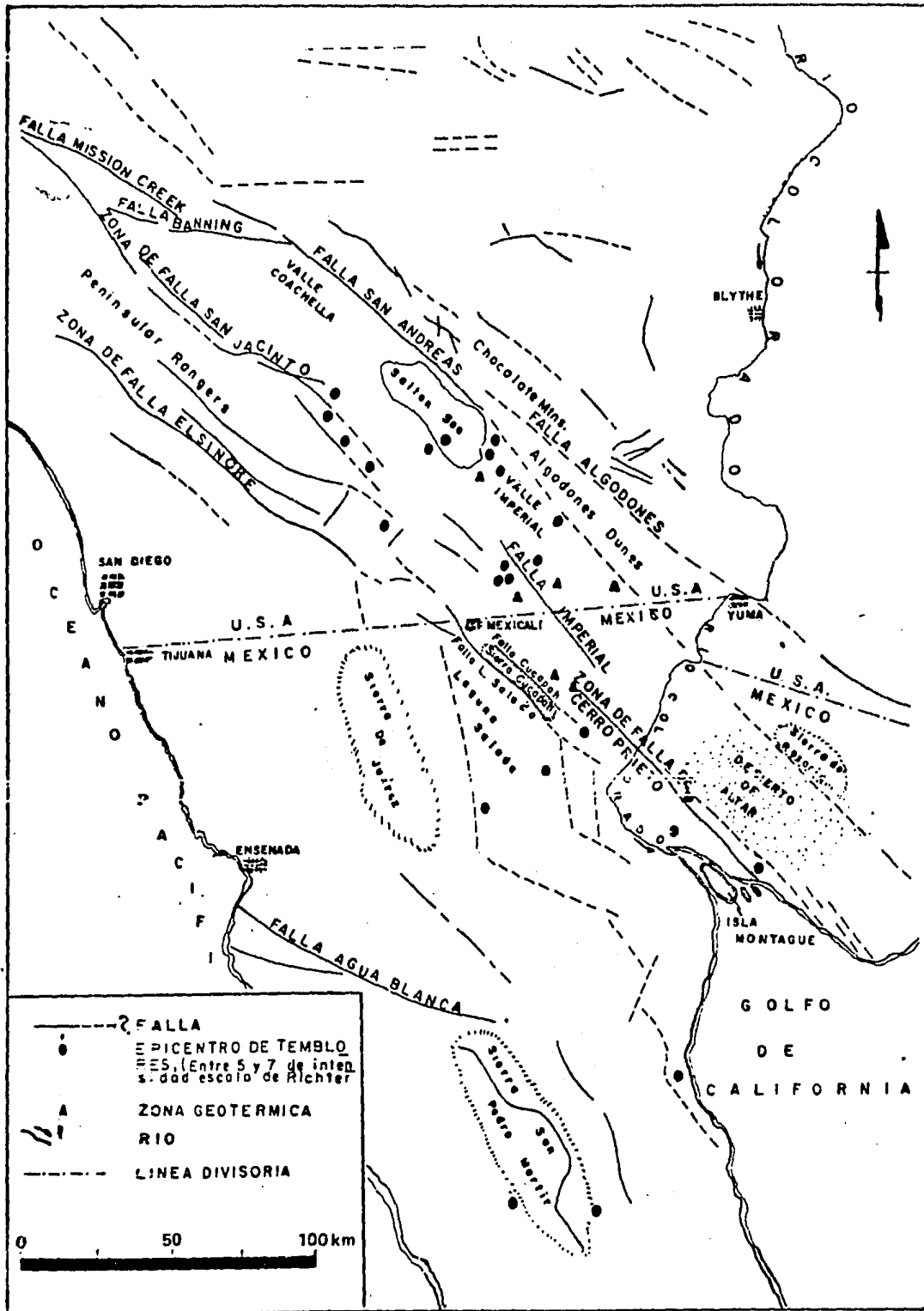


FIG. III.1.2. PATRON TECTONICO SAN ANDRES, DENTRO DEL CUAL SE LOCALIZA EL CAMPO GEOTERMICO CERRO PRIETO.

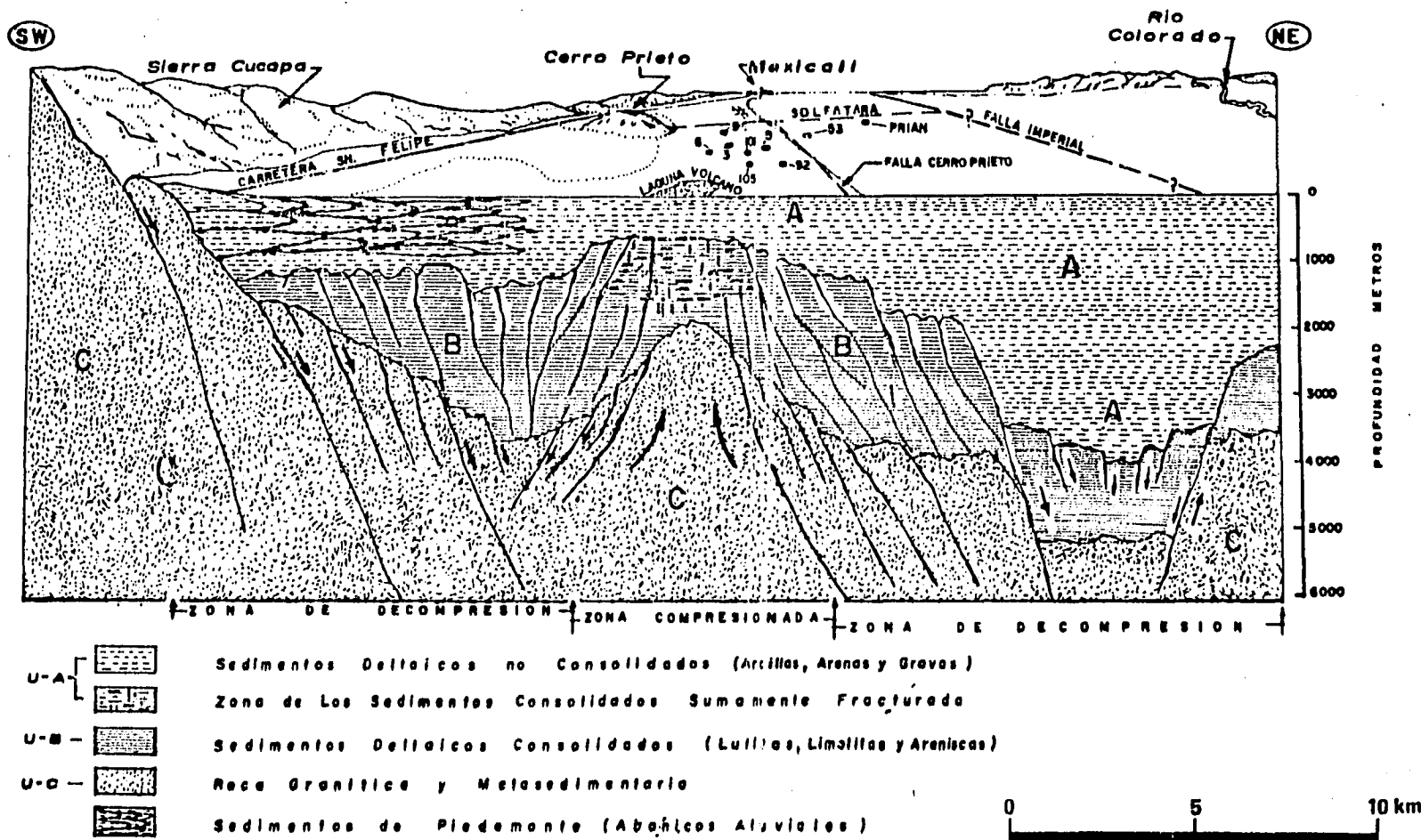


FIG. III.1.3. UNIDADES LITOLÓGICAS EN CERRO PRIETO.

arcillas y arenas. El espesor de esta unidad A, varía de 600 a 2500 m.

La unidad litológica B, está formada por sedimentos deltáicos consolidados del tipo continental y siendo su estratificación generalmente en forma lenticular.

De edad terciaria (aún no diferenciada), está integrada por una alternancia de lutitas, limolitas y areniscas. Las lutitas van de color gris claro a gris oscuro y en ocasiones negro en las partes muy metamorfozadas.

Las areniscas son principalmente de color gris claro, de grano fino bien seleccionado casi siempre, variando entre grauvaca y arcosa, y ocasionalmente a cuarcita.

Esta unidad B, por estar completamente consolidada, ha sido posible observar tanto en los recortes de perforación, como en los núcleos, las huellas del fracturamiento que tienen las rocas, como consecuencia de los efectos tectónicos ocurridos en la región.

Esta unidad es la que contiene entre sus horizontes permeables a los acuíferos de alta temperatura, considerando que las zonas fracturadas son los conductos principales por los cuales emigran los fluidos de agua caliente. Su espesor se estima entre 2000 y 2500 m.

La unidad litológica C, está compuesta por el basamento granítico del cretácico superior, estando representado en superficie, por una mayor parte de las rocas que forman la sierra Cucapah.

De los resultados obtenidos mediante los estudios geofísicos, así como de perforaciones, se ha inferido, que los bloques graníticos que forman el basamento en el Valle de Mexicali, fueron afectados por movimientos tectónicos ascendentes y descendentes. Los bloques predominantes ascendentes, se alinean a un rumbo general NW-SE, como se ilustra en la figura III.1.4., paralelos a la sierra Cucapah.

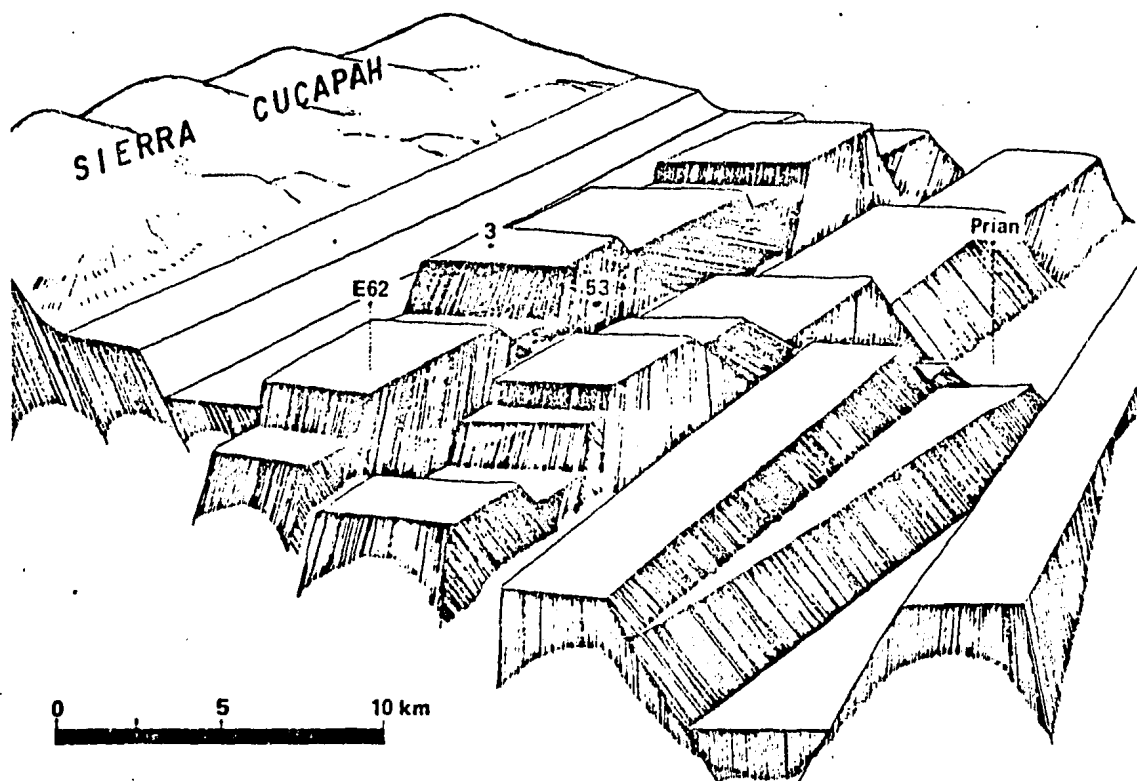


FIG. III.1.4. BLOQUES DE BASAMENTO PREDOMINANTES EN EL CAMPO CERRO PRIETO.

RESUMIENDO LO EXPUESTO ANTERIORMENTE; TENEMOS LA SECCION ESTRATIGRAFICA DEL CAMPO ILUSTRADA EN LA TABLA III.1.1.


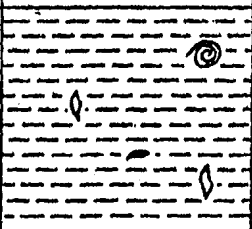
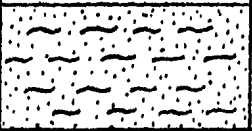
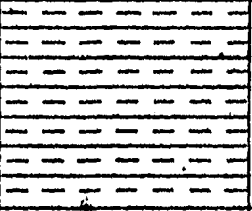
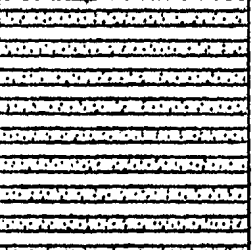
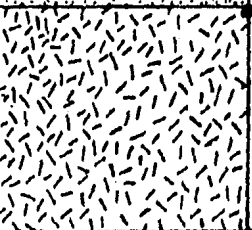
SECCION ESTRATIGRAFICA DEL CAMPO CERRO PRIETO					
ERA	PERIODO	EPOCA	PETROLOGIA	ESPESOR	DESCRIPCION LITOLOGICA
CENOZOICO	CUATERNARIO			500	ANDESITAS, ARCILLAS, ARENAS DE FINAS A GRUESAS, DE CUARZO, SILICE, FELDESPATOS Y ESCASAS GRAVAS.
		PLEISTOCENO		A 2300m.	
	TERCIARIO			1 A 100m.	ARCILLA ARENOSA Y ARENISCA.
				100 m.	LUTITA CAFE INTERCALADA CON ARENISCA.
			2 000 A 2 500m.	LUTITA GRIS A NEGRA ALTERNADA CON ARENISCA GRIS Y GRIS CLARO.	
MESOZOICA	CRETACICO	SUPERIOR		?	GRANITO BIOTITICO.

TABLA III. I. I. SECCION ESTRATIGRAFICA DEL CAMPO CERRO PRIETO.

III.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN ROTATORIA PARA POZOS GEOTERMICOS.

La función más importante de un equipo de perforación rotaria, es perforar. Perforar con un equipo rotatorio requiere no solamente de personal calificado, sino mucho equipo mecánico también.

Para efectuar una descripción general del equipo rotatorio la dividiremos en cuatro sistemas componentes principales:

- a) El sistema de energía.
- b) El sistema de Izaje
- c) El sistema rotatorio
- d) El sistema de circulación

Los últimos tres sistemas tienen varios componentes, pero todos requieren energía para funcionar.

a) SISTEMA DE ENERGIA

Casi todos los equipos de perforación utilizan motores de combustión interna para obtener la energía necesaria en su funcionamiento. La mayoría de los motores de hoy son diesel, aunque aún quedan motores que utilizan gas natural o líquido como combustible. Los motores de gas utilizan bujías para encender la mezcla de combustible y aire en sus cámaras de combustión, para producir energía. Los motores diesel no tienen bujías, en éstos, la mezcla de aire y combustible se enciende por el calor generado por la compresión dentro del motor.

Un equipo de perforación, dependiendo de su tamaño y la profundidad del agujero que tiene que perforar, puede tener de dos a cuatro motores. Naturalmente, mientras más grande sea un equipo, más profundo puede hacer el agujero y más energía utiliza. Por lo tanto un equipo grande tiene tres o cuatro motores que juntos producen 3000 o más C.V. (ver figura - III.2.1.). Una vez que ésta fuerza se desarrolla se debe transferir hacia los componentes del equipo para que éstos trabajen.

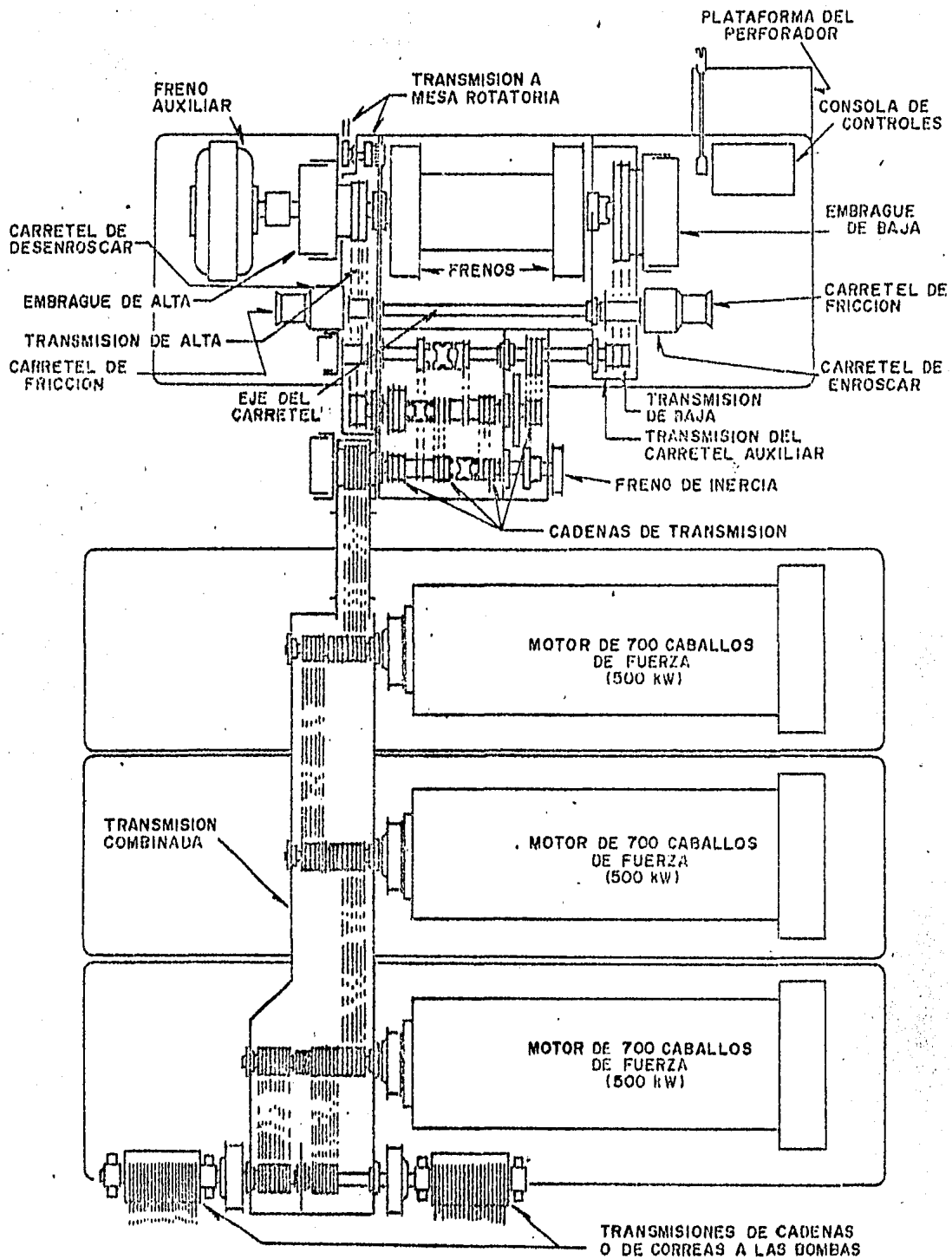


FIG.III.2.1. SISTEMAS DE TRANSMISION DE ENERGIA DE UN EQUIPO DE PERFORACION ROTATORIA CON MOTORES DIESEL.

Las fuerzas que producen cada uno de los motores, se unen a través de uniones hidráulicas o convertidores de torsión, los cuales igualan la fuerza desarrollada por cada motor, porque la fuerza del motor se transmite a través del fluido hidráulico (casi siempre un aceite ligero), para hacer girar un eje que sale del convertidor.

Los ejes de transmisión se unen mecánicamente con poleas y cadenas. Este arreglo de cadenas y poleas se conoce como una central de distribución porque compone o conecta la fuerza de varios motores para que toda la fuerza generada se pueda utilizar conjuntamente. La central de distribución a su vez, transmite la fuerza de los motores a través de una transmisión de cadenas adicionales hasta la mesa rotatoria y el malacate. Se utilizan por lo general bandas para hacer trabajar las bombas de lodo.

b) EL SISTEMA DE IZAJE

No importa el tamaño del equipo de perforación, su función es perforar, y para llevar a cabo su función, debe tener equipo para elevar otras piezas, (ver figura III.2.2). Básicamente el sistema de izaje está compuesto por los siguientes elementos:

1. Malacate
2. Mástil
3. Corona
4. Bloque Viajero
5. Cable de perforación

MALACATE.- Consiste de un cilindro ranurado alrededor del cual el cable de perforación se devana. Otra pieza del malacate es el cabezal de fricción que contiene el carrete de desenroscar tubería en un extremo y el de enroscar en la otra. También contiene otros engranajes, cabezales y transmisiones para cambiar de dirección o velocidad. El freno principal es otro componente del malacate cuya función es parar el carrete y aguantarlo. Cuando cargas pesadas se están levantando o bajando, el freno principal es ayudado por un freno auxiliar, hidráulico o eléctrico, comunmen

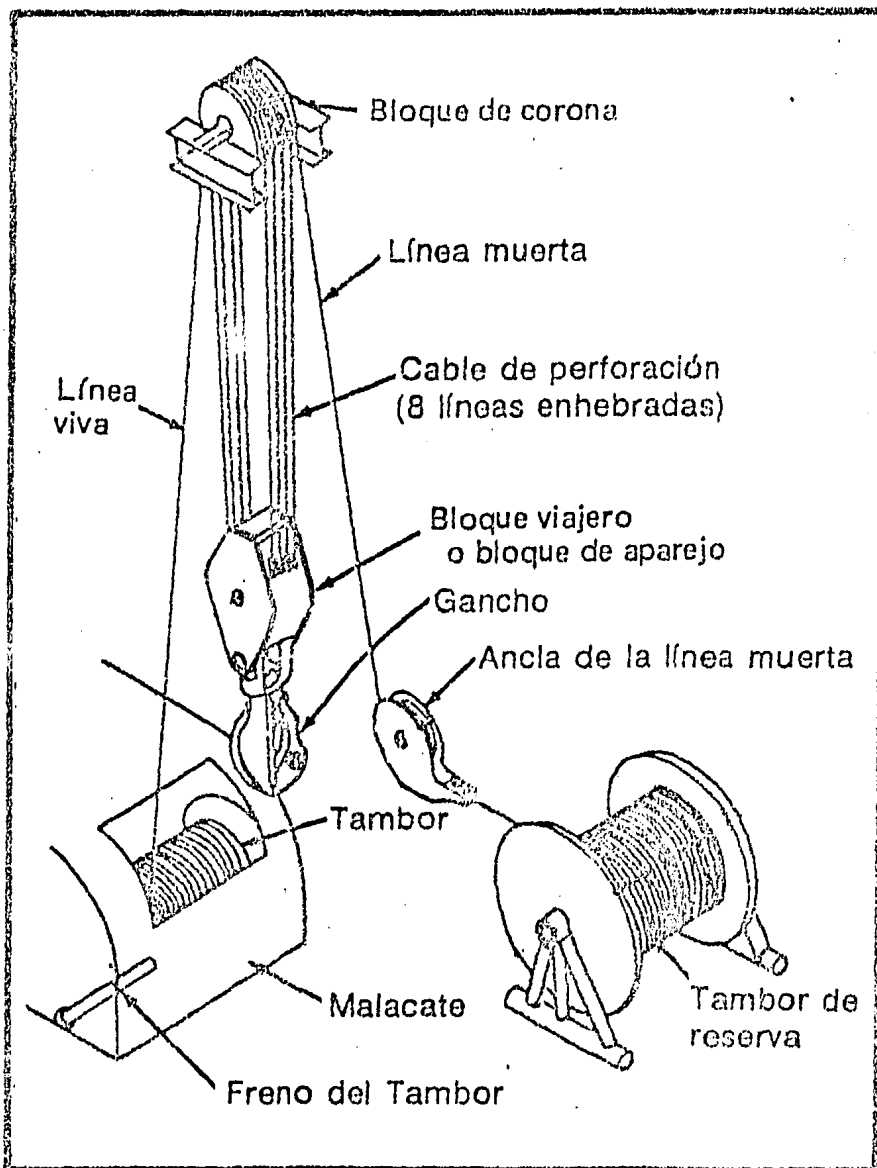


FIG. III.2.2. SISTEMA DE IZAJE DE UN EQUIPO DE PERFORACION ROTATORIA.

mente llamado hidromático.

En ambos extremos del malacate se extiende un eje en cuyos extremos se encuentran dos cabezales de fricción. Este tipo de cabezal utiliza una soga que se enrosca varias veces alrededor del carrete para levantar herramienta que se tiene que mover en el piso del equipo. Muchos equipos están acondicionados actualmente con pequeñas cabrias neumáticas que se utilizan en vez de los cabezales de fricción. Estas cabrias neumáticas son aparatos separados del malacate y son mucho más seguros que los cabezales de fricción.

MASTIL.- El mástil se puede considerar como el esqueleto principal del equipo de perforación, teniendo que ser lo más fuerte posible y a la vez portátil, tomando en cuenta que en un pozo profundo la sarta de perforación puede pesar hasta 250 toneladas.

Los fabricantes de mástiles usualmente clasifican sus productos dependiendo del peso vertical que puedan sostener y la velocidad del viento que puedan soportar de lado.

Las capacidades de los mástiles en cuanto a peso vertical varían de 250,000 a 1'500,000 libras. La mayoría de las torres y mástiles pueden soportar vientos de 100 a 130 millas por hora.

CORONA.- Es una polea múltiple fija que se localiza en la parte superior del mástil.

BLOQUE VIAJERO.- Consiste en una polea múltiple móvil unida a un gancho de acero que sujeta a la unión giratoria durante las operaciones de perforación.

CABLE DE PERFORACION.- El cable de perforación es un cable de acero con un diámetro que varía normalmente entre 1 1/8 y 1 1/2 pulgadas. Para poder utilizar el cable de acero como cable de perforación es necesario enhebrarlo a través de la corona y el bloque viajero, con una terminal unida al malacate y la otra al ancla donde se sujeta la parte fija - - (ancla de la línea muerta).

c) EL SISTEMA ROTATORIO..

El sistema rotatorio, de arriba hacia abajo, consiste en:

1. Unión giratoria.
2. Flecha
3. Mesa rotatoria.
4. La sarta de perforación

UNION GIRATORIA.- Las funciones de la unión giratoria son básicamente las tres siguientes:

- a) Sostener el peso de la sarta de perforación
- b) Permitir que la sarta de perforación gire
- c) Proveer un medio para bombear lodo por el interior de la sarta de perforación a la vez que ésta gira.

MESA ROTATORIA Y FLECHA.- Justamente debajo de la unión giratoria se encuentra la flecha, pieza de tubo cuadrado o hexagonal. Al igual que la unión giratoria es un elemento a través del cual se bombea lodo por el interior de la sarta de perforación.

La configuración de la flecha, ya sea cuadrada o hexagonal, tiene el propósito de transferir el movimiento giratorio de la mesa rotatoria a la sarta de perforación. La flecha entra en una apertura cuadrada o hexagonal en una pieza llamada buje de transmisión que va asentado dentro de otro buje llamado buje maestro. Mientras el buje maestro gira, el buje de transmisión gira con él, dándole así rotación a la sarta de perforación.

La mesa rotatoria, de hecho, es lo que le da el nombre al sistema de perforación rotatorio.

LA SARTA DE PERFORACION.- Está compuesta básicamente por tubería de perforación, lastra barrenas, y la barrena.

El lodo de perforación circula a través de la tubería de perforación al igual que en los lastrabarrenas, para salir finalmente de la sarta de perforación hacia el espacio anular por la barrena.

Los lastrabarrenas son mucho más pesados que la tubería de perforación, van colocados inmediatamente arriba de la barrena, y sirven para proporcionar peso a la sarta de perforación, aprovechando el mismo para presionar la barrena contra la formación. El número de lastrabarrenas a utilizar en la sarta, está relacionado con el tipo de formación que se va a perforar, así como el tipo de barrena y otros factores a considerar.

La barrena es el elemento cortante que va profundizando el pozo mientras la perforación está efectuándose.

d) EL SISTEMA DE CIRCULACION.

El fluido de perforación, en éste caso particular lodo de perfo-

ración, es una mezcla de agua, arcilla, material densificante y agentes químicos, que desempeñan varias funciones importantes durante el proceso de perforación, de las cuales sobresalen el arrastrar los recortes de formación a la superficie y el control de presiones de la formación perforada.

El equipo del sistema de circulación consiste de un gran número de piezas mecánicas. La bomba de lodo recoge el lodo de una de las tres presas de almacenamiento y lo envía hasta el tubo vertical comúnmente llamado "stand-pipe", éste tubo va conectado verticalmente a un lado del mástil. El lodo sube por éste tubo y pasa por una manguera flexible llamada manguera de perforación, conectada a la unión giratoria (swivel). El lodo entra por la cabeza de inyección, baja por la flecha, llega al interior de la tubería de perforación, los lastrabarrenas y sale por la barrenas. Cuando llega al fondo del pozo, el lodo de perforación inicia el regreso a la superficie por el espacio anular existente entre el pozo y la sarta de perforación, finalmente el lodo llega a la superficie y sale a través de la línea de descarga, posteriormente el lodo cae sobre una malla vibratoria, donde son separados los recortes de formación y el lodo de perforación. El lodo retorna a dos de las presas de almacenamiento para posteriormente pasar a través de una torre de enfriamiento la cual cuyo nombre lo indica, enfría el lodo que ha estado en contacto con formaciones calientes de hasta 300°C de temperatura. Después de pasar por la torre de enfriamiento, vuelve a la presa número tres, que es donde inicialmente el lodo inició su recorrido por el sistema de circulación. Como se puede apreciar, el sistema de circulación es un sistema cerrado, el lodo circula una y otra vez durante la perforación. De hecho, de vez en cuando se le añade agua, arcilla o agentes químicos para reemplazar el lodo empleado o para ajustar las propiedades del lodo a las necesidades de la formación que se está perforando.

La figura III.2.3. Ilustra el ciclo básico del fluido de perforación a través de los componentes del sistema.

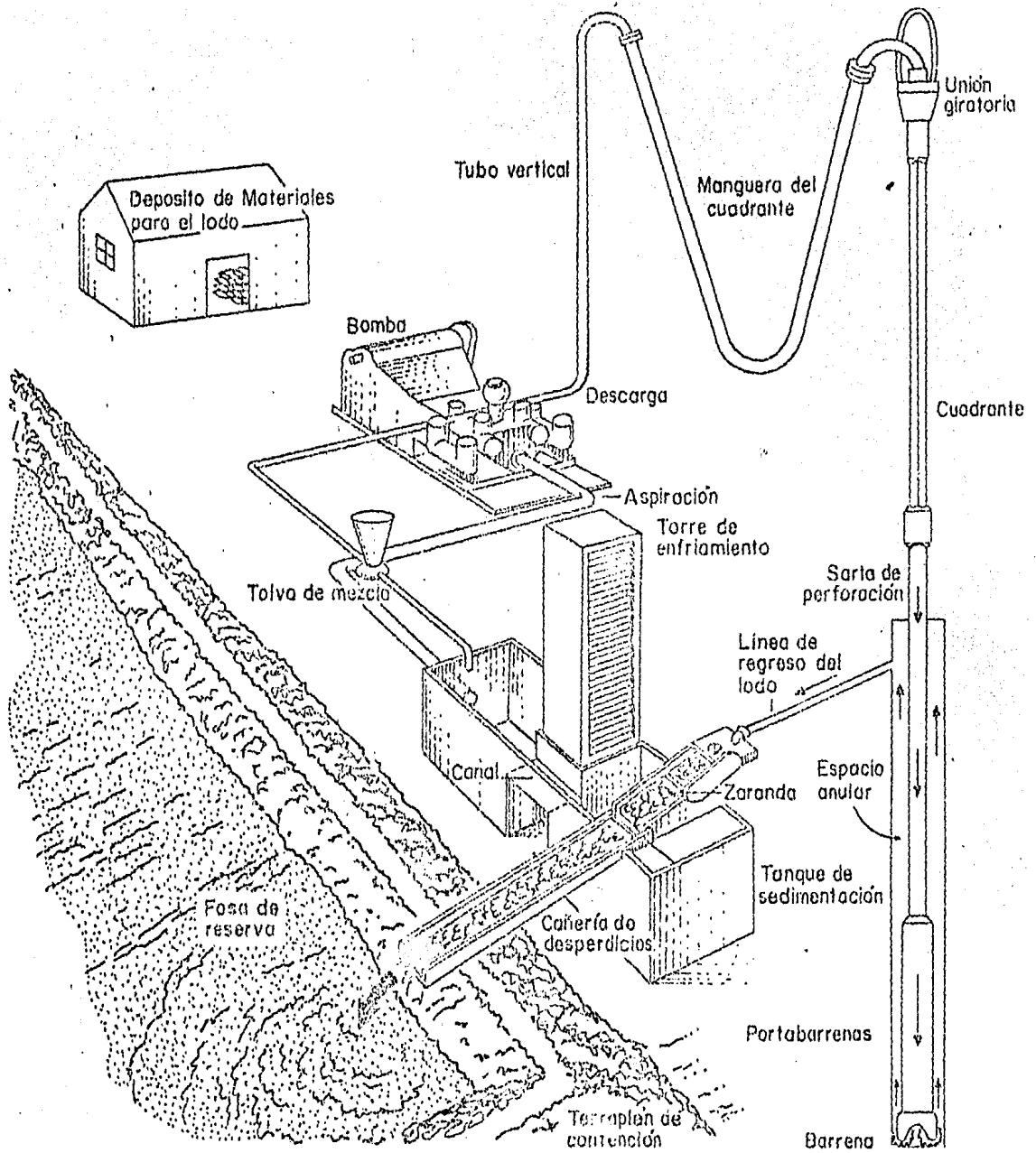


FIG. III. 2.3. SISTEMA BASICO DE CIRCULACION DE UN EQUIPO DE PERFORACION ROTATORIA PARA POZOS GEOTERMICOS. NOTESE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO ENTRE LAS PRESAS DE LODO.

Las propiedades específicas que el lodo de perforación debe conservar durante ciertas etapas de la perforación, hacen necesario equipo auxiliar para mantener dichas propiedades, tal equipo comunmente consiste de agitadores, desarenadores, desgasificadores y una tolva para añadir reactivos químicos y arcilla al lodo.

Los agitadores son instalados en las presas de lodo para mantener una mezcla uniforme de la fase líquida y sólida contenidas en el lodo. Si se está perforando arena se usa un desarenador, ya que la malla vibratoria no tiene capacidad para separar las partículas más pequeñas que los recortes de formación del lodo. No es recomendable circular las partículas finas con el lodo debido a que desgastan la sarta de perforación y otros componentes con sufricción y hacen al lodo más pesado de lo que debería ser.

Otra pieza auxiliar del sistema de circulación es el desgasificador. En ocasiones, pequeñas cantidades de gases de la formación logran incorporarse al lodo mientras se está perforando. No es deseable circular este lodo con gas, porque el gas hace que el lodo sea demasiado liviano y menos denso. Si no se elimina el gas con un desgasificador, el lodo se vuelve tan liviano que permite la entrada al pozo del fluido de la formación, pudiendo ocasionar un reventón o descontrol del pozo. Otro problema ocasionado por la gasificación del lodo es la baja eficiencia de la bomba.

III.3. FLUIDO DE PERFORACION

Para poder perforar, el sistema rotatorio de perforación requiere la circulación de un fluido que sirve para acarrear a la superficie los recortes de formación que la barrena arranca del fondo del pozo, y en esa forma conservarlo limpio. La principal función del fluido de perforación es el mantenimiento y la conservación del agujero, siendo esto el resultado conjunto de varias funciones.

A continuación se mencionan algunas de las funciones del fluido de perforación:

1. Acarreo de recortes a la superficie.
2. Enfriamiento y lubricación de la sarta de perforación.
3. Control de presiones de formación
4. Formación de un enjarre en la pared del pozo
5. Suspensión de recortes cuando la circulación es interrumpida.
6. Soportar parte del peso de la sarta de perforación y la tubería de revestimiento.
7. Transmitir fuerza hidráulica a la barrena
8. Proporcionar un medio para obtener la máxima información del pozo.

El fluido de perforación usado en Cerro Prieto es un sistema compuesto por dos fases; donde la fase continua es el agua y la fase dispersa es diesel. Este tipo de lodo consiste de cinco componentes básicos:

1. Agua. Fase continua
2. Arcilla. En general, la fracción de arcilla del lodo consiste de arcillas comerciales y arcillas incorporadas al lodo, durante la perforación de formaciones sedimentarias. Las arcillas comerciales son tratadas químicamente para poder llevar a cabo un buen control de la viscosidad y la gelatinosidad.
3. Sólidos inertes. Material densificante

4. Agentes químicos.
5. Diesel. La fase dispersa del fluido de perforación.

Las arcillas comerciales usadas en la preparación de lodo, son mate riales hidrofílicos de tamaño coloidal . Las arcillas hidrofílicas se dispersan en el lodo. Las lutitas o arcillas nativas, están compuestas de sólidos hidrofílicos y/o hidrofóbicos y consecuentemente pueden hidratarse o no, ambos tipos de sólidos, sin embargo modifican la viscosidad plástica y otras propiedades del lodo.

Las arcillas más usadas para obtener viscosidad son las Montmorillo nitas, llamadas comúnmente bentonitas. Las partículas individuales de arcilla, son hojas planas y delgadas superpuestas en capas parecidas a la mica (ver figura III.3.1.). En una de las superficies planas de las hojas, existen cationes como sodio (Na), hidrógeno (H), calcio (Ca), etc. La superficie opuesta debido a su estructura interna es débilmente negativa con respecto a la superficie que contiene a los cationes, consecuentemente hay una baja atracción entre las superficies opuestas de partículas adyacentes, que sirve para mantener juntas a las placas.

Las fuerzas de atracción son tan débiles que las moléculas pueden pe netrar y desprender las placas, esto ocurre debido a la acción de la carga pisitiva del hidrógeno contenido en la molécula de agua. A lo anterior se debe la hidratación de la arcilla.

La cantidad de agua que puede ser absorbida por las partículas de arcilla, depende de la naturaleza del catión que las une. El sodio (Na), debido a las bajas fuerzas de unión, permite la entrada de mayor cantidad de agua en comparación con los cationes del calcio (Ca) que tienen mayor atracción entre sí. Esto significa que a una concentración dada de arcilla en agua dulce, la arcilla de sodio dá más viscosidad que la arcilla de calcio. La figura III.3.2 muestra a una arcilla sódica y una cálcica, ambas hidratadas.

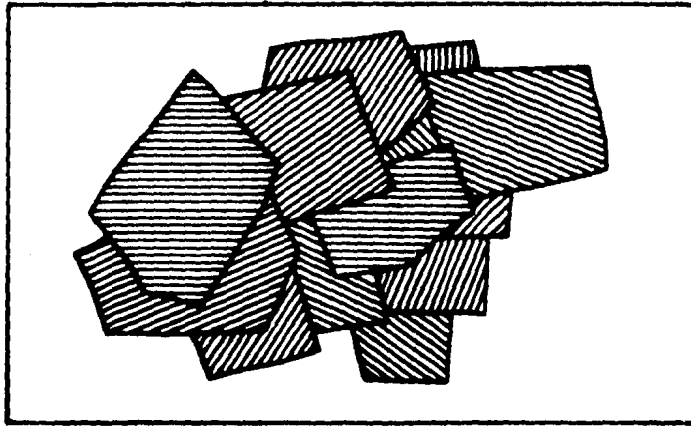


FIG. III.3.1. DISPOSICION DE LAS PARTICULAS INDIVIDUALES DE ARCILLA.

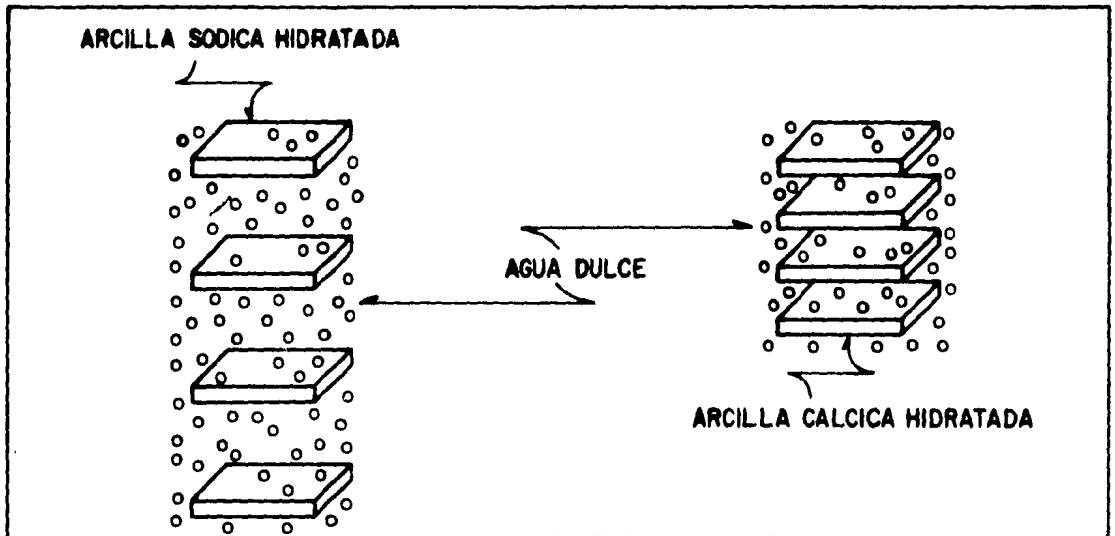


FIG. III.3.2. ARCILLA SODICA Y CALCICA HIDRATADAS.

CONTAMINACION DEL LODO BASE AGUA CON CEMENTO.

La composición y tratamiento del fluido de perforación depende de los materiales encontrados o adicionados intencionalmente al lodo durante las operaciones de perforación. Casi todos los materiales componentes del lodo pueden considerarse contaminantes bajo ciertas circunstancias.

En general un contaminante es cualquier material que causa cambios indeseables en las propiedades físicas y químicas del lodo de perforación; los contaminantes más importantes son aquellos que necesitan de un tratamiento químico para nulificar sus efectos adversos. Algunos contaminantes pueden ser predecidos y tratar químicamente el lodo para evitar la contaminación de éste, el cemento es el caso más común de este tipo de contaminantes, siendo también el único contaminante de interés contra el cual se trata el lodo químicamente en los pozos de Cerro Prieto.

En la mayoría de las operaciones de perforación la contaminación con cemento se presenta más de una vez cuando se cementa alguna tubería o cuando se perfora un tapón de cemento. El evitar la contaminación y sus efectos en el lodo, depende de varios factores como son el contenido de sólidos, tipo y concentración de los defloculantes y la cantidad de cemento incorporado al sistema.

El cemento contiene silicato tricálcico, silicato de calcio y aluminio tricálcico, estos componentes al reaccionar con el agua forman grandes cantidades de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , el cual al reaccionar a su vez con agua causa la mayoría de los problemas asociados con la contaminación del cemento.

El hidróxido de calcio Ca(OH)_2 reacciona químicamente en detrimento de las propiedades reológicas y de filtrado del lodo.

La presencia del ión hidroxilo (OH^-) incrementa el PH drásticamente,

y el ión calcio afecta las características de la arcilla del fluido de perforación.

Para mantener un lodo con bajas concentraciones de calcio, se debe aplicar un tratamiento químico para contrarrestar el efecto de la contaminación del cemento, el objetivo del tratamiento es controlar el P.H. a la vez que el calcio es eliminado del sistema y transformarlo al mismo tiempo en un precipitado de calcio insoluble e inerte para el fluido de perforación.

Químicamente para eliminar 100 mg/l de calcio producido por la reacción del hidróxido de calcio con el agua, se requieren 0.0737 lb/bl - - (0.210 kg/m³) de bicarbonato de sodio. Los lignitos también reaccionan con el hidróxido de calcio para formar sales de calcio del ácido húmico. Aproximadamente 1 lb/bl (2.85 kg/m³) de hidróxido de calcio puede ser precipitada con 7-8 lb(3.5-4 kg) lignito; tratamientos arriba de estos rangos no son recomendados porque las sales cálcicas del ácido húmico pueden crear problemas con la viscosidad a altas concentraciones.

El tratamiento usado en Cerro Prieto para contrarrestar los efectos de la contaminación del lodo con cemento, es el descrito anteriormente, por ser el bicarbonato de sodio un material relativamente barato y eficaz.

TRATAMIENTO QUIMICO DEL FLUIDO DE PERFORACION EN UN POZO GEOTERMICO DEL CAMPO CERRO PRIETO.

Intervalo de 0 a 300 m.

Antes de iniciar la perforación de un pozo, se prepara un lodo bentonítico con agua dulce de no más de 100 PPM de calcio con el fin de obtener una máxima hidratación y rendimiento de la bentonita, la densidad promedio deseada es 1.06 a 1.12 gr/cm³ y una viscosidad Marsh de 50-60 - - seg/lt. Estas características iniciales se conservan hasta cementar las dos primeras tuberías de revestimiento; la primera, tubería conductora 30"Ø (762 mm) 98.93 lb/pie (147.32 kg/m), grado "B" soldable a \pm 50m. la segunda tubería superficial 20"Ø (508 mm) 106.5 lb/pie (158.59 kg/m) grado K-55 Rosca Buttress cople corto a \pm 300 m.

Intervalo de 300 a 1200 m.

Antes de perforar los accesorios de cementación 20"Ø (508 mm) se trata el lodo con bicarbonato de sodio para contrarestar los efectos del cemento.

Al incrementarse la profundidad del pozo se desean mejores propiedades reológicas y de filtrado en el fluido de perforación y por lo tanto, es necesario la adición de reactivos químicos dispersantes o diluyentes al sistema, tales como:

Lignitos o lignosulfonatos en proporciones promedio de 2-3 lb/bl, con el fin de evitar cambios indeseables en las propiedades reológicas del lodo. Para que los reactivos químicos actúen correctamente es necesario mantener el P.H. del sistema entre 9 y 10.5, agregando para esto sosa cáustica al lodo.

Para lograr un control eficaz de filtrado y gelatinosidad del fluido, es necesario emulsificar el sistema, agregando diesel al lodo.

El uso convencional de lignitos en lodos base agua se hace en virtud de que no son afectados por temperaturas medianamente altas (200°C), y pueden ser usados tanto como dispersantes, agentes de control de filtrado y emulsificantes, en un rango amplio de profundidades y temperaturas.

Debido a la naturaleza ácida de los lignitos (ácido húmico) es necesario, en algunos casos el uso de sosa caústica para lograr la solubilidad de dichos productos; en otros casos, los lignitos vienen ya presolubilizados, lo cual implica el uso mínimo de sosa cáustica.

La efectividad de los lignitos se ve reducida por la contaminación de calcio o magnesio y a menos que dicha contaminación pueda ser removida por adición de bicarbonato de sodio al lodo, deberá cambiarse el tratamiento con lignitos por otro dispersante cuando la dureza sea mayor de 4000 PPM en el filtrado del lodo.

Se usan también los lignitos, en lodos base agua emulsionados, los cuales tienen como características principales alta viscosidad, baja gelatinosidad y bajo filtrado, este tipo de lodos en los pozos de Cerro Prieto han tenido buenos resultados al atravesar formaciones de lutitas inestables.

El uso de lignitos en combinación con un surfactante en pozos con alta temperatura, han tenido éxito ya que los lignitos son estables en esas condiciones, mejor que otros dispersantes orgánicos, el uso del surfactante es para controlar la viscosidad y la gelatinosidad, las cuales tienden a incrementarse con la temperatura.

Los siguientes factores son determinantes en el buen comportamiento de los lodos lignito-surfactantes:

1. El P.H. debe mantenerse dentro del rango fijado, si es más alto de 10.0, el lignito será sobresolubilizado, resultando propiedades de filtración pobres. Con bajo P.H. el lignito tendrá solubilidad limitada y ac

tuará mal como dispersante.

2. El mantenimiento deberá darse como a un lodo base agua, ya que tiene una tolerancia limitada a los electrolitos contaminantes; tales como la sal, yeso y cemento.

3. Para conservar propiedades de flujo satisfactorias a temperaturas altas, el contenido de arcilla debe mantenerse bajo, el contenido apropiado deberá mantenerse por dilución o remoción mecánica de los sólidos.

Intervalo de 1200 a 2500 m.

Después de cementar la tubería de anclaje 13 3/8"Ø (339.72mm) 68 lb/pie (101.26 kg/m) grado K-55 Rosca Buttress, el sistema deberá tratarse con bicarbonato de sodio para precipitar el calcio, producido por la contaminación de cemento al perforar los accesorios de cementación.

La perforación se continúa con el sistema a base de lignitos hasta aproximadamente los 1500 a 2000 m., donde se espera un incremento de temperatura, y los lodos bentoníticos tienden a solidificarse en el fondo del pozo cuando están estáticos.

La vigilancia continua de los parámetros de temperatura, salinidad y dureza total es muy importante y cualquier incremento repentino debe ser detectado para acondicionar de inmediato el lodo.

La transformación al sistema de alta temperatura es el siguiente:

1. El contenido de calcio debe reducirse y mantenerse a menos de 100 PPM.

2. Se trata el lodo con cromolignitos en concentraciones de 2-3 lb/bl. El cromo hace a los lignitos más eficaces a altas temperaturas.

3. El P.H. debe mantenerse entre 9.0 y 9.5

4. El filtrado debe reducirse a menos de 8 cm³/30 min.

5. Cuando las temperaturas de fondo exceden los 200°C el lodo se trata, además de los cromolignitos, con cromolignosulfonatos, en concentraciones de 2-3 lb/bl. Los cromolignosulfonatos son muy efectivos en presencia de sales y contaminación de calcio a altas temperaturas.

Los cromolignosulfonatos, en conjunto con una combinación de polímeros estables a altas temperaturas, hacen al lodo soportar estáticamente temperaturas de fondo de hasta 300°C por períodos de hasta 18 horas.

Para su mayor estabilidad a altas temperaturas y para mejorar sus propiedades reológicas del lodo cromolignosulfonato, es necesario emulsionarlo con aceite.

Es importante precipitar el calcio con bicarbonato de sodio antes de iniciar el tratamiento para alta temperatura, ya que los cromolignosulfonatos actúan más eficazmente en fluidos libres de calcio.

Al llegar a la profundidad de lutitas grises se correrá y cementará la tubería de explotación 9 5/8"Ø (244.47 mm) 47 lb/pie (69.98 kg/m) Grado C-75 Rosca Hydriil S.E.U. para posteriormente colgarse dentro de ésta una tubería corta de 7"Ø (177.80 mm) 29 lb/pie (93.18 kg/m) Rosca Hydriil S.E.U. con una sección ranurada frente a la zona productora.

Intervalo de 2500 a 3000 m. (intervalo productor)

El lodo usado en éste intervalo es el tratado básicamente con cromolignosulfonatos.

El intervalo productor es en donde comunmente se esperan encontrar pérdidas parciales y totales de circulación, por lo cual al presentarse

pérdida de fluido hacia la formación, el lodo se acondicionará con material obturante adecuado al problema.

III,4. PERFORACION

La perforación de pozos geotérmicos puede resultar más problemática en algunos casos que la perforación de pozos petroleros, debido a los gradientes anormales de temperatura encontrados en dichos pozos, sobre todo al acercarse a la zona de producción donde los problemas se hacen más frecuentes y la temperatura es un factor que dificulta en la mayoría de los casos la solución del problema.

A continuación se hará un resumen de actividades de perforación y problemas comunes encontrados al perforar los diferentes diámetros hasta la terminación del pozo.

a) AGUJERO 36"Ø (914.40 mm)

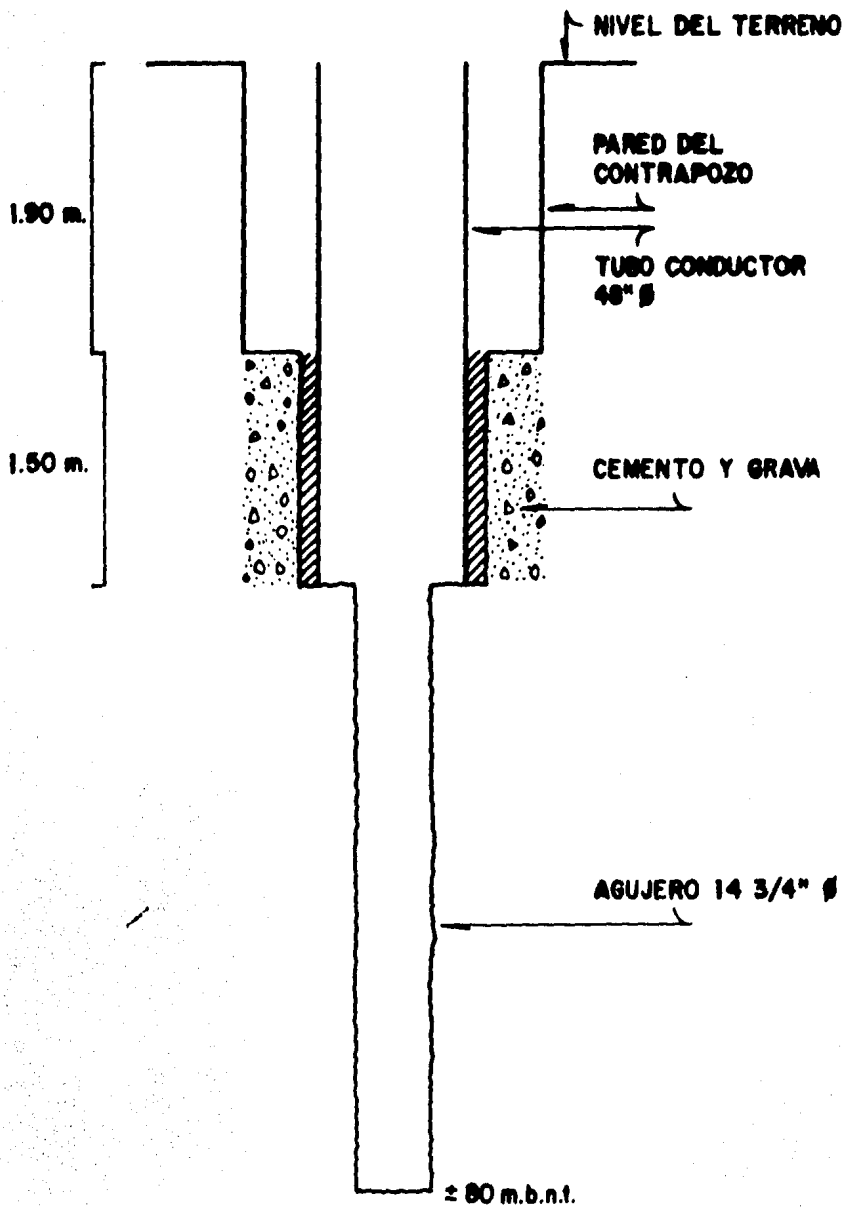
La perforación del pozo se inicia con una barrena 14 3/4"Ø (374.65 mm) de los 3.40 m. BNT (bajo nivel del terreno) hasta 80 m.BNT, donde, la formación perforada es 100% arcilla plástica arenosa. A continuación se procede a ampliar el agujero de 14 3/4"Ø (374.65 m) directamente a 36"Ø (914.40 mm) hasta 45 m. BNT, como se ilustra en las figuras III.4.1 y III.4.2

Una vez, con el pozo a 45 m BNT y 36"Ø (914.40 mm) está en condiciones de ser corrida y cementada la tubería conductora, que es la primer tubería de revestimiento que se introduce al pozo. La tubería conductora cuyas especificaciones son: 30"Ø (762 mm), peso 98.93 lb/pie (147.32 kg/m), Grado "B" soldable, es cementada hasta la superficie por el método del Stab-in, que posteriormente se verá con más detalle. Al término de la cementación, el pozo mostrará un perfil como lo muestra la figura III.4.3.

El problema más frecuente asociado a la perforación del agujero de 36"Ø (914.40 mm) es la fuga de lodo por fuera y por dentro del contrapozo. Cuando la fuga de lodo se presenta por dentro del contrapozo, es debido al mal empacamiento existente entre el tubo conductor y el terreno, éste problema es comunmente atacado instalando una bomba centrífuga que succiona el lodo del contrapozo y lo manda a las presas de almacenamiento, permitiendo así continuar perforando, aunque no es una solución definitiva si es la más económica, ya que un nuevo empacamiento requeriría la suspensión de las actividades del equipo de perforación por un tiempo relativamente largo.

La figura III.4.4. muestra éste problema esquemáticamente.

Quando la fuga de lodo existe por fuera del contrapozo, es debido a la mala compactación del terreno circundante.



**FIG. III.4.1. DIAGRAMA ESQUEMATICO
 DEL POZO CON AGUJERO 1 3/4" Ø A ± 80 M.B.N.T.**

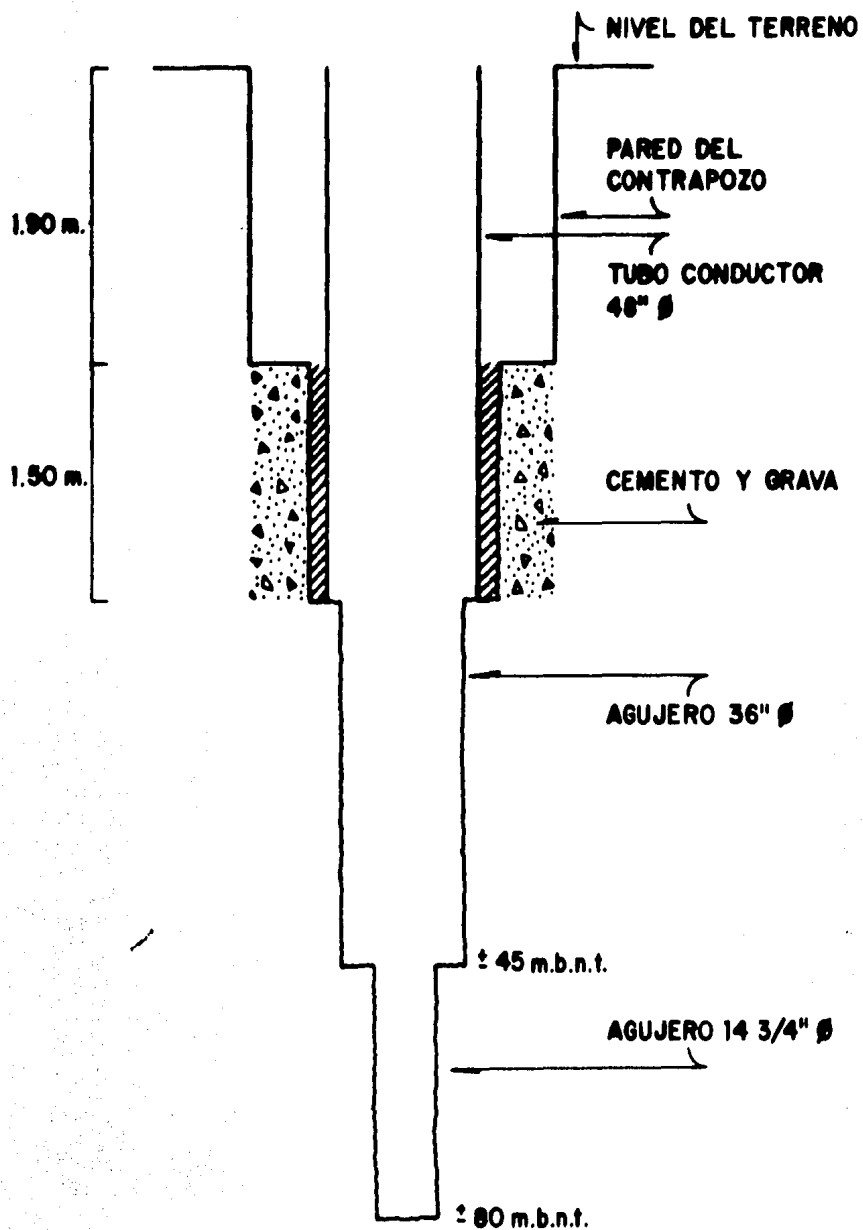


FIG.III.4.2. DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL POZO CON AGUJERO 36" Ø A ± 45 M.B.N.T.

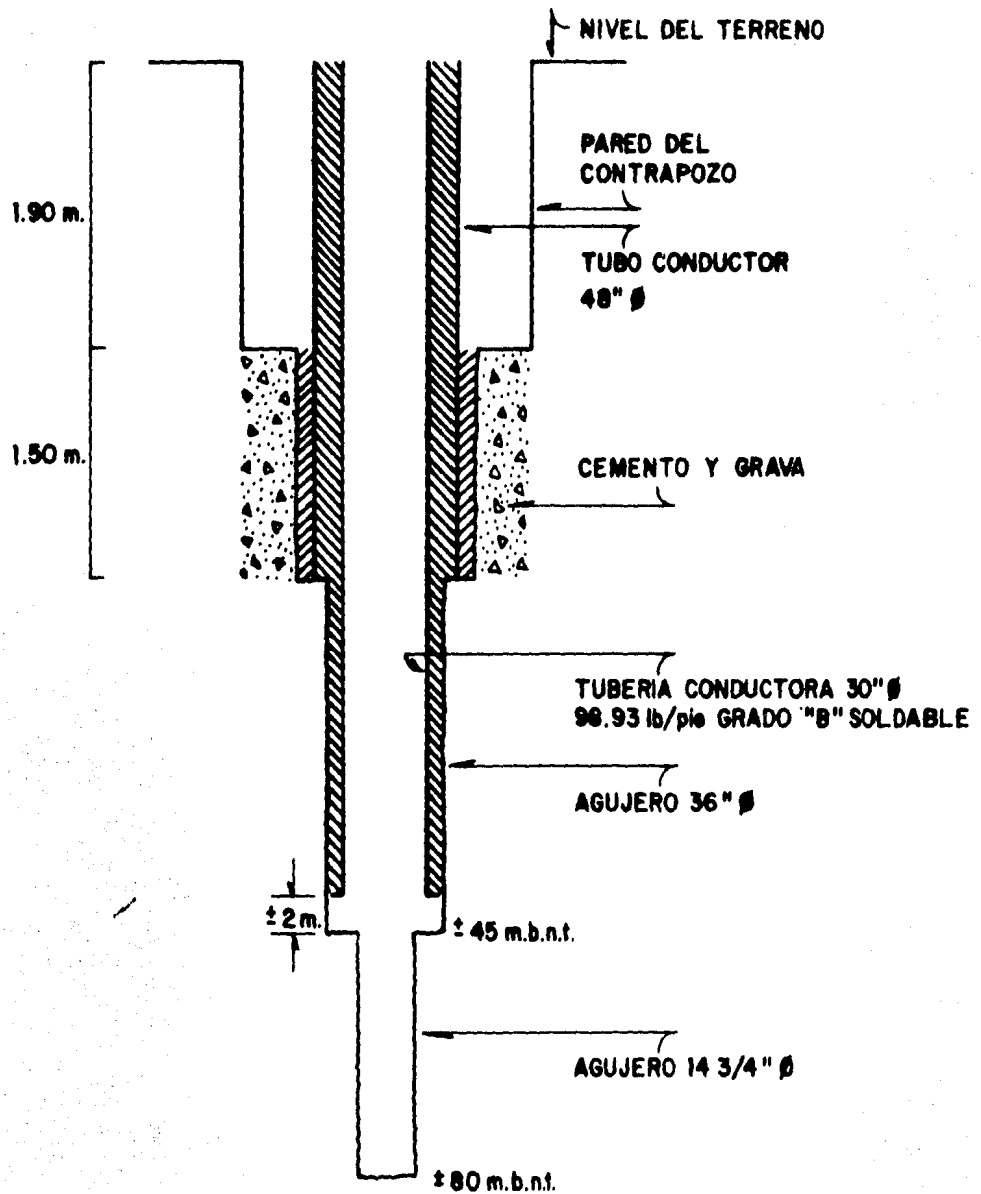


FIG.III.4.3. PERFIL DEL POZO DESPUES DE
 CEMENTADA LA TUBERIA CONDUCTORA

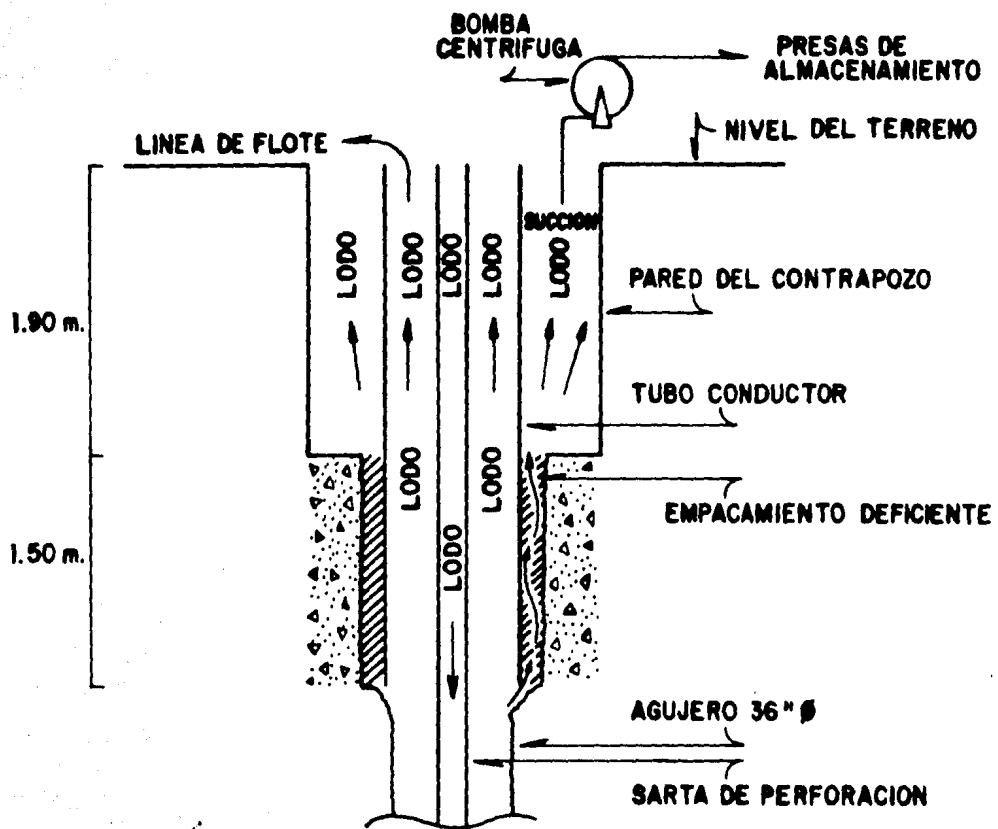


FIG. III.4.4. FUGA DE LODO POR DENTRO DEL CONTRAPOZO DEBIDO AL MAL EMPACAMIENTO CON CEMENTO Y GRAVA DEL TUBO CONDUCTOR Y EL TERRENO.

Normalmente cuando se presenta la fuga por fuera del contrapozo, no retorna lodo por la línea de flote hacia las presas, siendo necesario bombear una lechada de cemento a través de tubería franca colocada a \pm 15 m. BNT, hasta aflorar a la superficie.

Después de aflorar el cemento a la superficie, se espera hasta fraguar el mismo para continuar perforando.

La figura III.4.5 ilustra gráficamente lo anteriormente expuesto.

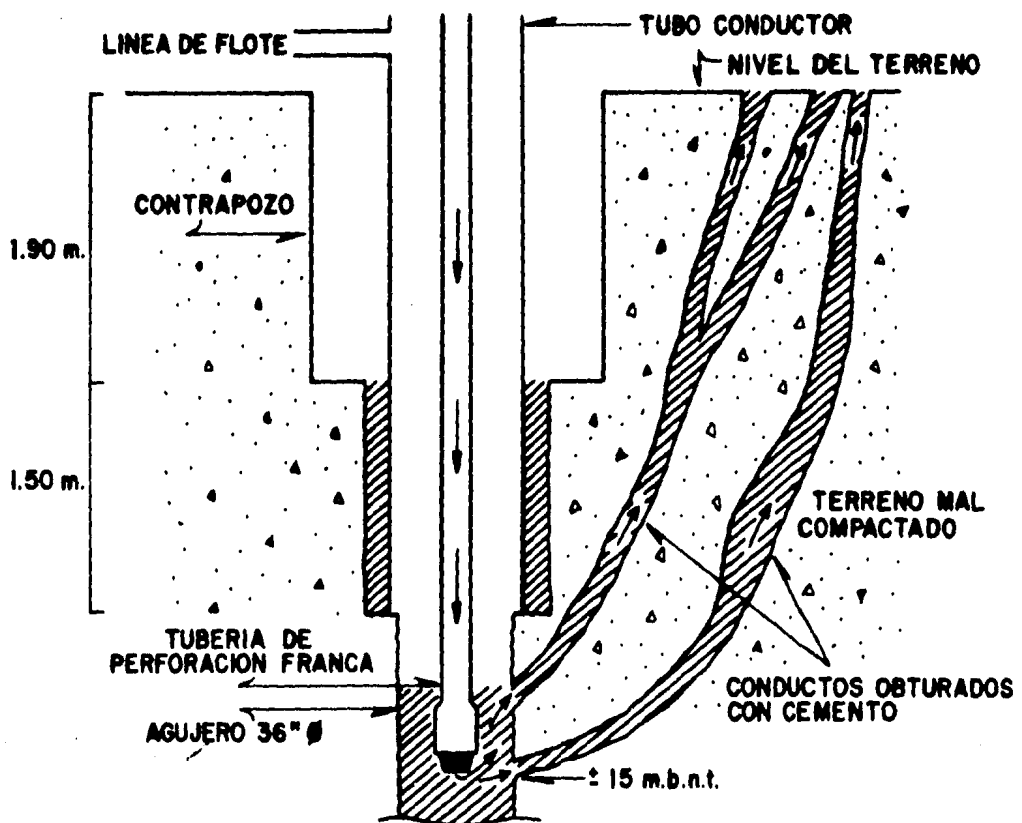


FIG.III.4.5. FUGA DE LODO POR FUERA DEL CONTRAPOZO

b) AGUJERO 26"Ø (660.40 mm)

Una vez cementada la tuberfa conductora 30"Ø (762 mm), con barrena 14 3/4"Ø (374.65 mm) se perforan los accesorios de cementación, se reconoce el agujero hasta la profundidad de 80 m. BNT y se continúa perforando de 80 a 320 m. BNT. Con ampliador de 26"Ø (660.40 mm) se amplían los accesorios de cementación y se continúa ampliando el agujero 14 4/4"Ø (374.65 mm) directamente a 26"Ø (660.40 mm) hasta 300 m. BNT. Después de terminar la ampliación, se efectúa un viaje de reconocimiento para posteriormente correr y cementar la tuberfa superficial de 20"Ø (508 mm) peso 106.5 lb/ pie (158.59 kg/m), grado K-55, Rosca Buttress cople corto a 300 m. BNT.

Las dificultades durante esta etapa de la perforación ocasionadas por formaciones problema, son nulas, la formación perforada sigue siendo 100% arcilla plástica arenosa, la cual su control no presenta dificultad alguna.

El perfil tubular del pozo hasta ésta etapa es el ilustrado en la figura III.4.6.

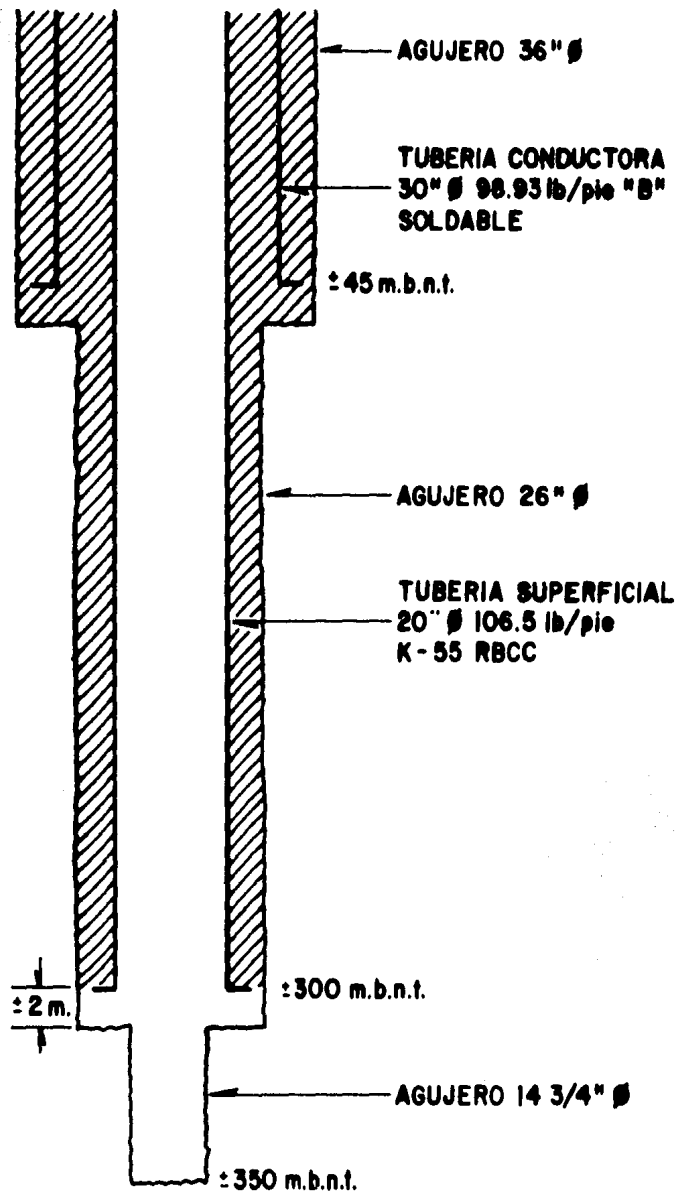


FIG. III.4.6. PERFIL TUBULAR DEL POZO CON LA TUBERIA SUPERFICIAL CEMENTADA A ± 300 M.B.N.T.

c) AGUJERO 17 1/2"Ø (444.50 mm)

El agujero de 17 1/2"Ø (444.50 mm), aloja la tubería de anclaje de 13 3/8"Ø (339.72 mm) peso 68 lb/pie (101.26 kg/m) Grado K-55 Rosca Buttress. La profundidad varía entre 1000 y 1150 m. BNT, dependiendo de la localización de zonas arenosas o arcillas hidratables, normalmente a 1150 m. BNT ya no se encuentran formaciones de este tipo.

Después de cementar la tubería superficial de 20"Ø (508 mm), se perforan los accesorios de cementación con barrena 12 1/4"Ø (311.15 mm) y se reconoce el agujero 14 3/4"Ø (374.65 mm) hasta 350 m. BNT, para continuar perforando hasta 1100 m. BNT y posteriormente ampliar directamente a 17 1/2"Ø (444.50 mm), donde se llegará a ± 1050 m. BNT para cementar la tubería de anclaje.

Las pérdidas parciales de circulación en raras veces se presentan al perforar en esta etapa. Cuando se presentan son debido a la alta permeabilidad de las zonas de no consolidados (zonas arenosas con gravilla). Normalmente se ataca éste problema adicionando material obturante de tamaño medio al fluido de perforación, logrando buenos resultados en la mayoría de los casos.

En términos generales la perforación en agujero 17 1/2"Ø (444.50 mm) no presenta mayores problemas, como es el caso de la etapa en agujero 12 1/4"Ø (311.15 mm) y 8 1/2"Ø (215.90 mm), donde la mayoría de los problemas característicos del campo son encontrados.

El perfil tubular del pozo al cementar la tubería de anclaje lo ilustra la figura III.4.7.

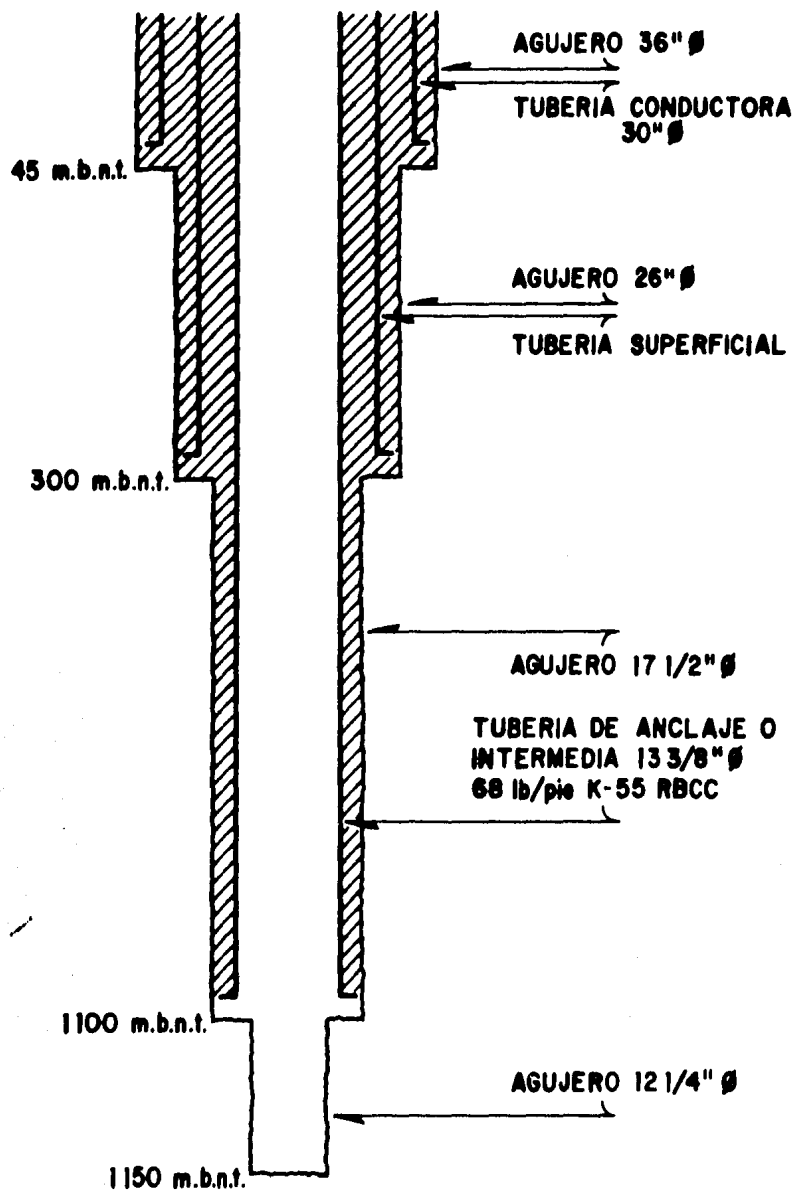


FIG.III.4.7. PERFIL TUBULAR DEL POZO CON LA TUBERIA INTERMEDIA CEMENTADA A ± 100 M.B.N.T.

d) AGUJERO 12 1/4"Ø (311.15mm).

En ésta etapa de perforación, que comprende desde la zapata 13 3/8"Ø- (339.72mm) hasta un profundidad que varfa de los 2200 a los 2500 m BNT, in tervalo hasta donde se bajará y cementará la tuberfa de explotaci3n o pro- ductora 9 5/8"Ø (244.47mm) 47 lb/pie (70.07 kg/m) grado C-75 Rosca Hydril- S.E.U. En este mismo intervalo, donde termina la zona de transici3n de no consolidados a consolidados (arcilla plástica arenosa — lodolita — luti ta café — lutita gris) e inicia la zona productora es donde la mayoría de los problemas en perforación caracterfsticos del campo se hacen presentes. Estos problemas se enlistan a continuaci3n para posteriormente ser trata - dos cada uno de ellos, así como las soluciones de campo más usadas en base a la experiencia obtenida en la perforación de 131 pozos a lo largo de 20- años, desde 1964 a 1984.

Problemas más comunes durante la perforación en agujero 12 1/4"Ø - (311.15mm):

- A) Pérdidas parciales y totales de circulaci3n.
- B) Derrumbes durante la perforaci3n o durante las corridas de tuberfa de revestimiento.
- C) Pérdidas de circulaci3n durante la cementaci3n de tuberfas de revestimiento.
- D) Pegaduras de la sarta de perforaci3n debido a presiones diferenciales.
- E) Problemas de pesca.

A) Pérdidas parciales y totales de circulaci3n.

La pérdida de circulaci3n, es, la pérdida de fluido de perforaci3n ha cia la formaci3n expuesta directamente al lodo, exista o no retorno a la - superficie. Esto ocurre cuando hay una zona permeable que permite la en - trada de fluido hacia la formaci3n o cuando la presi3n hidrostática ejerci da en el fondo del pozo por la columna de lodo es mayor que la presi3n de-

fractura de la formación.

La pérdida de circulación, ya sea total o parcial, puede clasificarse con dos tipos:

- I) Aquellas inherentes a la formación, o pérdidas naturales de circulación.
- II) Aquellas inducidas o causadas por técnicas deficientes en la perforación.

Las zonas de pérdidas de circulación, pueden clasificarse en cuatro tipos principales, que son:

- a) Zonas de gradiente de fractura normal, que han sido debilitadas o fracturadas por el uso de fluidos de alta densidad y viscosidad, o por "pistoneo" al introducir rápidamente al pozo la sarta de perforación o la tubería de revestimiento.
- b) Zonas naturalmente fracturadas o que contienen la unión de dos estratos.
- c) Zonas ligeramente permeables como son las gravas, algunos conglomerados y arenas.
- d) Zonas cavernosas como son algunas formaciones de dolomitas, calcitas y areniscas.

En Cerro Prieto, se asocian la mayoría de las pérdidas de circulación a zonas permeables como arenas y gravas, y a zonas fracturadas y cavernosas ya que la gran cantidad de fallas tectónicas del campo han provocado la mayoría de las fracturas sobre todo en las formaciones de lutita café, lutita gris y areniscas.

Las pérdidas parciales de circulación encontradas en las zonas permeables tales como gravas y arenas, se controlan disminuyendo la densidad del lodo y agregando al mismo, material obturante de tamaño medio y fino, como es la mica enhojuelas, la cáscara de nuez, el celofán y la borra de algodón. Cuando la pérdida en esta zona no se controla con material obturante se recurre a impermeabilizar las paredes del pozo con una película formada por silicato de sodio y cloruro de calcio.

Este método ha dado buenos resultados cuando la pérdida no es grande y la formación no está demasiado caliente (200°C).

Rotando la sarta de perforación en el fondo del pozo, se bombea una cantidad relativamente grande de agua (15 000 l), con el fin de eliminar el enjarre, inmediatamente después del agua se bombea una solución de silicato de sodio, (1500 l), seguido de un colchón espaciador de agua (1000 l), seguido a su vez de una solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl). El silicato de sodio al estar en contacto con la pared del pozo libre de enjarre, se pierde hacia la formación permeable, lo mismo sucede con el cloruro de calcio, que al reaccionar con el silicato de sodio dentro de los poros de la formación, forman una película impermeable, sellando automáticamente la zona de pérdida. Ver las figuras III.4.8. y III.4.9. que ilustran gráficamente el problema.

Una secuencia de actividades para aplicar éste método se detalla a continuación:

- 1.- Bombear 15 000 l . de agua.
- 2.- Bombear 1 500 l . de silicato de sodio.
- 3.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.
- 4.- Bombear 1 500 l . de solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl).
- 5.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.
- 6.- Bombear 1 500 l . de silicato de sodio.
- 7.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.
- 8.- Bombear 1 500 l . de solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl).
- 9.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.
- 10.- Bombear 1 500 l . de silicato de sodio.
- 11.- Bombear 1 500 l . de agua como espaciador.
- 12.- Bombear 1 000 l . de solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl).
- 13.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.
- 14.- Bombear 1 500 l . de silicato de sodio.
- 15.- Bombear 1 000 l . de agua como espaciador.

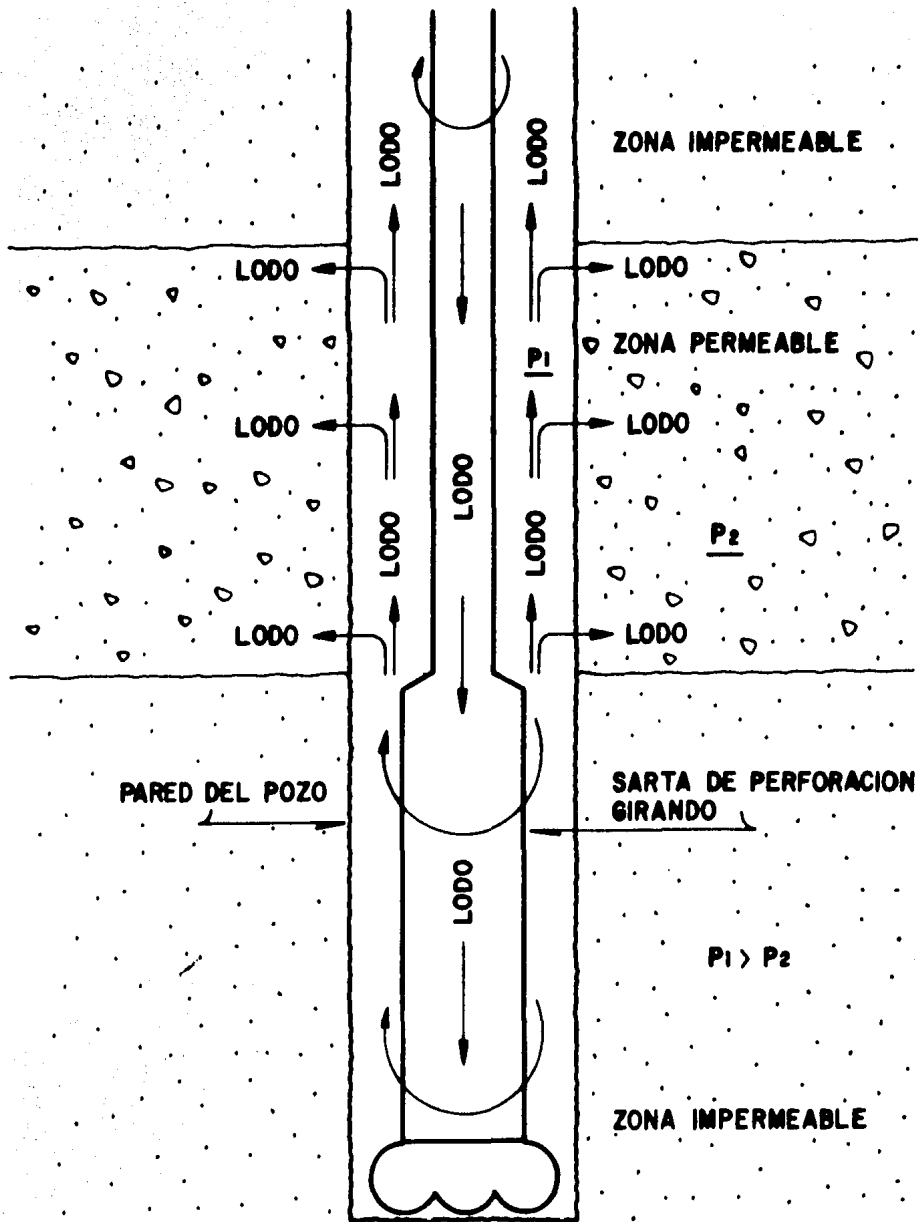


FIG.III.4.8. PERDIDA DE CIRCULACION PARCIAL, DEBIDO A UNA FORMACION PERMEABLE.

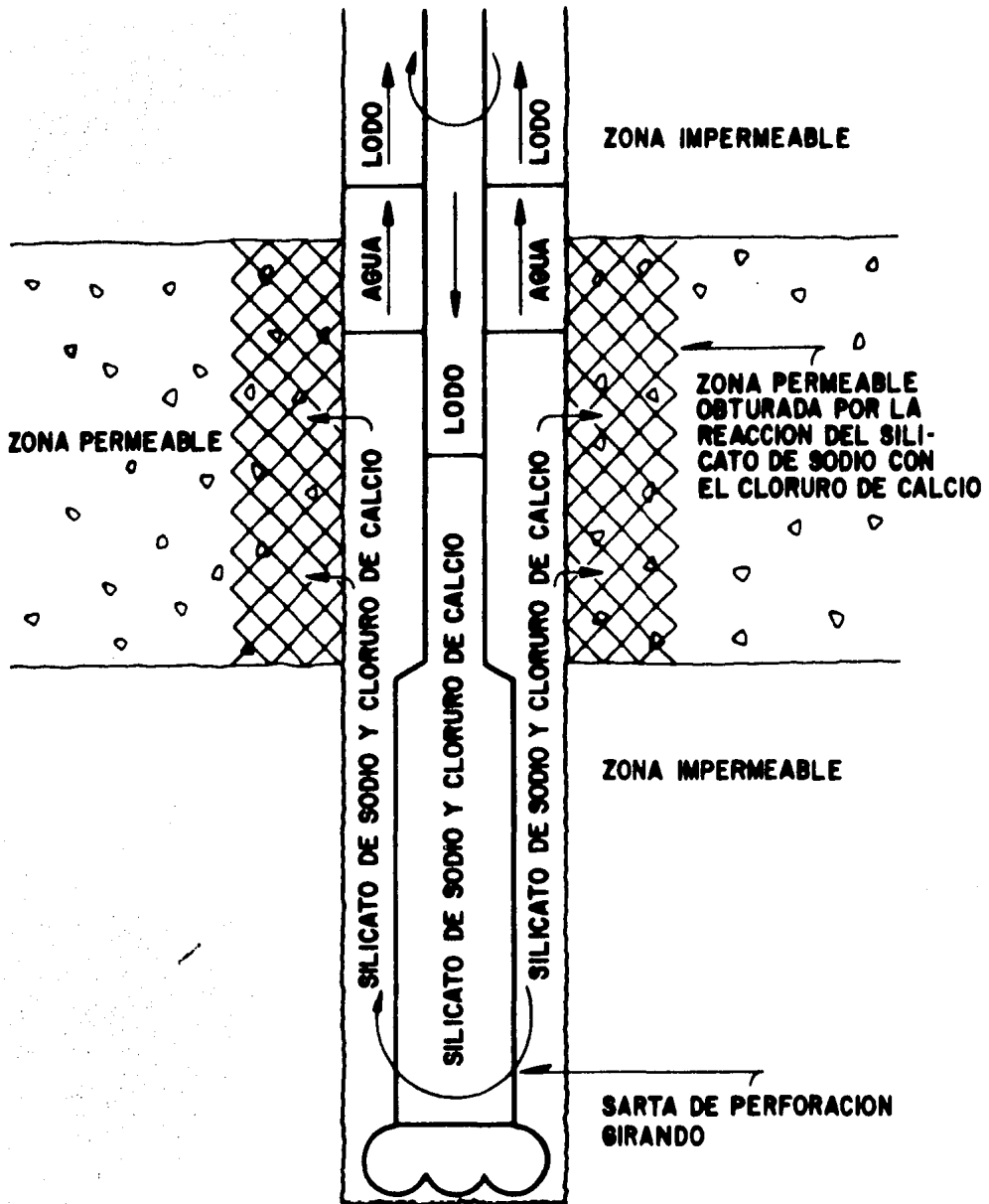


FIG.III.4.9. ACCION DEL SILICATO DE SODIO Y EL CLORURO DE CALCIO EN EL INTERIOR DE LA FORMACION.

- 16.- Bombear 1 500 l . de solución salina al 10% de cloruro de calcio (CaCl).
- 17.- Bombear 4 000 l . de agua .
- 18.- Circular con lodo hasta aflorar a la superficie al excedente del silicato de sodio y el cloruro de calcio para ser eliminados del sistema.

Los cálculos básicos necesarios para preparar un tratamiento de silicato de sodio y cloruro de calcio incluyen la cantidad de agua a utilizar, la cantidad de cloruro de calcio para preparar la solución salina y la cantidad de silicato de sodio.

Tomando en cuenta el programa anterior, se necesitan 32,000 l . de agua en total:

15 000 l .	como frente para limpiar el enjarre.
11 000 l .	para espaciadores.
<u>6 000 l .</u>	para preparar la solución salina de CaCl.
32 000 l .	

Para preparar la solución de CaCl al 10%, se necesita el 10% del peso del agua en cloruro de calcio:

$$1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \times 6000 \text{ l} \times 0.1 = 600 \text{ kg de cloruro de calcio.}$$

El silicato de sodio, comercialmente se obtiene en líquido envasado en tiboires de 200 l c/u el cual se usa directamente en el tratamiento.

Cuando la pérdida de circulación es total, y se presenta en formaciones fracturadas naturalmente o cavernosas los métodos anteriores de control, no proporcionan ninguna ayuda, éste tipo de pérdida de circulación normalmente se presenta al iniciar o perforar la formación productora y se agrava al estar perforando la misma.

Los métodos mas comunes para atacar este problema son:

- 1.- Efectuar una cementación forzada para tratar de obturar con cemento la fractura y poder continuar perforando.
- 2.- Perforar a "fondo perdido" o "perforación ciega".

1.- Cementación Forzada.

La cementación forzada para obturar las fracturas con cemento da buenos resultados cuando la pérdida de circulación realmente se debe a fracturas naturales, ya que cuando existen cavernas es casi imposible restablecer la circulación. El método mas usado debido a los buenos resultados obtenidos en varios casos de pérdida por fractura es colocar un tapón de cemento enfrente de la zona problema y posteriormente inyectarlo a presión a la formación.

Un ejemplo donde este método fue aplicado con éxito es el Pozo T-402, localizado al oeste del campo en la sección denominada Cerro Prieto I, (ver figura III.4.10). A continuación se detalla la secuencia de actividades llevadas a cabo en dicho pozo.

Se perforó con barrena 8 1/2"Ø (215.90mm) de 1773 a 1823m BNT con P.T.C., (pérdida total de circulación) ver figura III.4.11., se optó por obturar la pérdida mediante la inyección de cemento.

Se sacó la sarta de perforación, y se bajo tubería franca de perforación 4 1/2"Ø (114.30mm) 16.6 lb/pie (24.72 kg/mm) a dos metros arriba del fondo del pozo, ver figura III.4.12.

La pérdida de circulación se presentó en los últimos 50 m perforados se colocó un tapón balanceado de cemento de 100m . de longitud frente a la zona de pérdida, posteriormente se levanto la T.P. franca a 150m del fondo, se cerró el preventor y se inyectó el cemento a la formación, observando un incremento paulatino en la presión de inyección.

Los cálculos de volumen y desplazamiento se detallan a continuación:

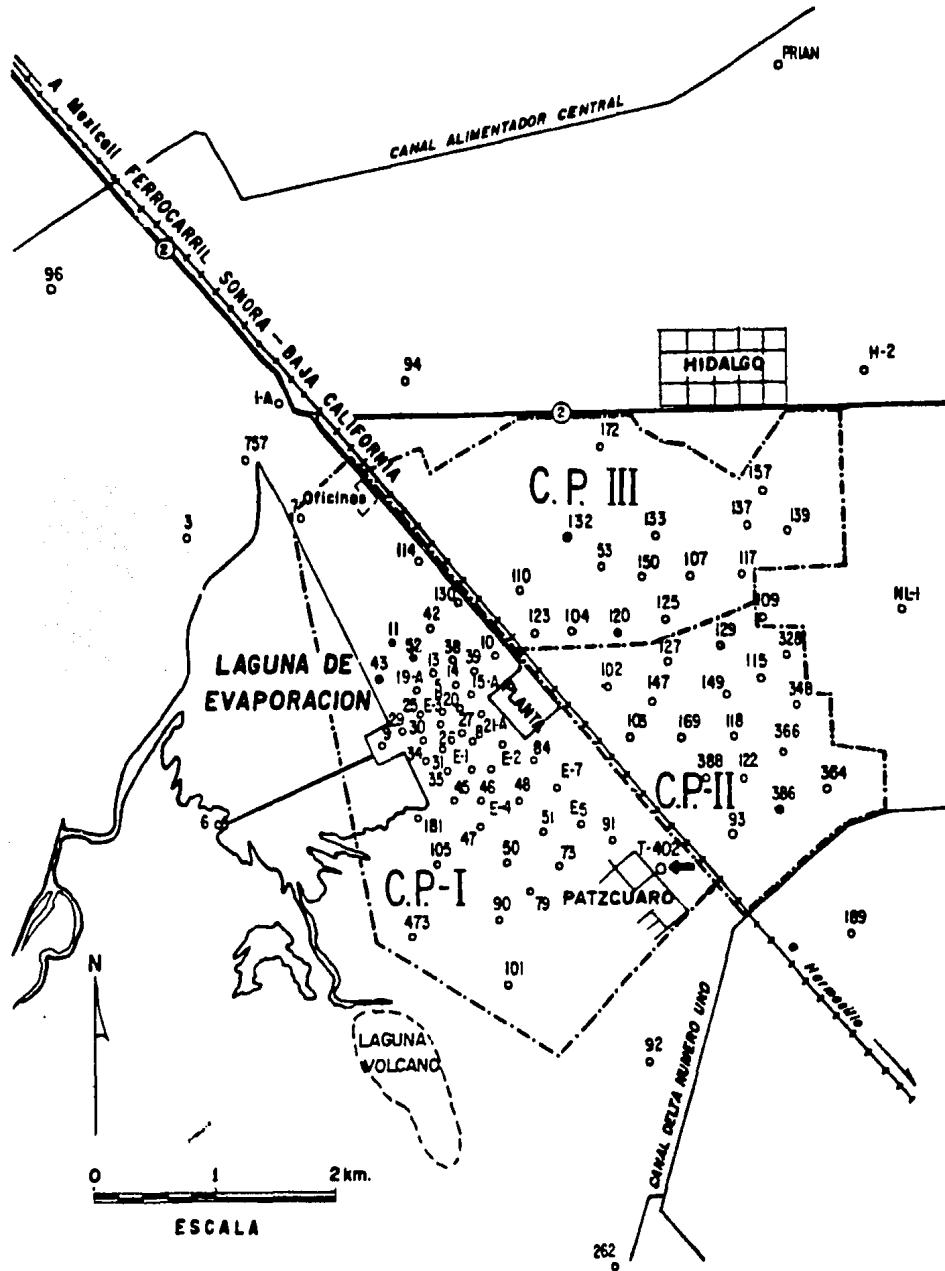
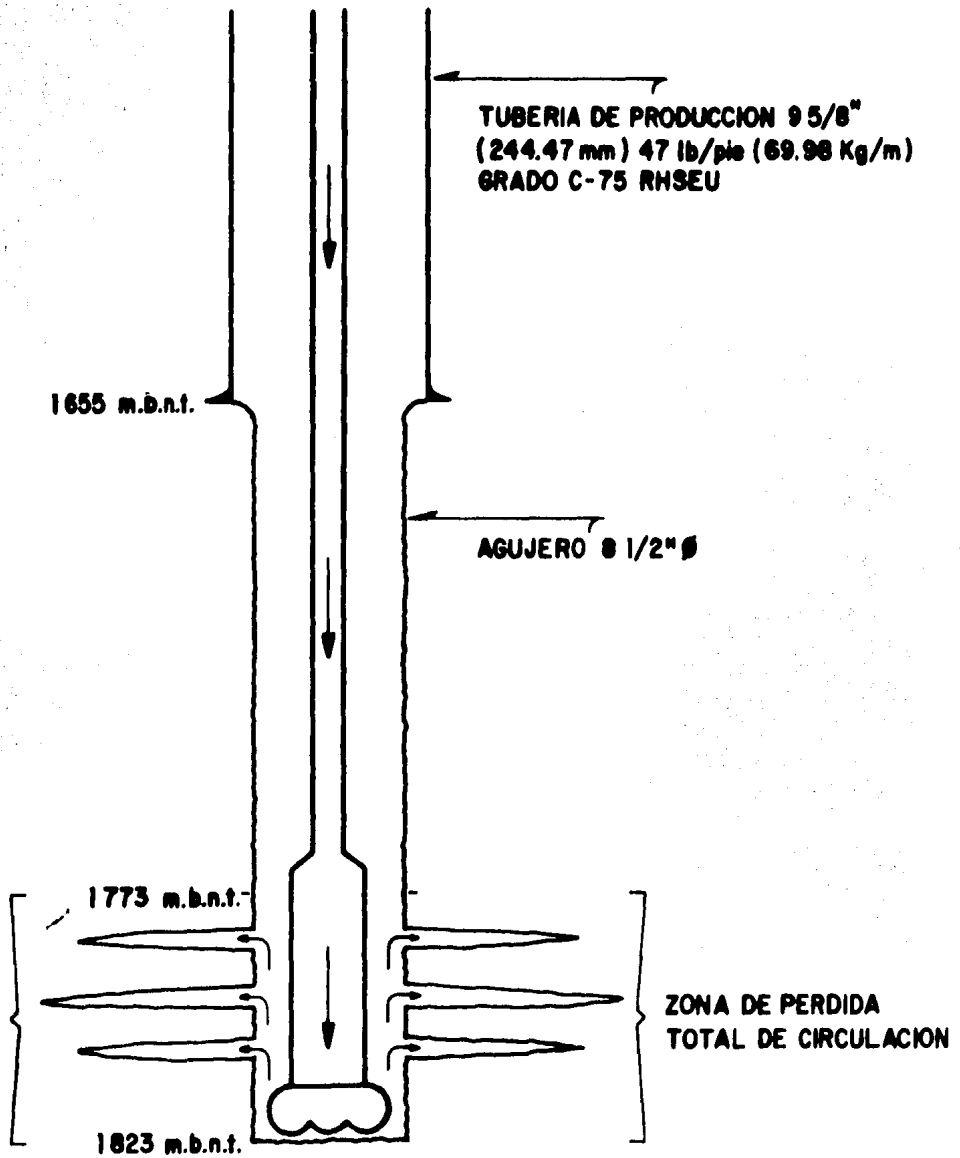


FIG. III.4.10. LOCALIZACION DEL POZO T-402 DENTRO DE LA SECCION DENOMINADA C.P.I.



**FIG.III.4.11. CONDICIONES INICIALES DE PERDIDA
 TOTAL DE CIRCULACION EN EL POZO T-402.**

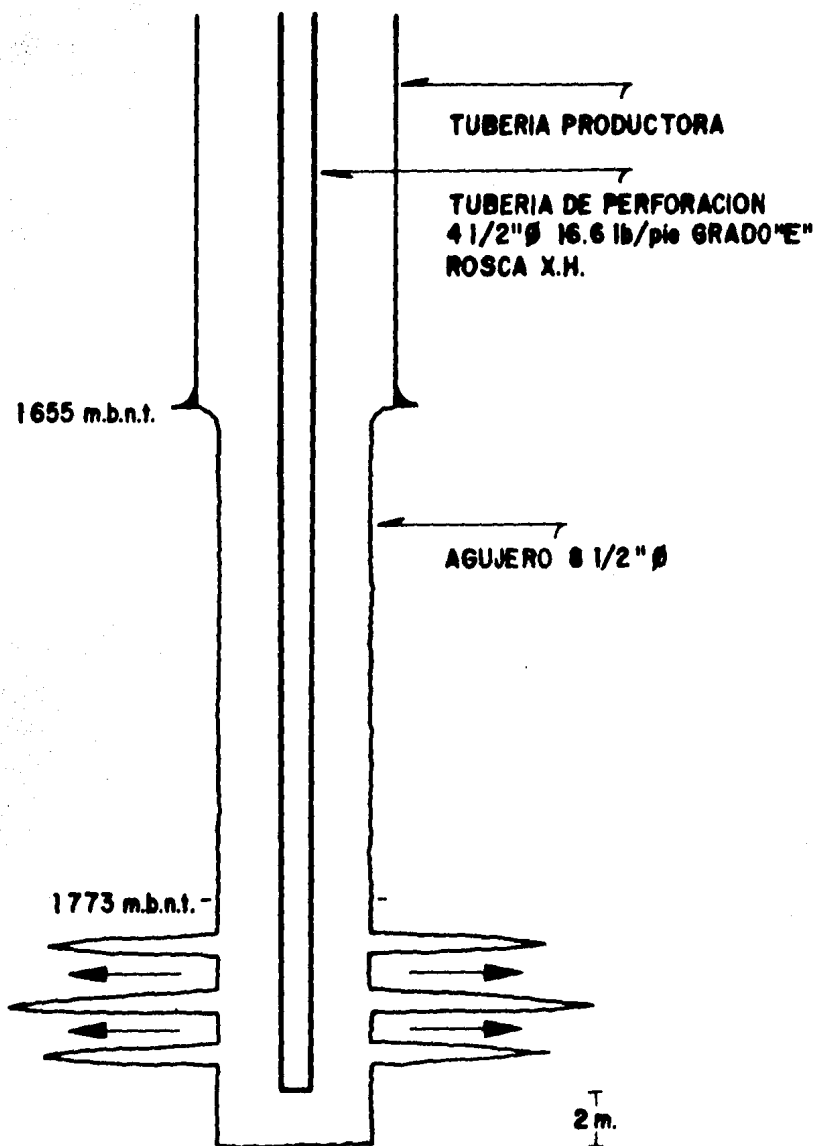


FIG.III.4.12. TUBERIA FRANCA DE PERFORACION A 2 M. ARRIBA DEL FONDO DEL POZO.

DATOS:

Longitud del tapón en agujero 8 1/2"Ø (215.9mm) = 100 m .

Capacidad del agujero 8 1/2"Ø (215.9mm) = 36.59 l /m .

Capacidad del agujero 4 1/2"Ø (114.3mm) = 10.25 l /m .

Capacidad de la T.P. 16.6 lb/pje (24.72kg/m) = 7.41 l /m .

$$\text{Volumen de lechada} = 100 \text{ m} \cdot x \frac{36.59 \text{ l}}{\text{m}} = 3659 \text{ l} .$$

Se balanceó el tapón de cemento con un colchón de agua de 40mts, de longitud entre el lodo y el cemento.

$$\text{Volumen del colchón} = 40 \text{ m} \cdot x \frac{36.59 \text{ l}}{\text{m}} = 1463.6 \text{ l} .$$

La longitud teórica del tapón de cemento es 100 m . Debido al desplazamiento del acero de la tubería de perforación, el volumen que ocupa 100 mts de lechada de cemento en agujero 4 1/2"Ø (114.30 mm), incrementará la longitud de la columna de cemento dentro la tubería de perforación:

$$\text{Volumen de lechada} = 100 \text{ m} \cdot x \frac{10.25 \text{ l}}{\text{m}} = \frac{1025 \text{ l}}{\text{=====}}$$

en 100 m de agujero
4 1/2"Ø

$$\text{Longitud de la columna} = \frac{1025 \text{ l}}{7.41 \frac{\text{l}}{\text{m}}} = \frac{138.3 \text{ m}}{\text{=====}}$$

de lechada dentro de
la tubería de perforación

El mismo efecto tiene el desplazamiento del acero en el cálculo de la longitud de la columna de agua dentro de la T.P. para ser tomado en cuenta al momento de efectuar el desplazamiento del cemento dentro de la tubería:

$$\text{Volumen de agua} = 40 \text{ m} \cdot x \frac{10.25 \text{ l}}{\text{m}} = \frac{410 \text{ l}}{\text{=====}}$$

En 40m de agujero
de 4 1/2"Ø

Longitud de la columna
de agua dentro = $\frac{410 \text{ lts}}{7.41 \frac{\text{l}}{\text{m}}}$ = $\underline{55\text{m}}$
la tubería de
perforación.

Una vez conocidas la longitud de las columnas de cemento y agua dentro de la tubería de perforación se hace el cálculo del volumen de lodo necesario para efectuar el desplazamiento del cemento, ver figura III.4.13.

Ya conocida la profundidad hasta donde se desplaza el cemento, se calcula el lodo necesario para el desplazamiento como se muestra enseguida:

$$1627.7 \text{ m} \quad \times \quad 7.41 \frac{\text{l}}{\text{m}} \quad = \quad 12061 \text{ l} \quad .$$

Con los datos obtenidos anteriormente se efectúa el programa para colocar el tapón de cemento frente a la zona de pérdida total de circulación, dando un margen de 50 m arriba de ésta, tomando en cuenta la cantidad de cemento que se inyecta a la formación. Se inyecta normalmente a la formación la cantidad de cemento contenida en la longitud de agujero con pérdida total, en este caso 50m de agujero 8 1/2"Ø (215.9mm)., el volumen a inyectar se ha estimado en base a experiencias en varios pozos, observándose se buenos resultados a la mayoría de los casos.

El programa para la colocación del tapón en el ejemplo anterior es el siguiente:

- 1.- Circular en el fondo del agujero el tiempo necesario para que el lodo que ha permanecido estático durante la bajada de la T.P. franca, salga a la superficie y su lugar lo ocupe lodo en buenas condiciones.
- 2.- Bombear 1053.6 l de agua. Cantidad que permanece en el espacio anular entre la T.P. y el agujero 8 1/2"Ø (215.9mm)., resultado de restarle al volumen de agua total en agujero 8 1/2"Ø (215.9mm) el volumen de agua dentro de la T.P.

$$1463.6 \text{ l} \quad . \quad - \quad 410 \text{ l} \quad = \quad 1053.6 \text{ l} \quad .$$

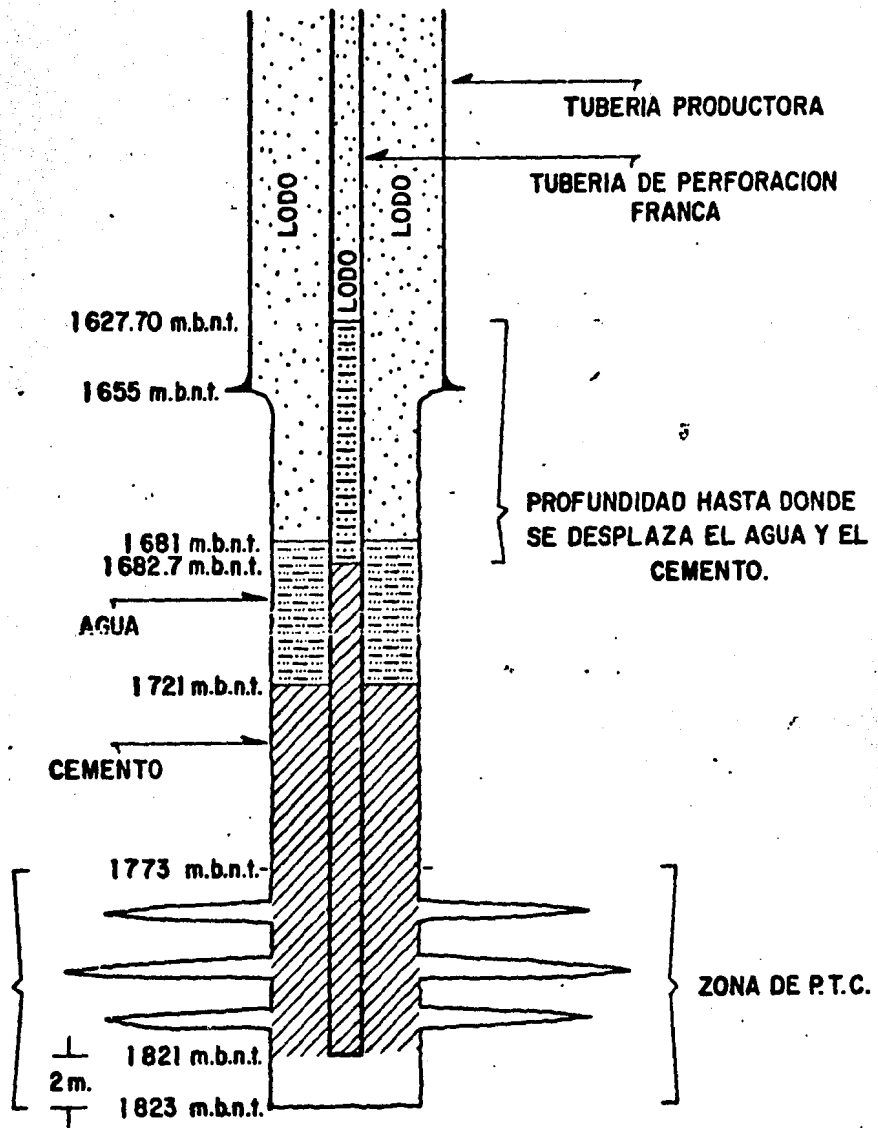


FIG. III. 4.13. POSICION TEORICA DEL CEMENTO DENTRO Y FUERA DE LA TUBERIA DE PERFORACION.

volumen de agua en 40 m de agujero 8 1/2" Ø (215.9mm)	volumen de agua dentro la T.P.
---	--------------------------------------

- 3.- Bombear la cantidad total de cemento, 3659 l .
- 4.- Bombear 410 l . de agua. Cantidad dentro de la T.P.
- 5.- Desplazar el cemento y el agua con 12061 l . de lodo.

El programa anterior es únicamente para la colocación del tapón frente a la zona problema. Para iniciar la inyección del cemento se procede de la siguiente manera.:

- 1.- Después de colocar el tapón frente a la zona problema, se levanta la T.P. a ± 150 m arriba del fondo, para evitar un atrapamiento de la sarta, por el cemento, en caso de haber un sobredesplazamiento del mismo.
- 2.- Cerrar el preventor.
- 3.- Bombear con preventor cerrado, 1829.5 l . de lodo, que es la cantidad de cemento contenida en 50m de agujero 8 1/2" Ø (215.9 mm), arriba de la pérdida. Al bombear con preventor cerrado, si la presión inicial de inyección permanece constante, es un indicio de que la formación es muy permeable y acepta fluido fácilmente. Si la presión de inyección aumenta paulatinamente durante el bombeo, esto indica que la formación opone resistencia a admitir fluido, y en la mayoría de estos casos la pérdida de circulación se obtura.
- 4.- Abrir preventor y sacar la T.P. a la superficie.
- 5.- Esperar tiempo de fraguado y continuar perforando.

La figura III.4.14. muestra teóricamente la pérdida total de circulación obturada con cemento.

2.- Perforación "ciega" o "a fondo perdido".

Cuando es imposible restablecer la circulación de lodo a la superficie y se continúa perforando sin retorno de fluido, se dice que se perfora a fondo perdido. Esta práctica es común en Cerro Prieto en la zona productora cuando ya se ha atravesado y aislado las zonas problema de no consolidados, ya que es riesgoso perforar a fondo perdido cuando existen lutitas deleznableles o hidratableles.

Debido a que el lodo no retorna a la superficie, es necesario colocar arriba de la barrena una "canasta chatarrera" para recuperar muestras de la formación perforada, incrementando debido a los viajes el costo por metro de la perforación. El lodo en las presas se agota rápidamente haciendo necesario la suspensión de las operaciones para preparar más fluido y continuar perforando. Lo anterior ha llevado a la necesidad de perforar con agua en algunos casos extremos como fue la perforación de la zona productora en el pozo M-200 donde las pérdidas de fluido alcanzaron un volumen de 12,000,000 litros.

En el pozo M-200 se decidió usar por primera vez el agua almacenada en la presa de desperdicio a lo largo de la perforación del pozo, con magníficos resultados, ya que no fué necesario suspender la perforación debido a las pérdidas de lodo.

El perforar con agua en la zona productora no representa ningún problema, ya que la formación esta compuesta por arenisca y lutita gris, las cuales estan en contacto con el fluido geotérmico.

B) Derrumbes debido a la inestabilidad del pozo.

La inestabilidad del pozo es generalmente asociada a zonas lutificas, los problemas más comunes ocasionados por estas zonas son:

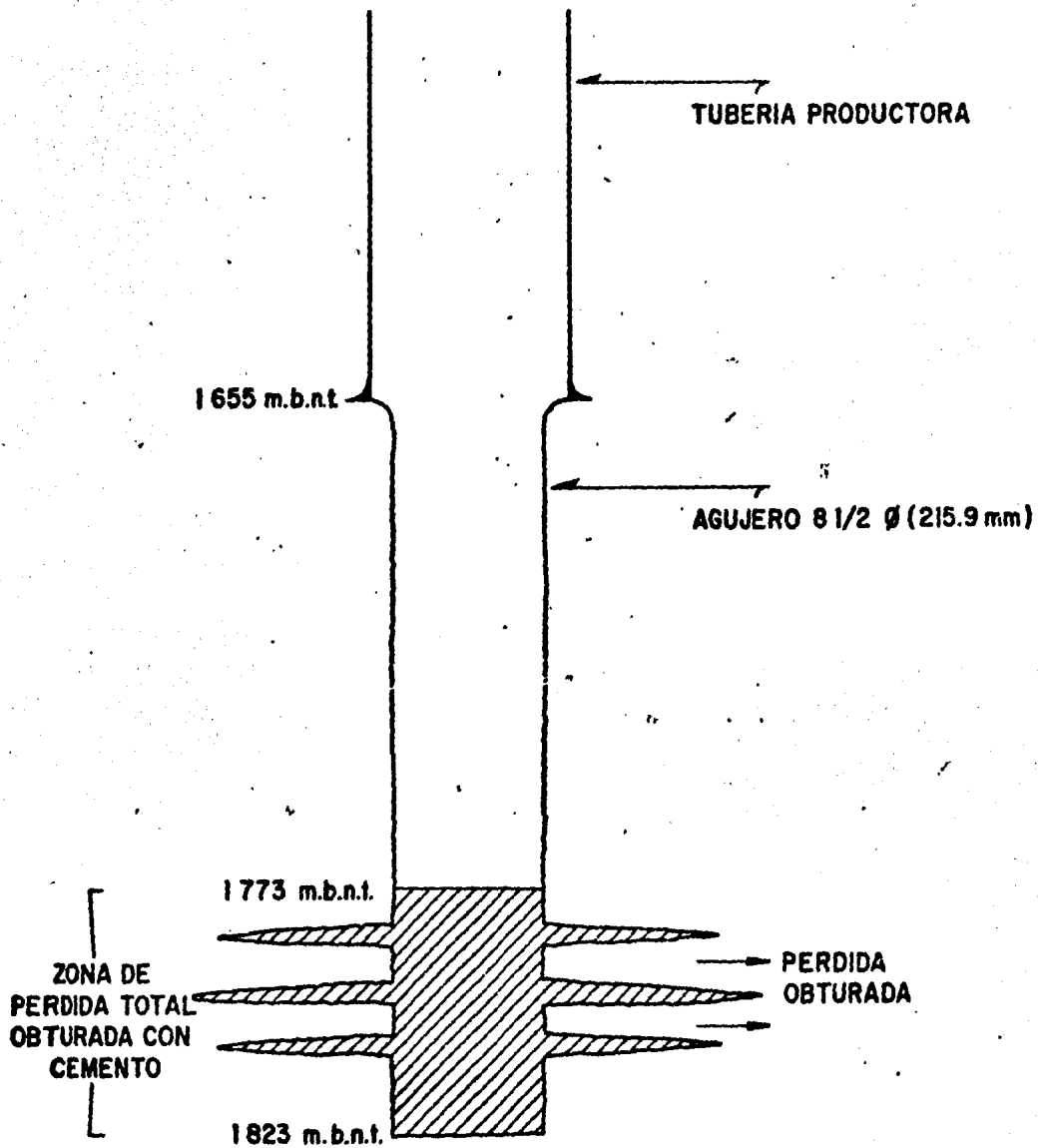


FIG. III.4.14. PERDIDA DE CIRCULACION OBTURADA CON CEMENTO.

- 1.- Derrumbes de formación.
- 2.- Agrandamiento del agujero.
- 3.- Puentes de formación.
- 4.- Atrapamientos de la sarta de perforación.
- 5.- Dificultades en el control de sólidos.
- 6.- Incremento en el costo de fluido de perforación.

Las condiciones mecánicas que deben ser consideradas como posibles - contribuyentes a la inestabilidad del pozo son:

- a) La erosión del agujero debido a flujo turbulento en el espacio - anular.
- b) Diferencia entre la presión de formación y la presión hidrostática de la columna de lodo (presión de formación mayor que la presión hidrostática).
- c) La acción mecánica de la sarta de perforación al rozar con las paredes del pozo ya sea por excesiva velocidad de rotación o por - que la sarta no esté tensionada correctamente al estar perforando.
- d) Acción de pistoneo, causada por la excesiva velocidad a la que se introduce o saca la sarta de perforación del pozo.

En Cerro Prieto, los derrumbes al estar perforando en agujero 12 1/4" \emptyset (311.15mm) se presentan al atravesar la zona de transición de lodolita a lutita café y gris.

La lutita es una roca de grano fino sumamente compacta, está compuesta de diferentes minerales como el cuarzo, feldespato, dolomita, calcita, siderita y yeso., que constituyen su fracción inerte y contribuyen a la inestabilidad mecánica de la lutita. Otros minerales encontrados son la kaolinita, ilitas, clorita, montmorillonita y mezclas de capas de arcillas que constituye la fracción reactiva de las lutitas, las que contribuyen a la hidratación. El mecanismo de hidratación es debido principalmente a la adsorción de moléculas polares (como el agua) o iones como el sodio en arcillas que no se encuentran consolidadas, produciendo cambios en su densidad, reducción de fuerzas de confinamiento y alteración en su resistencia-

eléctrica.

Si las rocas arcillosas adsorben agua y no se encuentran libres para expanderse, la roca tenderá a fracturarse, lo cual es producto de las fuerzas internas generadas. En las operaciones de perforación estas fuerzas se incrementan originando el derrumbe de las paredes del pozo.

Los cuatro factores principales que afectan la estabilización de las paredes del pozo en lutitas son:

- 1.- Propiedades del fluido de perforación. Dentro de las cuales las mas importantes son la densidad y, la cantidad y composición química del filtrado.
- 2.- Tiempo.
- 3.- Formación.
- 4.- Temperatura.

Insuficiente densidad en el lodo ocasiona que, la presión de las lutitas las haga caer de la pared del agujero resultando que gran cantidad de astillas de lutita se incorporen al fluido de perforación. Esta condición se corrige aumentando la densidad del lodo, cuando las condiciones lo permiten.

La cantidad de pérdida de agua en el agujero y la composición química del filtrado se considera la más importante variable en la estabilización de las lutitas. Algunas lutitas son extremadamente sensibles al agua y se hidratan o fracturan al contacto de agua dulce. Este tipo de lutitas generalmente contiene gran cantidad de arcillas reactivas las cuales requieren inhibidores químicos para evitar su hidratación y dispersión dentro del sistema de lodo, lo que ocasiona un aumento en la viscosidad de éste.

El tiempo es un factor importante ya que la estabilidad de la lutita aumenta a medida que ésta permanece más en contacto con el fluido de perforación, debido a la formación del enjarre y el mejoramiento en las propie-

dades del fluido de perforación, siempre y cuando se esté usando el fluido adecuado para inhibir la pérdida de agua y por lo tanto la hidratación y el fracturamiento de la lutita. El tipo de formación que se espera encontrar debe ser considerado, ya que ciertos tipos de lutitas reaccionan de varias maneras y crean diferentes tipos de problemas.

Por último la temperatura juega un papel sumamente importante en la estabilización de las lutitas debido a los efectos que en ellas produce un incremento de la misma, ya que puede deteriorar las propiedades químicas del fluido de perforación.

El problema de derrumbe en zonas de lutita deleznable en Cerro Prieto se prevee reduciendo el filtrado del lodo a menos de $6 \text{ cm}^3/30\text{min}$ antes de perforar la zona problema esperada. Cuando el derrumbe no fué previsto y se presenta al estar perforando, el aumento en la densidad del lodo ha dado resultados no muy confiables ya que en algunos casos se han inducido pérdidas de circulación debido a la excesiva presión hidrostática producida por el aumento en la densidad de la columna de lodo.

C) Pérdidas de circulación durante la cementación de tuberías de revestimiento.

Este problema se tratará con detalle más adelante en la sección de cementación de tuberías de revestimiento.

D) Pegaduras de la sarta de perforación debido a presiones diferenciales.

La pegadura de la sarta de perforación por presión diferencial de la tubería ocurre cuando la presión hidrostática de la columna de lodo es mayor que la presión de formación, y esta formación es permeable, como una arena (ver figura III.4.15.), en donde la resistencia a la fricción entre la sarta y la pared del pozo es función del espesor del enjarre.

El tiempo es un factor importante en la severidad de la pegadura, después de que la tubería se pega, la filtración continúa, depositando só-

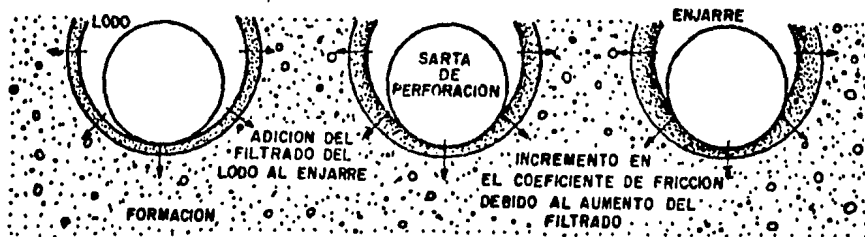
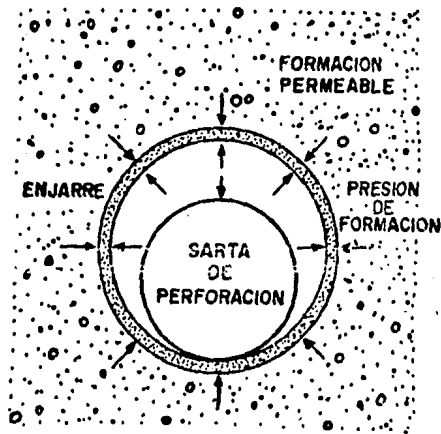
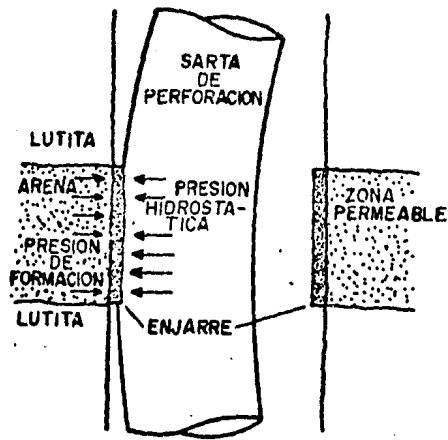


FIG.III.4.15. SARTA DE PERFORACION PEGADA DEBIDO A PRESION DIFERENCIAL.

lidos en la interfase que se crea entre la tubería y el enjarre, incrementando a su vez el área de contacto., si el filtrado continúa, disminuye el contenido de agua del enjarre, aumentando así el coeficiente de fricción - entre la tubería y la pared del pozo.

Las medidas de prevención más comunes para evitar las pegaduras por - presión diferencial son las siguientes:

A) Mecánicas.

- 1.- Manteniendo la tubería en movimiento.
- 2.- Evitando conexiones lentas.
- 3.- Usando lastrabarreras ranurados.

B) Relativas al fluido de perforación:

- 1.- Manteniendo la densidad del lodo cercana al control de la presión de formación
- 2.- Manteniendo el lodo con bajos filtrados.
- 3.- Agregando aceite al lodo de manera que la acción lubricante del aceite hacia la sarta de perforación, permita mejor lubricación y reducción en la posibilidad de una pegadura.

Debido a la gran cantidad de zonas permeables con muy bajas presiones de formación, en Cerro Prieto son frecuentes las pegaduras por presión diferencial aún manteniendo el lodo emulsionado con diesel y llevando a cabo sistemáticamente las medidas de prevención antes mencionadas.

Cuando la pegadura se presenta el método más usado para despegar la - tubería es la colocación de un "bache" de diesel con el 5% de surfactante y dispersante de arcillas alrededor de los lastrabarreras., el cual al penetrar al enjarre, por la acción dispersante del mismo y la acción lubricante del diesel reducen el coeficiente de fricción entre la tubería y la pared del pozo, logrando en la mayoría de los casos buenos resultados.

Cuando no es posible despegar la tubería con "baches" de diesel, se -

recurre a detectar el punto libre de la sarta para posteriormente desconectar la misma, por medio de un cordón explosivo.

Una vez con la sección de tubería pegada en el fondo, se procede a "lavar" dicha sección para su posterior recuperación. Este último método resulta excesivamente caro, y es recomendable hacer un estudio económico para conocer cuanto tiempo resulta costeable tratar de recuperar la tubería o en su defecto abandonar el pozo, o bien desviarlo.

E) Pescas.

Quando por alguna circunstancia se provoca un "pescado", la "pesca" adecuada se puede tornar casi imposible, en función del tiempo transcurrido desde la aparición del pescado hasta el momento en que se trata de "pescarlo", debido a las altas temperaturas prevalencientes en el fondo del pozo.

Como ya se mencionó anteriormente, el lodo estático en el fondo del pozo tiende a solidificarse por las altas temperaturas., aunado a esto, el diseño de algunas herramientas, utilizadas en la pesca dependen de características eléctricas, como son los detectores de coples, del punto libre, disparos, etc., que son afectados en razón directa al incremento de la temperatura.

Esta situación impide organizar en forma adecuada la "pesca" tradicional, llegando en algunos casos a tener que abandonar el pozo.

e) AGUJERO 8 1/2"Ø (215.9 mm).

Después de cementar la tubería de producción, se continua perforando con barrena 8 1/2"Ø (215.9mm) desde ± 2500 a ± 3000mm BNT, dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la zona productora.

En esta etapa de la perforación es donde la mayoría de los parámetros

que se toman en cuenta para la terminación del pozo toman vital importancia. Tales parámetros son:

- 1.- Litología.
- 2.- Temperatura del lodo a la entrada y salida del pozo.
- 3.- Registros de temperatura de fondo.

La terminación del pozo se discutirá detalladamente en el capítulo V.

La perforación en agujero 8 1/2"Ø (215.9mm) es básicamente en zonas de intercalaciones de lutita gris y arenisca. En este intervalo todos los problemas encontrados en la perforación del agujero 12 1/4"Ø (311.15mm) - con excepción de los derrumbes se hacen presentes, agravados por los efectos de la alta temperatura de fondo en la zona productora.

Una vez determinado el intervalo productor se corre y cementa una tubería corta, la cual se ancla dentro de la tubería de producción dejando frente a la zona productora una sección, de tubería ranurada, por donde el fluido geotérmico penetra al pozo. La tubería corta es de 7"Ø (177.8 mm) 29 lb/pie (43.23 kg/m) Grado C-75 Rosca Hydril S.E.U.

III.5 TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

Se puede referir a la evolución que desde 1964 hasta la fecha se ha tenido en algunos aspectos de la perforación, a las variaciones sufridas por los ademes en especificaciones, roscas, criterios en la cementación, terminación de los pozos, etc.; la figura III.5.1. muestra la forma en que se han proyectado los perfiles tubulares en grupos de pozos perforados hasta 1984.

En la figura III.5.1. se aprecia el incremento en profundidad a partir de 1964, de más o menos 1200 m, a los pozos perforados del área de C.P. II y C.P. III, en donde se alcanzan profundidades de 2600 m, o más para 1984, asimismo el número, disposición y profundidad de cada elemento tubular ha ido evolucionando, en algunos el espesor de la pared del tubo se ha incrementado en forma significativa, como es el caso de los pozos perforados de los años 1977 y 1978; a últimas fechas en Cerro Prieto, se ha logrado la eliminación total de daños en los ademes, por problemas mecánicos y/o, los corrosivos que en casos anteriores habían sido muy notorios.

La tabla III.5.1. contiene las especificaciones de cada uno de los ademes utilizados durante las diferentes etapas, para cumplir con los diseños que en cada ocasión se decidió utilizar. Esto asociado a la evolución y resultados en contra del tiempo ofrece una base clara y firme para poder orientar diseños futuros, en beneficio de la economía geotérmica.

En base a las estadísticas del campo se ha podido resumir que en casi todos los pozos donde se instaló un solo ademe, para hacer funciones de producción y revestimiento, fallaron, detectándose colapsos, fracturas, invasión de arena, incrustaciones excesivas, aún conatos de descontrol, lo que originó mantenimientos y reparaciones con un costo aproximado del 30% del costo inicial del pozo. Estos problemas fueron comunes en los pozos perforados de 1964 a 1974, pero la mayor incidencia fue en los primeros que se perforaron, ya que además de las condiciones mecánicas - - -

DIAGRAMAS TUBULARES PROTOTIPO

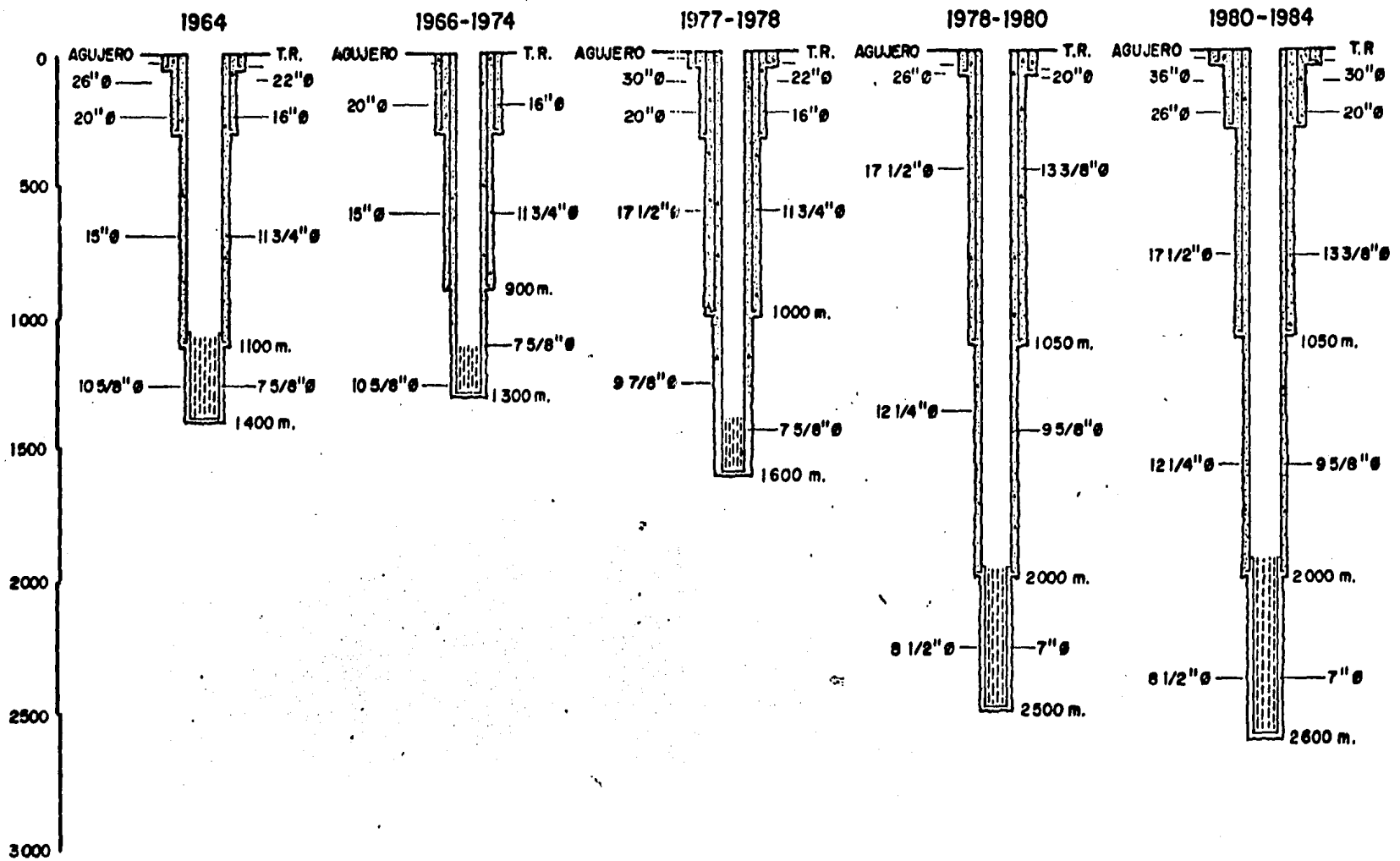


FIG. III.5.1. PERFILES TUBULARES USADOS A LO LARGO DE LA EXPLOTACION DEL CAMPO.

ESPECIFICACIONES DE T.R. USADA DE 1964 A 1984 EN CERRO PRIETO B.C.

FECHA CONSTRUCCION.	CONDUCTOR				SUPERFICIAL				INTERMEDIA				PRODUCCION				LINER RANURADO PRODUC.			
	D.E. PULG.	PESO LB/PIE	GRADO	JUNTA	D.E. PULG.	PESO LB/PIE	GRADO	JUNTA	D.E. PULG.	PESO LB/PIE	GRADO	JUNTA	D.E. PULG.	PESO LB/PIE	GRADO	JUNTA	D.E. PULG.	PESO LB/PIE	GRADO	JUNTA
1964	22	65.24	B	SOL-DADA	16	65	H-40	R.R.	11 3/4	47	J-55	BUT.					7 5/8	26.4	N-80	BUT.
1966 - 1974					16	65	H-40	R.R.	11 3/4	47 60	J-55 K-55	BUT. BUT.	7 5/8	26.4	K-55	BUT.				
1977 - 1978	22		CED. 40	SOL-DADA	16	75	K-55	BUT.	11 3/4	65	K-55	BUT.	7 5/8	45.3	K-55	HY-DRIL S.E.U.				
1978 - 1980					20	94	H-40	R.R.	13 3/8	61	K-55	BUT.	9 5/8	43.5	N-80	BUT.	7	29	N-80	HY-DRIL S.E.U.
1980 - 1984	30	98.93	B	SOL-DADA	20	106.5	J-55	R.R.	13 3/8	68.0	K-55	BUT.	9 5/8	47	C-75	HY-DRIL S.E.U.	7	29	C-75	HY-DRIL S.E.U.

TABLA III.5.1

no se tuvo el cuidado que posteriormente se siguió durante la etapa de calentamiento, la que consiste en elevar gradualmente la presión y temperatura tanto en el cabezal del pozo, como a lo largo del mismo, para evitar cambios bruscos de temperatura dentro del pozo, que agravan los problemas mecánicos ya referidos.

En el caso de pozos ademados con tuberías pesadas, (mayor peso por unidad de longitud) comparándolos con los anteriores, los resultados han sido satisfactorios; esto permite concluir que una alternativa económica es en lugar de utilizar dos ademes, poder utilizar uno solo, siempre y cuando en igualdad de profundidades el diseño contemple un incremento de más o menos un 75% del espesor de la pared del tubo con que se puede aumentar la capacidad contra colapsos y corrosiones.

Se utilizó en los pozos perforados de 1978 a 1980, ademes de grado N-80, y/o L-80, a partir de 1980 se han instalado tuberías de producción, grado C-75.

En las tuberías de ancla Jeque han sido $11\ 3/4''\varnothing$ (298.45 mm) y $13\ 3/8''\varnothing$ (339.72 mm), se ha utilizado el grado K-55, material que supera los problemas corrosivos, en cambio los grados N-80 y L-80, son extremadamente sensibles a las corrosiones por efecto del ácido sulfhídrico (H_2S) y a la fragilización, por lo tanto, se encuentran en observación las tuberías de grado C-75, que son las más recientes instaladas en Cerro Prieto, teniéndose hasta la fecha excelentes resultados.

Los criterios usados actualmente en Cerro Prieto para determinar la profundidad de ademes se basan en la experiencia adquirida durante la perforación. La tubería de ademe representa una tercera parte o más del costo de perforación de un pozo, y la selección adecuada de la misma permite obtener importantes ahorros en un proyecto geotérmico.

La selección de la tubería de ademe está basada en las condiciones de las formaciones que se atraviesan para alcanzar la zona productora, y aún cuando es posible seleccionar adecuadamente la tubería, es importante determinar la profundidad a la que llegará cada columna de tubería, lo

cual en conjunto establece el programa de revestimiento de un pozo.

Las funciones principales del ademe se resumen en las siguientes:

- 1.- Soportar las paredes del pozo y evitar el derrumbe de formaciones no consolidadas.
- 2.- Proporcionar un agujero de diámetro conocido através del cual pueden efectuarse las operaciones subsecuentes de perforación, terminación y producción.
- 3.- Proporcionar un medio para controlar la presión del pozo.
- 4.- Proporcionar un soporte adecuado para las válvulas y conexiones en la superficie, necesarias para el control y manejo de los fluidos producidos.
- 5.- Evitar flujos de una formación a otra y permitir la producción de una zona específica.

De acuerdo a las funciones que desempeña cada tubería, es posible clasificarlas de la siguiente manera:

A) Tubería Conductora.

Diámetro: 30" (762mm)
 Peso Unitario: 98.93 lb/pie (147.32 kg/m)
 Grado: "B"
 Tipo de junta: soldable.

Se perfora con 36"Ø (914.4mm) a \pm 50m., se corre y cementa hasta la superficie la tubería conductora. Su objetivo principal es evitar la erosión o inundación del pozo en la base del equipo, además de proporcionar un conducto para conducir el fluido de perforación a la superficie.

B) Tubería Superficial.

Diámetro: 20" (508 mm)
 Peso Unitario: 106.5 lb/pie (158.59 kg/m)
 Grado: K-55
 Tipo de junta: Rosca buttress cople corto.

Se perfora con 26"Ø (660.40 mm) a ± 300 m., se corre y cementa hasta la superficie la tubería superficial.

La tubería superficial protege al pozo de cavidades internas o fallas que se presentan generalmente cerca de la superficie. También aísla los mantos acuíferos superficiales y soporta las formaciones arenosas no consolidadas.

C) Tubería Intermedia.

Diámetro: 13 3/8" (339.9mm)
Peso Unitario: 68 lb/pie (101.4 kg/mm)
Grado: K-55
Tipo de junta: rosca buttress

Se perfora con 17 1/2"Ø (444.5mm) a ± 1150mt, se corre y cementa hasta la superficie la tubería intermedia. Su objetivo es aislar zonas arenosas y de arcillas hidratables, y proporcionar un medio para instalar el cabezal definitivo 13 3/8" x 10" (339.72 x 254 mm), S-900, donde se instala el árbol de válvulas. La figura III.5.2. muestra la unión mediante soldadura del cabezal y la tubería de revestimiento.

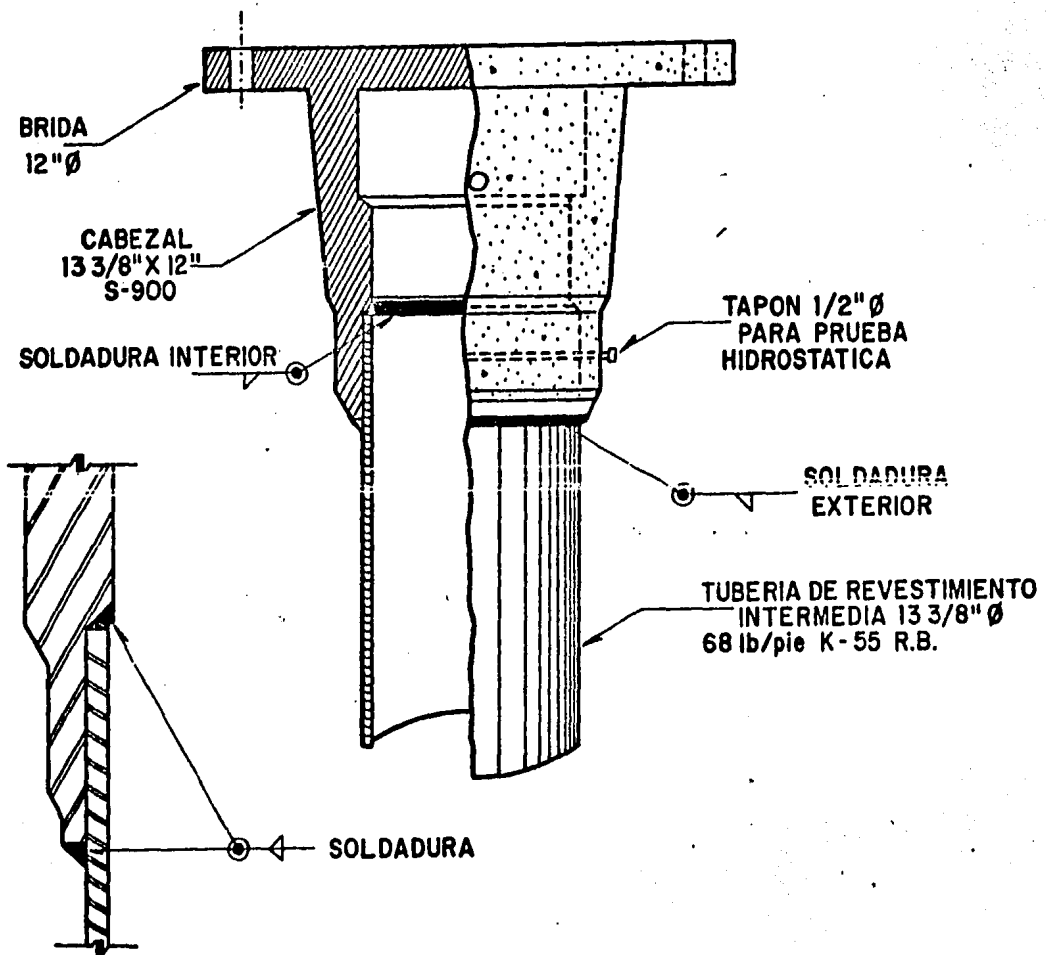


FIG. III. 5.2. UNION DEL CABEZAL DEFINITIVO A LA TUBERIA INTERMEDIA.

D) Tubería Productora.

- Diámetro: 9 5/8" (244.60mm)
- Peso Unitario: 47 lb/pie (70.1 kg/mm)
- Grado: C-75.
- Tipo de Junta: Rosca Hydril S.E.U.

Se perfora con 12 1/2"Ø (311.1mm) a ± 2500mt, se corre y cementa hasta la superficie la tubería productora. Esta tubería aísla la zona de transición de no consolidados a consolidados, y evita los problemas que ocasionan las lutitas deleznable al estar perforando. También aísla la zona de producción y evita flujos de formaciones frías al interior del pozo, siendo a la vez el conducto por el cual el fluido geotérmico viaja a la superficie.

E) Tubería Corta.

- Diámetro: 7" (177.8mm)
- Peso Unitario: 29 lb/pie (43.15 kg/mm)
- Grado: C-75.
- Tipo de Junta: Rosca Hydril S.E.U.

Se perfora con 8 1/2"Ø (215.9mm) de ± 2500m , hasta alcanzar los estratos productores. Se cuelga la tubería corta dentro de la tubería productora, se coloca una sección ranurada frente al intervalo productivo y se cementa la sección ciega de la tubería corta.

La figura III.5.3. muestra el perfil tubular de un pozo en Cerro Prieto, suponiendo un intervalo productor de 2700 a 3000 m .

Las consideraciones básicas al seleccionar un programa de tuberías para pozos geotérmicos se resumen de la siguiente manera:

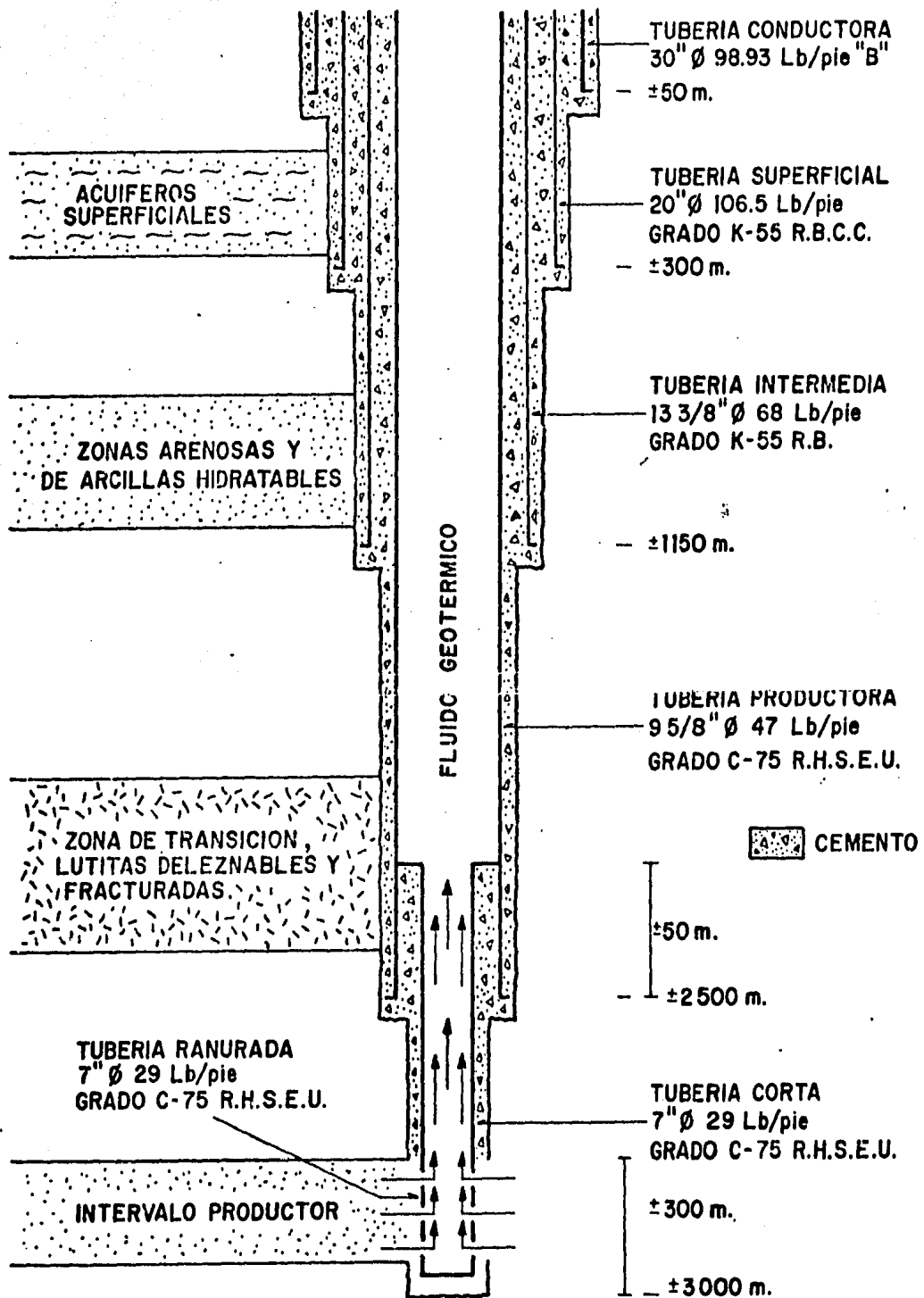


FIG.III.5.3. PERFIL TUBULAR DE UN POZO EN CERRO PRIETO, CON LAS PROFUNDIDADES PROMEDIO DE ASENTAMIENTO DE LOS ADEMES.

- 1.- Resistencia del acero al dióxido de carbono y al ácido sulfhídrico, así como resistencia a la corrosión provocada por los fluidos geotérmicos.
- 2.- Peso y grado, tomando en cuenta las condiciones del yacimiento-geotérmico.
- 3.- Tipo de junta en las tuberías.

III.6 CEMENTACIONES.

La buena terminación de un pozo geotérmico depende en gran parte del éxito obtenido en la cementación de cada una de las tuberías de revestimiento. El éxito en el proceso de cementación requiere no solamente la selección de material competente y durable, sino también el completo entendimiento de las técnicas de colocación del cemento.

Los lodos estáticos, agujeros desviados, pérdidas de circulación, pobre centralización de las tuberías, y la inhabilidad para mover la tubería durante el proceso de cementación son factores importantes que contribuyen a un buen o mal resultado en la cementación.

Las técnicas de perforación y los materiales para cementar pozos de aceite y profundos con temperaturas de fondo de 500° F (260° C), - - - han hecho posible cementar pozos geotérmicos relativamente someros con temperaturas estáticas de 662°F (350°C), como es el caso del pozo M-58 en Cerro Prieto.

Las tuberías de revestimiento en los pozos geotérmicos son afectadas por las altas temperaturas y tienden a elongarse en las partes que no son bien cementadas, sometiendo a la tubería a esfuerzos que provocan la rotura del cuerpo de la misma (ver figura III.6.1.)

Las altas temperaturas hacen necesario circular el fluido de perforación a través de torres de enfriamiento para reducir tanto como sea posible la temperatura de circulación de lodo en el fondo del pozo antes de cementar.

El cemento se debe desplazar hasta la superficie en cada tubería de revestimiento, para reducir el riesgo de un flujo de vapor por el espacio-anular, ya que el fluido geotérmico es altamente corrosivo.

El objetivo de cementar hasta la superficie las tuberías de revesti -

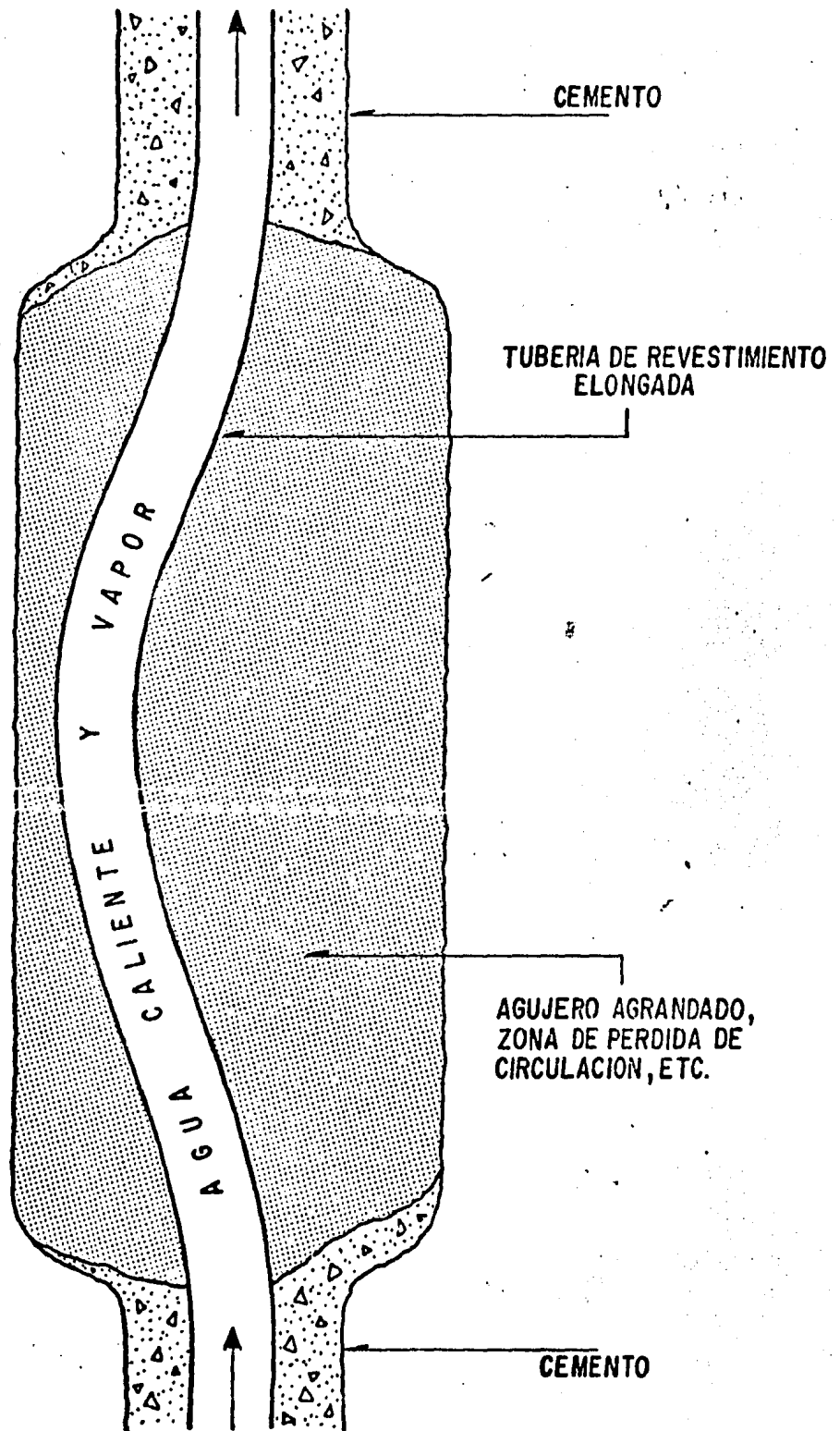


FIG. III.6.1. DOBLAMIENTO DE LA TUBERIA NO SOPORTADA POR EL CEMENTO DEBIDO AL CALENTAMIENTO DEL POZO.

miento es evitar una elongación excesiva y someter a grandes esfuerzos las juntas de la tubería, aparte de proveer un medio de adhesión entre la tubería y la pared del pozo, al mismo tiempo que evita la migración de fluidos entre formaciones comunicadas por el agujero perforado.

El cemento colocado en el espacio anular entre el agujero y la tubería de revestimiento protege la tubería contra la corrosión causada por los fluidos geotérmicos, y evita flujos de agua caliente y vapor por el espacio anular hacia la superficie. El espacio anular entre la tubería de revestimiento y el agujero debe ser de un espesor mínimo de 1.5 pg (38.1 mm), ya que un espesor mas pequeño causa dificultades para obtener una buena centralización de la tubería y a su vez puede causar canalización del cemento durante el desplazamiento del mismo.

En la perforación geotérmica, los mayores problemas durante la cementación se derivan de las altas temperaturas de fondo y zonas de pérdida de circulación. Las altas temperaturas regularmente son esperadas a determinadas profundidades y pueden ser contrarrestados sus efectos adversos en la lechada de cemento agregando los aditivos necesarios. Algunas composiciones de lechadas muestran resultados satisfactorios iniciales con respecto a las fuerzas de compresión del cemento fraguado, pero rápidamente pierden resistencia al estar en contacto con fluidos geotérmicos a altas temperaturas, ocasionando que la permeabilidad del cemento en el espacio anular aumente permitiendo el flujo de agua caliente y vapor entre formaciones con diferentes temperaturas.

En los cementos degradados en pozos geotérmicos que han sido analizados, se han encontrado dos productos; el hidróxido de calcio y el silicato dicalcico. Estos productos aparecen regularmente juntos pero se han encontrado algunas veces solos. La degradación del cemento se inicia a temperaturas de 230°F (110°C) y se acelera al incrementar la misma.

El uso de harina de sílice en concentraciones de 30 al 80% en relación al peso del cemento en seco proporciona un medio de contrarrestar los

efectos adversos del hidróxido de calcio derivado de la degradación del cemento.

La composición básica del cemento usada para cementar tubería de revestimiento con temperaturas arriba de 230°F (110°C), es cemento API Clase "G" con 30-80% de harina de sílice. Las dosificaciones de la lechada también incluyen retardadores de fraguado, reductores de fricción y algunos materiales para pérdida de circulación.

Para determinar que aditivo usar en la lechada, es necesario conocer que características se requieren en el fondo del pozo. Es sumamente importante conocer el tiempo de espesamiento del cemento para poderlo colocar en el espacio anular. La dosificación del cemento y la preparación de la lechada se hacen a condiciones atmosféricas, al bombear la lechada al fondo del pozo existe un incremento de temperatura de varios cientos de grados, a la vez que la lechada se calienta y es sometida a diversas presiones. Debido a lo anterior es necesario agregar a la lechada de cemento retardadores de fraguado y reductores de pérdida de agua ya que la lechada al estar sometida a altas temperaturas tiende a deshidratarse. Es común agregar a la lechada reductores de fricción, puesto que durante el desplazamiento del cemento, la presión de bombeo se incrementa por la presión diferencial existente entre la columna hidrostática del fluido desplazante (lodo) y la columna hidrostática del fluido desplazado (lechada).

Frecuentemente es necesario reducir la densidad de la lechada para reducir a su vez la presión hidrostática de fondo, sobre todo en zonas donde se esperan pérdidas de circulación.

En cualquier pozo, el fluido de perforación recibe mucha atención durante las operaciones de perforación, el enjarre hace posible la estabilidad del agujero antes de correr la tubería de revestimiento y cementar. Una vez que el pozo se termina el lodo no se necesita más y el control de las propiedades del fluido de perforación se discontinúa, se supone que al bombear el cemento hasta la superficie automática-----

mente se desplaza el lodo contenido en el espacio anular.

El completo desplazamiento del lodo por el cemento es un factor crítico en la correcta terminación de un pozo, especialmente en los pozos geotérmicos, ya que al quedar lodo en contacto con la tubería e iniciar a producir vapor, la temperatura aumenta, incrementándose la presión externa sobre la tubería debido al agua contenida en el fluido de perforación que no encuentra un escape al ser calentada, llegando en muchos casos a colapsar la tubería de revestimiento, (ver figura III.6.2.).

TIPOS DE LECHADAS DE CEMENTO USADAS EN LA CEMENTACION DE POZOS EN CERRO PRIETO.

A) Tubería conductora y superficial.

La composición de la lechada para cementar las tuberías conductora y superficial es la mas simple usada actualmente:

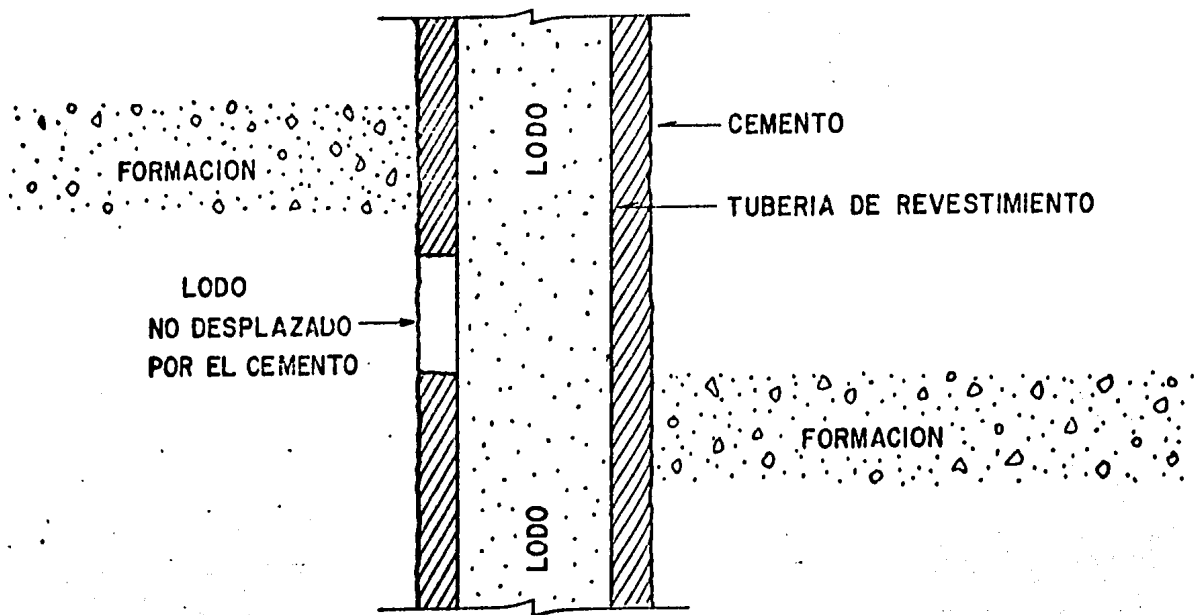
1. Cemento Clase "G".
2. Harina de Sílice 40%.

Los porcentajes de aditivos están dados en relación al peso del cemento en seco.

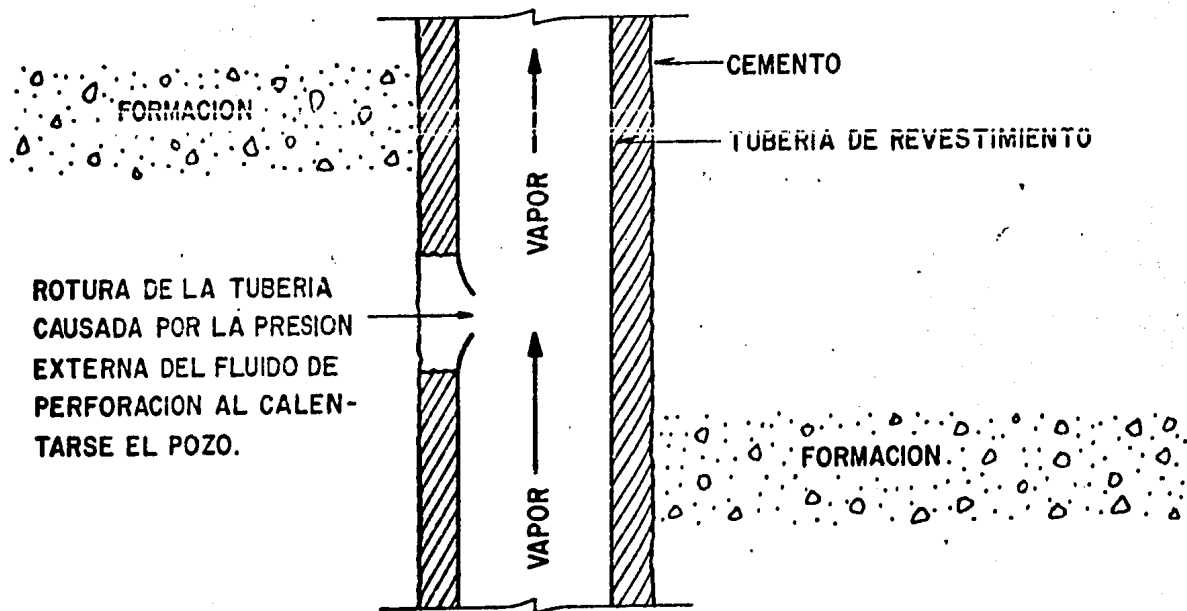
B) Tubería Intermedia.

1. Cemento Clase "G".
2. Harina de Sílice 40%.
3. Perlita, relación 1:1, en volumen cemento.
4. Reductor de fricción 1.25% (nombre comercial CFR-2 blue).
5. Reductor de pérdida de agua y retardador 1.0% (nombre comercial Halad 22-A).
6. Bentonita 3.0%.

Los porcentajes de aditivos están dados en relación al peso del cemento en seco.



(A)



(B)

FIG.III.6.2. A) LODO ATRAPADO EN EL ESPACIO ANULAR DESPUES DE LA CEMENTACION.
 B) ROTURA DE LA TUBERIA CAUSADA POR LA PRESION EXTERNA DEL FLUIDO AL CALENTARSE EL POZO.

C) Tubería de Producción.

1. Cemento Clase "G"
2. Harina de Sílice 40%.
3. Esferelita 50%.
4. Reductor de fricción 1.25% (nombre comercial CFR-2).
5. Reductor de pérdida de agua 0.5% (nombre comercial Halad 22-A).
6. Bentonita 4.0%.
7. Lima hidratado 5.0%.
8. Retardador de fraguado 0.1% (nombre comercial HR-7).

Los porcentajes de los aditivos estan dados en relación al peso del cemento en seco.

D) Tubería Corta.

1. Cemento Clase "G".
2. Harina de Sílice 40%.
3. Esferelita 50%.
4. Reductor de fricción 1.25 % (nombre comercial CFR-2).
5. Reductor de pérdida de agua 0.5% (nombre comercial Halad 22-A).
6. Bentonita 4.0%.
7. Limo Hidratado 5.0%.
8. Retardador de fraguado 0.1% (nombre comercial HR-7).

PROCEDIMIENTOS Y PROBLEMAS COMUNES ENCONTRADOS EN CERRO PRIETO AL CEMENTAR LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

1. Tubería Conectora.

La tubería conectora se cementa hasta la superficie por el método del "stab-in".

El método del "stab-in" consiste en introducir en la tubería de revestimiento un conector que se acopla, ya sea a una zapata flotadora "stab-in" o a un cople flotador, una vez que la tubería de revestimiento se encuentra a la profundidad programada. El conector "stab-in" se baja seguido de tubería de perforación por medio de la cual se bombea el cemento, ahorrando tiempo y volumen al momento de desplazar el mismo. La figura III.6.3. muestra esquemáticamente el conector "stab-in" acoplado a la zapata flotadora de la tubería conectora.

Los problemas durante la cementación en esta etapa son casi nulos, ocasionados muy esporádicamente por la falla del equipo flotador.

2. Tubería Superficial.

La tubería superficial al igual que la tubería conectora se cementa hasta la superficie por el método del "stab-in", variando únicamente en que el conector "stab-in" se acopla al cople flotador colocado un tramo de tubería arriba de la zapata, como se ilustra en la figura III.6.4.

La finalidad de utilizar el método "stab-in" en la cementación de tuberías de revestimiento de diámetro grande, es desplazar a través de la tubería de perforación, volúmenes grandes de cemento con un volumen de desplazamiento pequeño y así desplazar en menos tiempo todo el volumen de cemento para no tener que usar demasiados retardadores que disminuyen la resistencia del cemento y hacen necesario esperar un mayor tiempo de fraguado para continuar los trabajos de perforación.

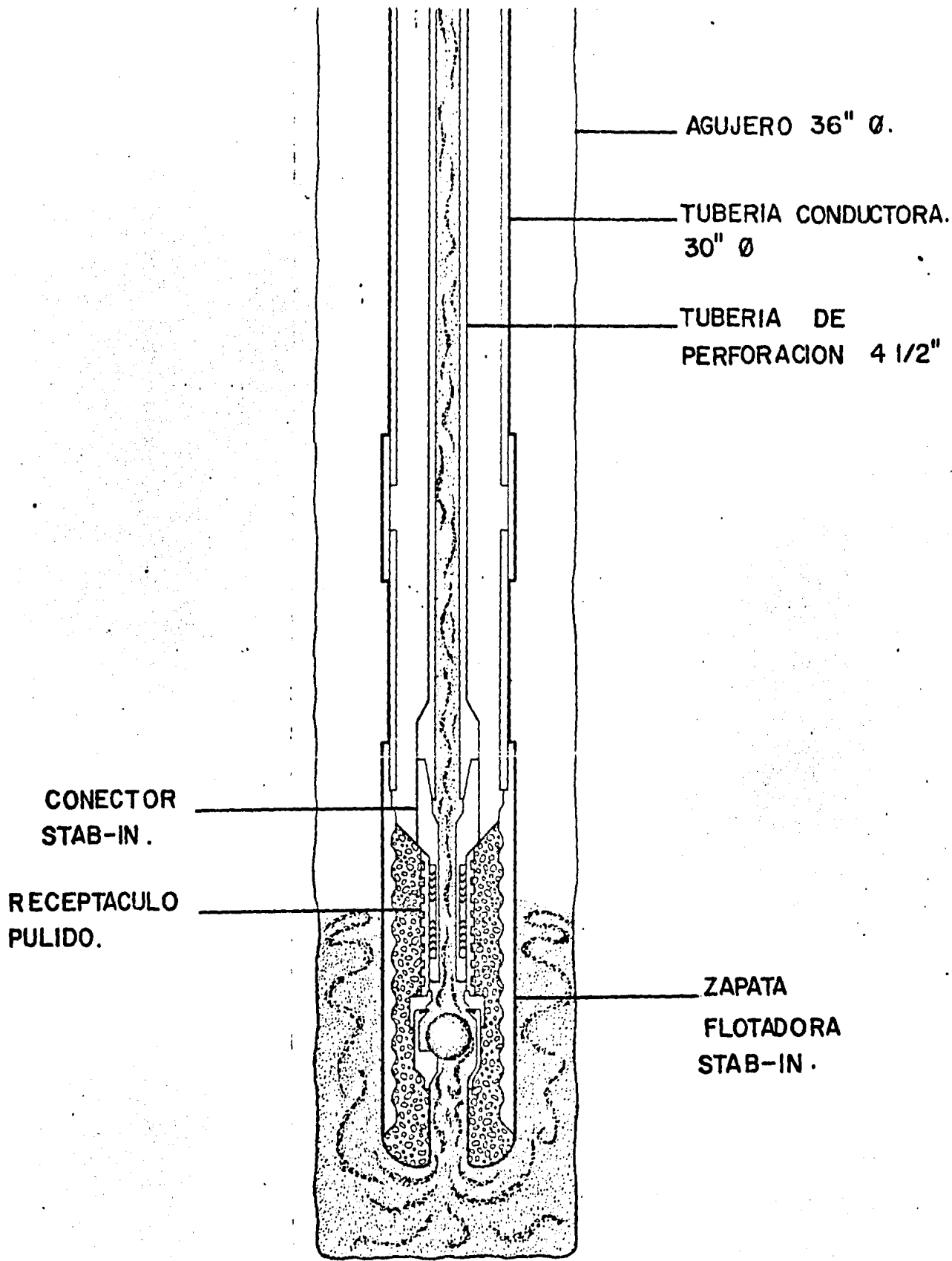


FIG.III.6.3. CONECTOR STAB-IN ACOPLADO A LA ZAPATA FLOTADORA.

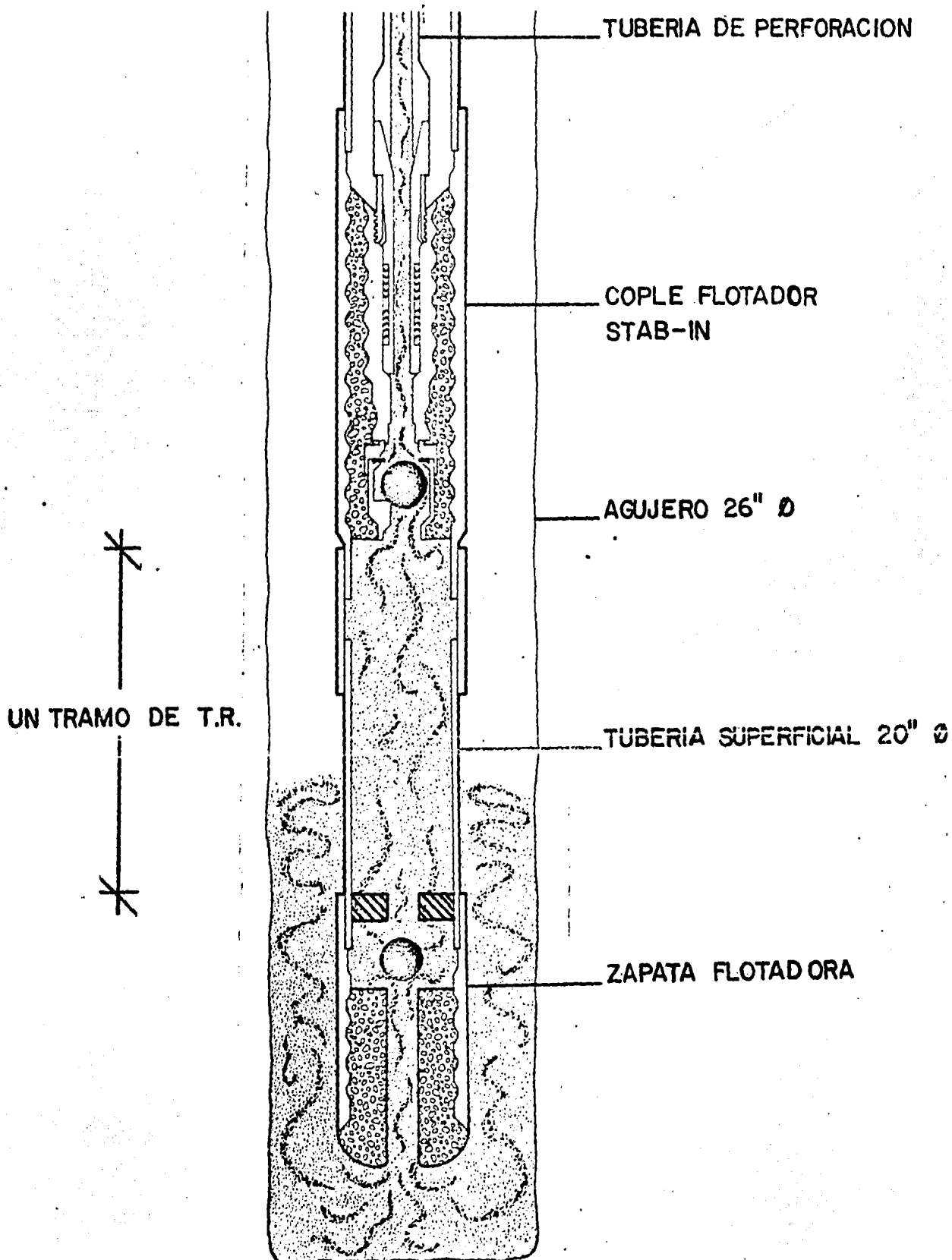


FIG.III.6.4.TUBERIA SUPERFICIAL CON ACCESORIOS STAB-IN.

3. Tubería Intermedia.

También se usa el método del conector "stab-in" para cementar hasta la superficie la tubería intermedia. El cementar esta tubería implica riesgos de provocar una pérdida de circulación al momento de desplazar el cemento, por lo que es común impermeabilizar las zonas débiles con cloruro de calcio y silicato de sodio antes de iniciar la cementación.

4. Tubería de Producción.

La tubería de producción debido a la profundidad a que se baja, se cimenta metódicamente en dos y tres etapas en algunos casos, ya que las estadísticas muestran que se induce la pérdida de circulación al intentar cementar en una etapa el total de la tubería. (Ver figura III.6.5).

El problema clásico al estar, cementando la tubería de producción es la pérdida de circulación en la primer etapa, aún habiendo impermeabilizado las paredes del pozo con cloruro de calcio y silicato de sodio antes de cementar. La pérdida de circulación durante el desplazamiento se presenta debido a que la zona de transición hasta donde se baja la tubería de producción es una formación débil, y en algunas veces cavernosa. Una vez con pérdida de circulación durante el desplazamiento, es recomendable no suspender el bombeo, ya que al hacerlo e intentar iniciar de nuevo se ejerce una presión extra en el fondo del agujero, presión necesaria para hacer fluir al cemento.

Es práctica común en el campo Cerro Prieto cementar la segunda etapa de la tubería de producción independientemente de haber aflorado exceso de cemento o no a la superficie, sin antes haber localizado la cima del cemento de la primera etapa, para efectuar una cementación forzada y no exponer a las tuberías a esfuerzos fuera de su límite al momento de iniciar a producir el pozo, tal como se mostró en las figuras III.6.1. y III.6.2.

La cementación de la segunda etapa de la tubería de producción, dependerá en gran parte de los resultados obtenidos en la pri-

FIG. III.6.5.- PROCESO DE CEMENTACION DE LA TUBERIA PRODUCTORA EN DOS ETAPAS.

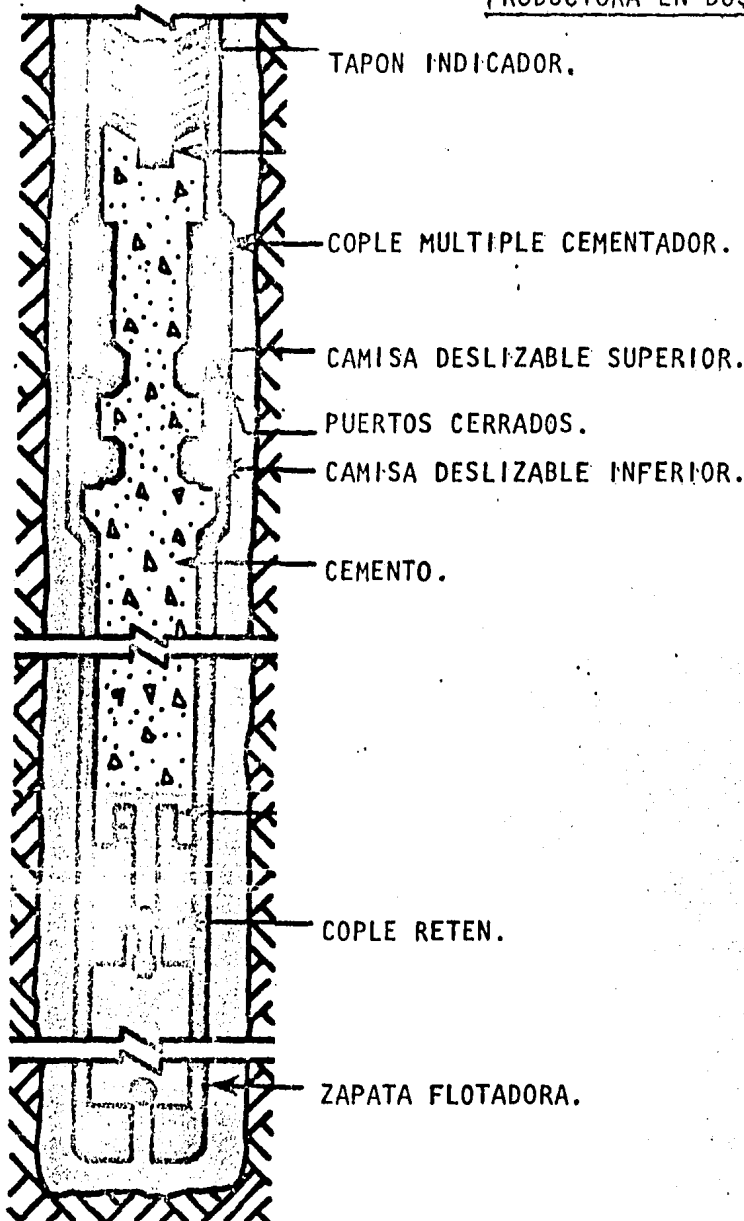


FIG. III.6.5. (A).- AL INICIAR LA CEMENTACION DE LA PRIMER ETAPA, QUE CUBRE HASTA LA PROFUNDIDAD DONDE SE COLOCA EL C.M.C. (COPELE MULTIPLE CEMENTADOR), SE BOMBEA ANTES DEL CEMENTO UN ESPACIADOR QUE CONSISTE EN 8,000 lts. DE AGUA PARA EVITAR LA CONTAMINACION DEL FLUIDO DE PERFORACION.

DESPUES DE BOMBEAR EL AGUA Y EL CEMENTO, SE SUELTA EL TAPON INDICADOR QUE LLEGA AL COPILE RETEN COLOCADO NORMALMENTE UN TUBO ARRIBA DE LA ZAPATA FLOTADORA, SE DESPLAZA EL CEMENTO HASTA EL COPILE RETEN Y AL NOTAR UN INCREMENTO REPENTINO EN LA PRESION DE DESPLAZAMIENTO INDICARA -- LA LLEGADA DEL TAPON INDICADOR.

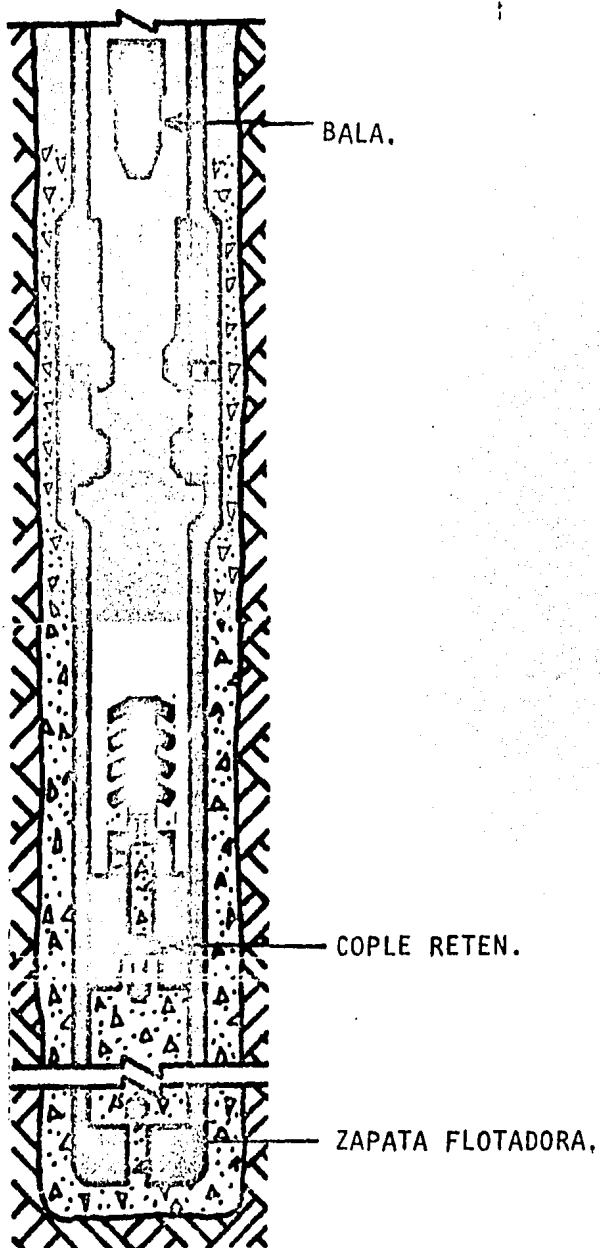


FIG. III.6.5. (B).- DESPUES DE LA LLEGADA DEL TAPON INDICADOR AL COPLE RETEN SE SUELTA OTRO TAPON COMUNTE LLAMADO "BALA" QUE SE ALOJA EN LA CAMISA INFERIOR DESLIZABLE DEL C.M.C. (VER DETALLE EN LAS FIGURAS III.6.5. (B-1) Y III.6.5. (B-2)), Y CON PRESION EJERCIDA EN LA SUPERFICIE SE ABREN LOS PUERTOS DEL C.M.C. PARA CIRCULAR A TRAVES DE ELLOS, HASTA ELIMINAR EL EXCESO DE CEMENTO DE LA PRIMERA ETAPA.

AL TERMINAR DE AFLORAR EL EXCESO DE LA PRIMER ETAPA SE ESPERAN 12 HORAS DE FRAGUADO ANTES DE INICIAR EL BOMBEO DE LA SEGUNDA ETAPA.

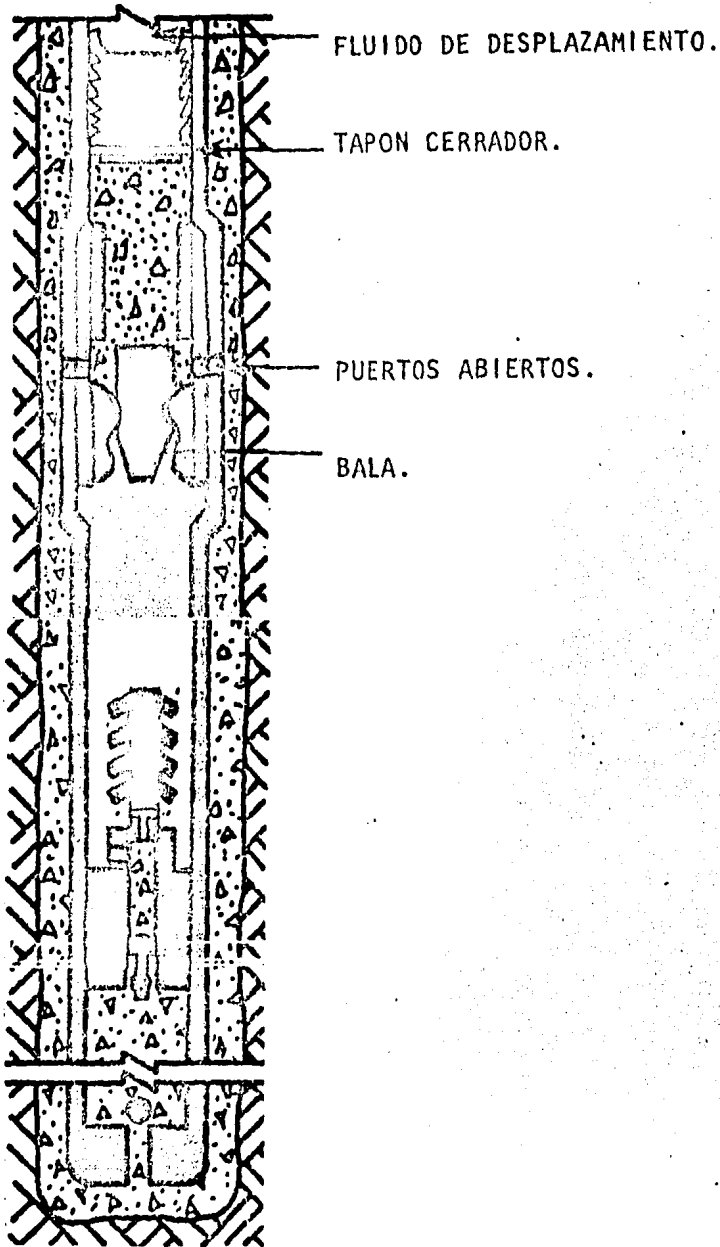


FIG. III.6.5. (c). - UNA VEZ TERMINADO EL TIEMPO DE FRAGUADO DE LA PRIMER ETAPA, SE INICIA LA CEMENTACION DE LA SEGUNDA.

A TRAVES DE LOS PUERTOS AUN ABIERTOS DEL C.M.C. SE BOMBEA EL ESPACIADOR DE AGUA Y EL CEMENTO; AL TERMINO DEL BOMBEO DEL CEMENTO SE SUELTA EL TAPON CERRADOR Y SE INICIA EL DESPLAZAMIENTO DEL CEMENTO.

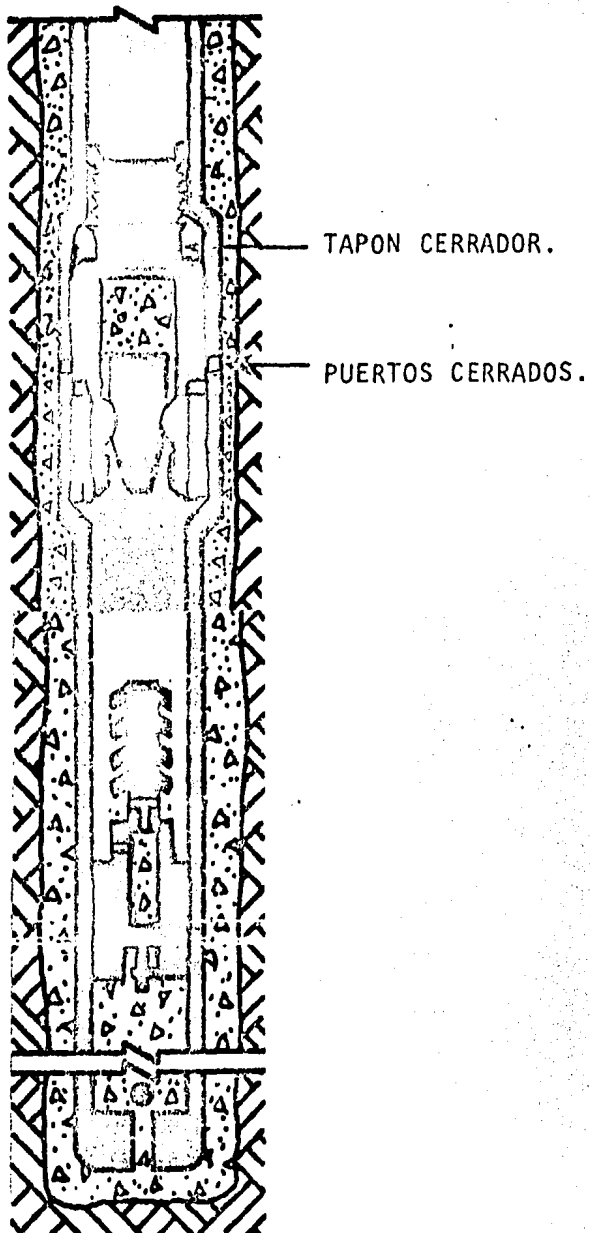


FIG. III.6.5.(D).- AL TERMINAR EL DESPLAZAMIENTO DEL CEMENTO DE LA SEGUNDA ETAPA, EL TAPON CERRADOR SE ALOJA EN LA CAMISA DESLIZABLE SUPERIOR DEL C.M.C. Y CON PRESION EJERCIDA EN LA SUPERFICIE, SE CIERRAN LOS PUERTOS (VER DETALLE EN LA FIGURA III.6.5.(D-1)), DANDO POR TERMINADA LA CEMENTACION.

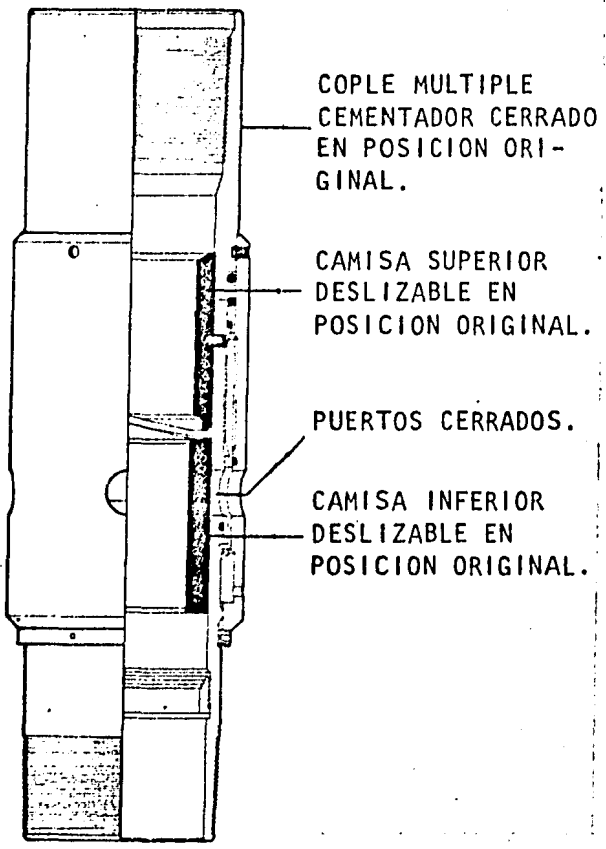


FIG. III.6.5(B-1).

COPLE MULTIPLE
CEMENTADOR CERRADO.

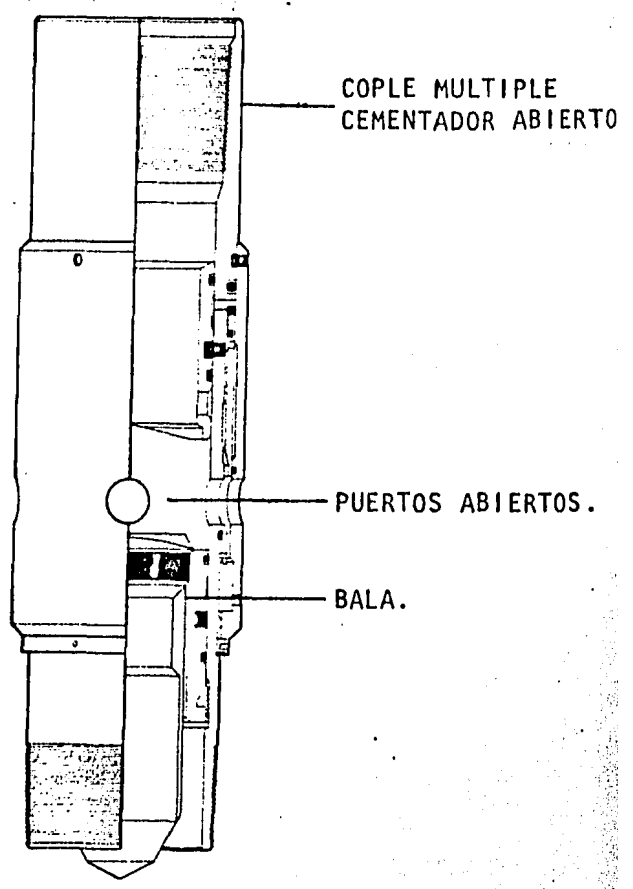


FIG. III.6.5(B-2).

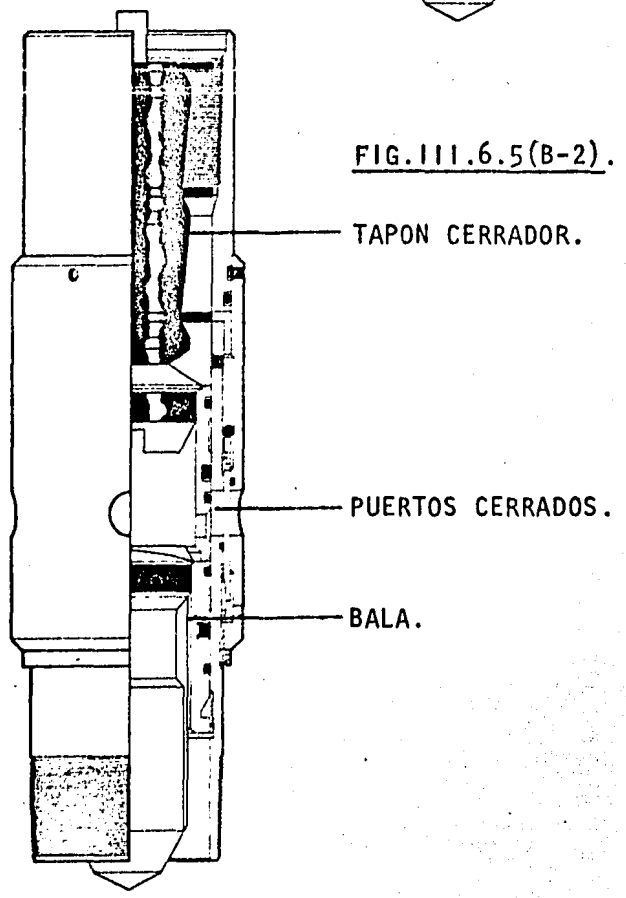


FIG. III.6.5(D-1).

mera etapa. Cuando en la primera etapa no aflora a la superficie el exceso de cemento programado, ya sea por error en cálculos o pérdida de circulación, es común que se presente pérdida de circulación al desplazar el cemento de la segunda etapa, trayendo como consecuencia no llenar de cemento hasta la superficie el espacio anular. Este problema no es tan serio como en el caso de la primer etapa, pues es posible arenar el espacio anular - faltante de cemento desde la superficie, ver figura III.6.6.

5. Tubería Corta.

Como se vió anteriormente, la tubería corta esta compuesta por tubería ranurada en su parte inferior y tubería ciega en la parte superior. La parte ranurada cubre la zona productora, y no se cementa, la parte ciega se cementa en su totalidad hasta la boca del colgador, ver figura III.6.7.

El proceso de cementación de esta tubería, se efectua auxiliando de un "cople especial" colocado entre la tubería ciega y ranurada, el cual permite el flujo por sus puertas laterales, impidiendo circular por su parte inferior con una placa de material perforable, como se ilustra en la figura III.6.8. y III.6.9.

En condiciones normales sin pérdida de circulación, se cementa utilizando el cople especial, cuando durante la perforación se trabajó con pérdida total, es práctica común cementar desde la boca del colgador hacia abajo con preventor cerrado, obteniendose buenos resultados en la mayoría de los casos, como se muestra en la figura III.6.10.

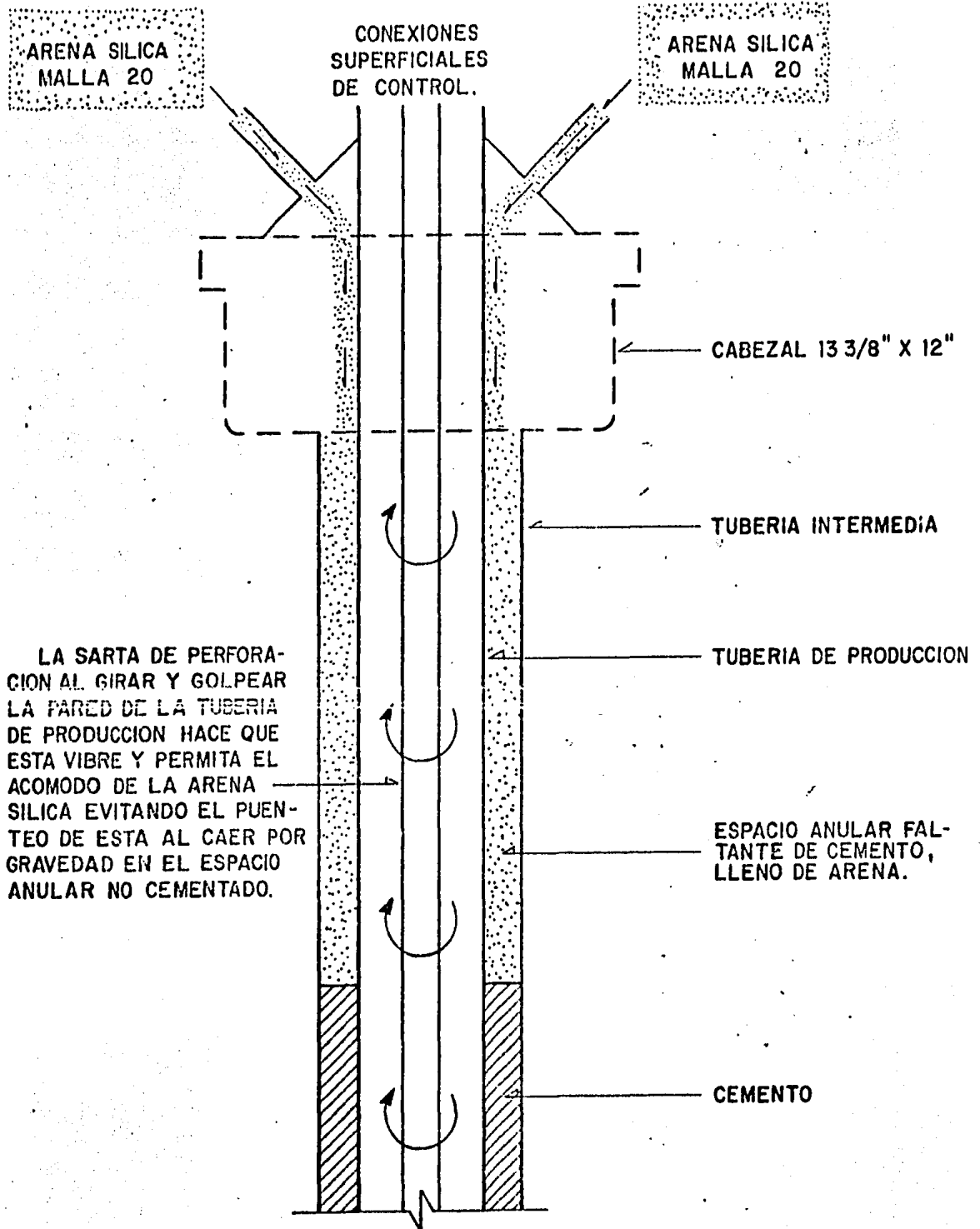


FIG. III.6.6. PROCESO DE ARENAMIENTO ENTRE TUBERIAS.

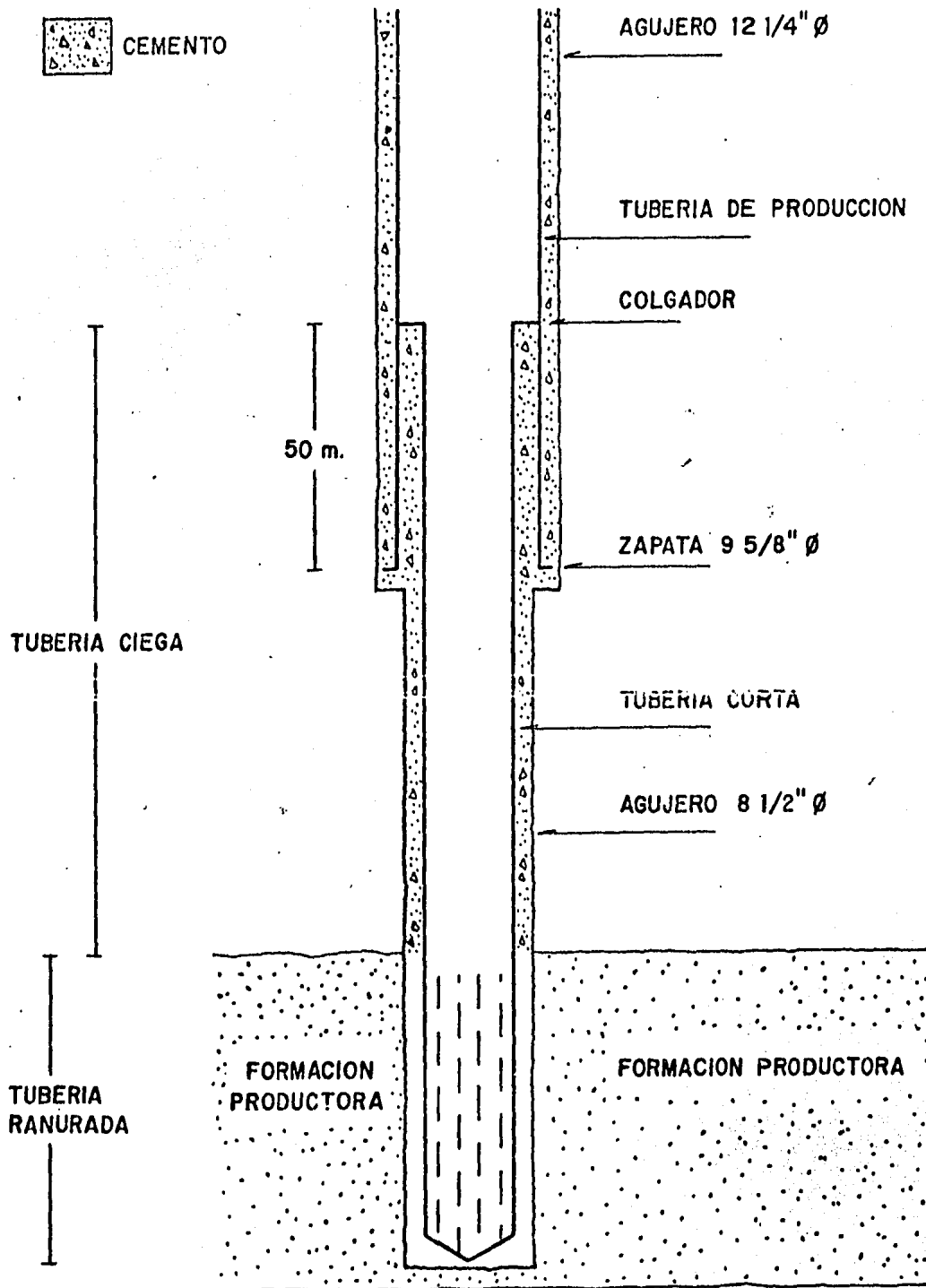


FIG. III.6.7. TUBERIA CORTA CEMENTADA EN SU PARTE CIEGA HASTA LA BOCA DEL COLGADOR.

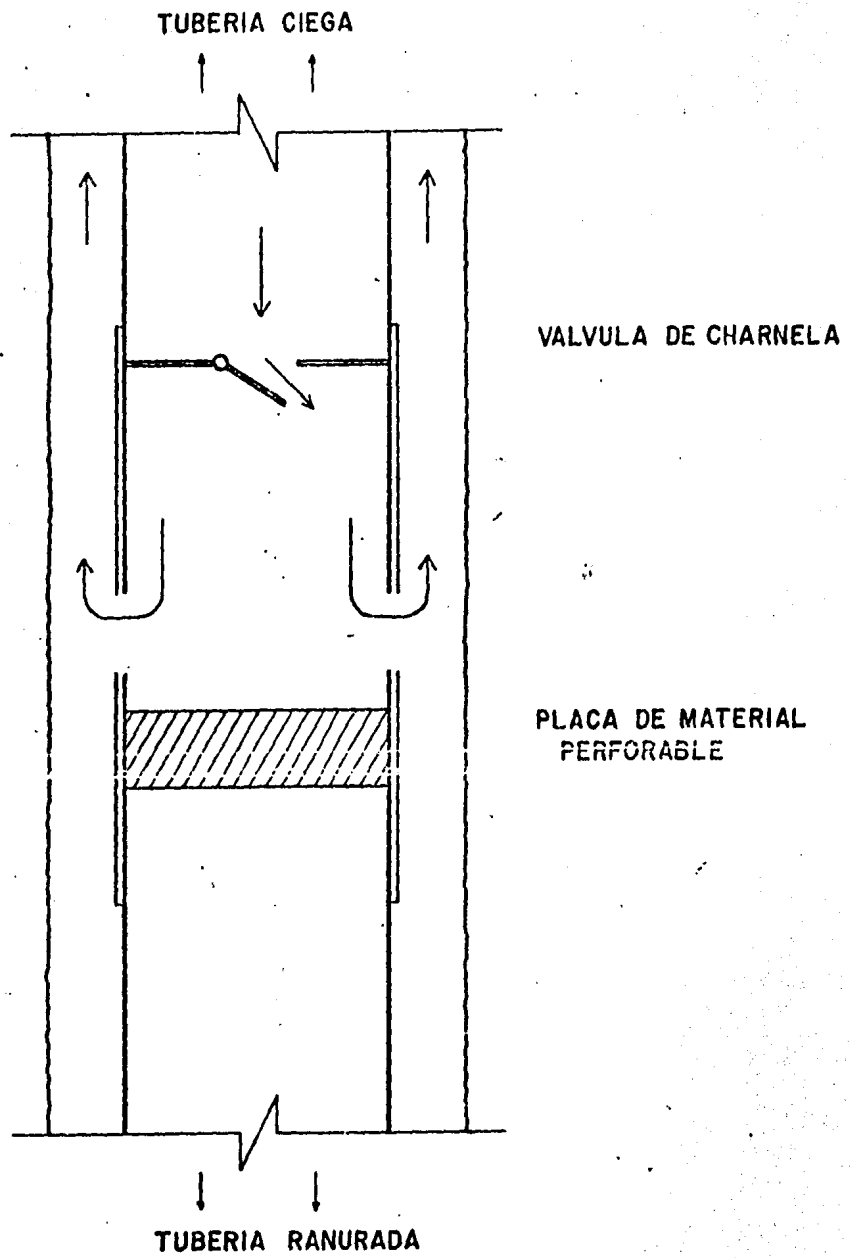
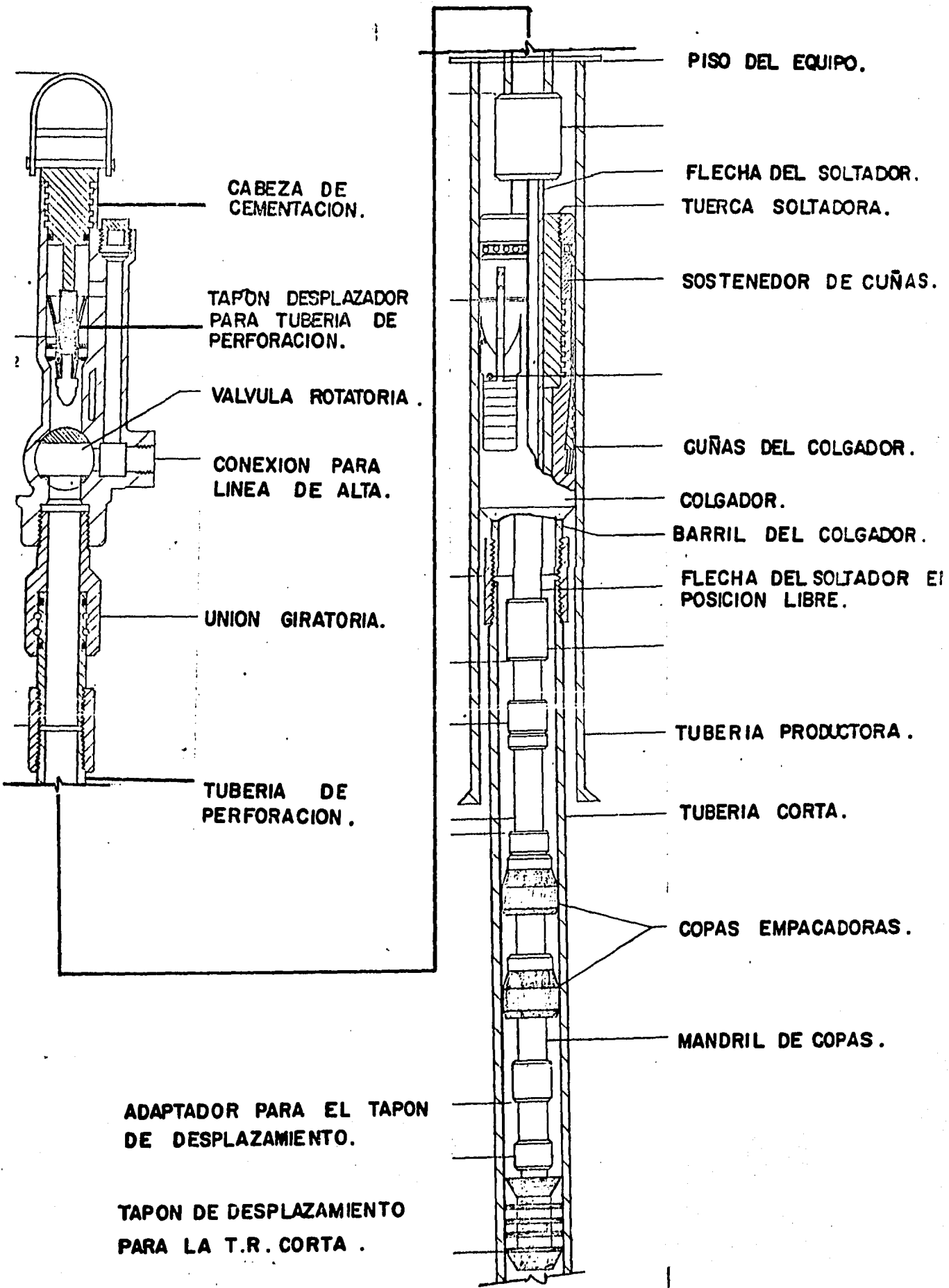


FIG. III. 6. 8. COPLE ESPECIAL



CABEZA DE CEMENTACION.

TAPON DESPLAZADOR PARA TUBERIA DE PERFORACION.

VALVULA ROTATORIA .

CONEXION PARA LINEA DE ALTA.

UNION GIRATORIA.

TUBERIA DE PERFORACION .

PISO DEL EQUIPO.

FLECHA DEL SOLTADOR.
TUERCA SOLTADORA.

SOSTENEDOR DE CUÑAS.

CUÑAS DEL COLGADOR.

COLGADOR.

BARRIL DEL COLGADOR.

FLECHA DEL SOLTADOR EN POSICION LIBRE.

TUBERIA PRODUCTORA .

TUBERIA CORTA.

COPAS EMPACADORAS .

MANDRIL DE COPAS .

ADAPTADOR PARA EL TAPON DE DESPLAZAMIENTO.

TAPON DE DESPLAZAMIENTO PARA LA T.R. CORTA .

FIG. III.6.9.- APAREJO PARA CEMENTAR Y COLGAR LA TUBERIA CORTA.

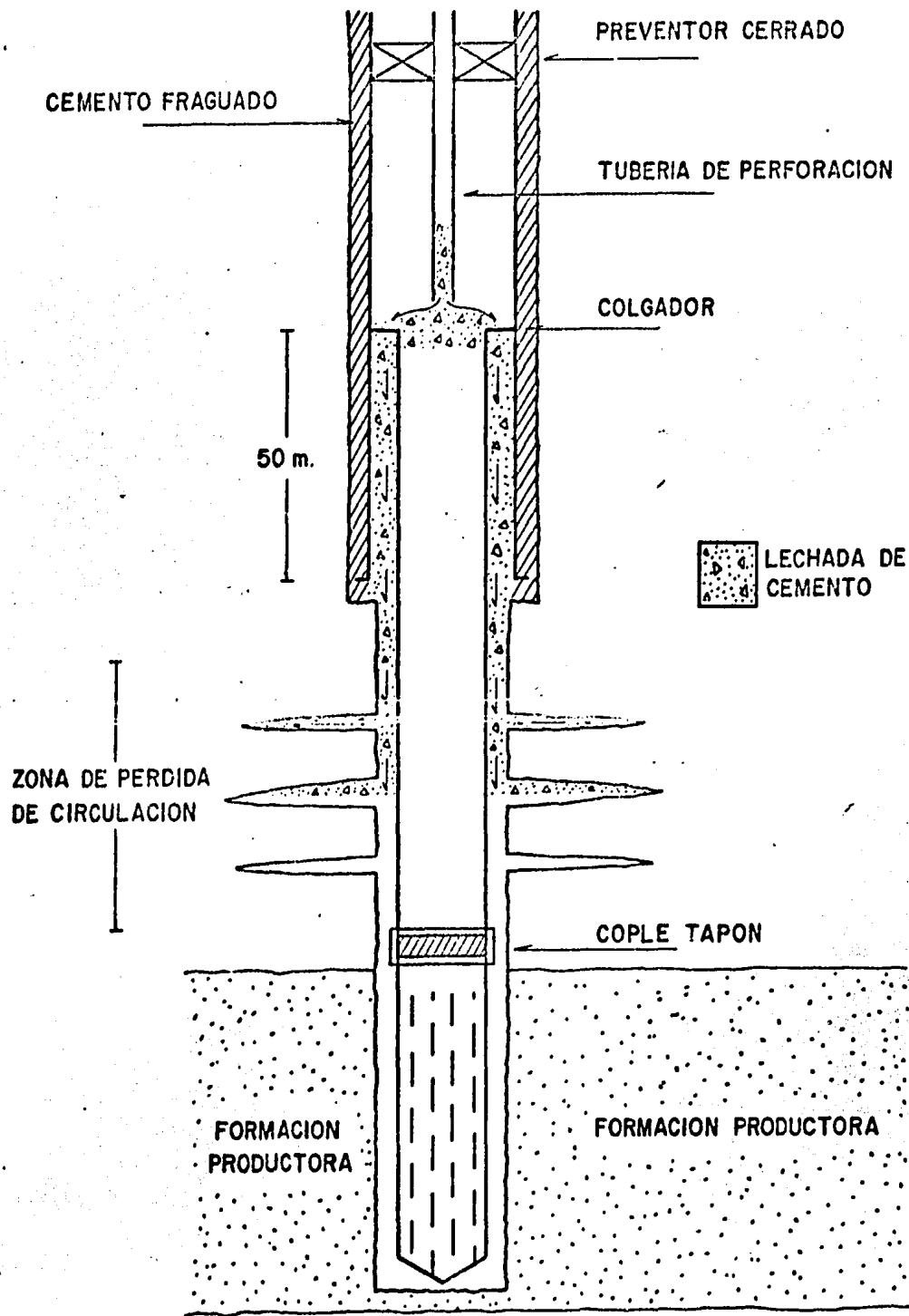


FIG. III.6.10. CEMENTACION DE LA TUBERIA CORTA CON PREVENTOR CERRADO POR LA BOCA DEL COLGADOR.

CAPITULO IV. TERMINACION DEL POZO.

IV.1 CRITERIO DE TERMINACIONES.

Los criterios para terminaciones de pozos geotérmicos en Cerro Prieto han evolucionado, tanto como otros aspectos técnicos que se han discutido anteriormente.

En los primeros pozos del campo únicamente se utilizó la información que se obtuvo de los registros eléctricos, registros de temperatura y columna litológica, para seleccionar el intervalo productor, como sucedió en el pozo M-5, ver figura IV.1.1.

En esta época el criterio interpretativo y correlativo de dicha información fue relativamente pobre, y así en varios pozos las terminaciones barcaron estratos diferentes conteniendo mezcla agua-vapor con distintas composiciones químicas, además, dado que los registros de temperatura al realizarse por estaciones pudieron incluir estratos con temperaturas menores, dando como resultado final una mezcla con menos contenido energético con tendencia a desarrollar en forma rápida incrustaciones dentro de las tuberías de producción, como ocurrió en el pozo M-11, ver figura IV.1.2. En este pozo la terminación se efectuó en dos intervalos, uno de 872.85 a 964.32 m., y el segundo de 1138 a 1211.88m ., la selección de estos intervalos se apoyó en los registros térmicos que no distinguieron claramente la zona más favorable; a la postre en este pozo hubo problemas severos de incrustación, y requirió una reparación total, dejando abierto únicamente el estrato inferior que ofreció más capacidad energética; el análisis de la serie de registros térmicos que se tomó para su terminación fueron poco significativos, por lo que indistintamente cualquier alternativa pudiera ser adecuada., sin embargo, los resultados finales no confirmaron esta conclusión, esto es un ejemplo de la insuficiencia para precisar con mayor rigor la zona por explotar.

Un ejemplo en donde únicamente apoyándose en la columna litológica, registros eléctricos y registros de temperatura, se pudo desarrollar una

POZO M-5

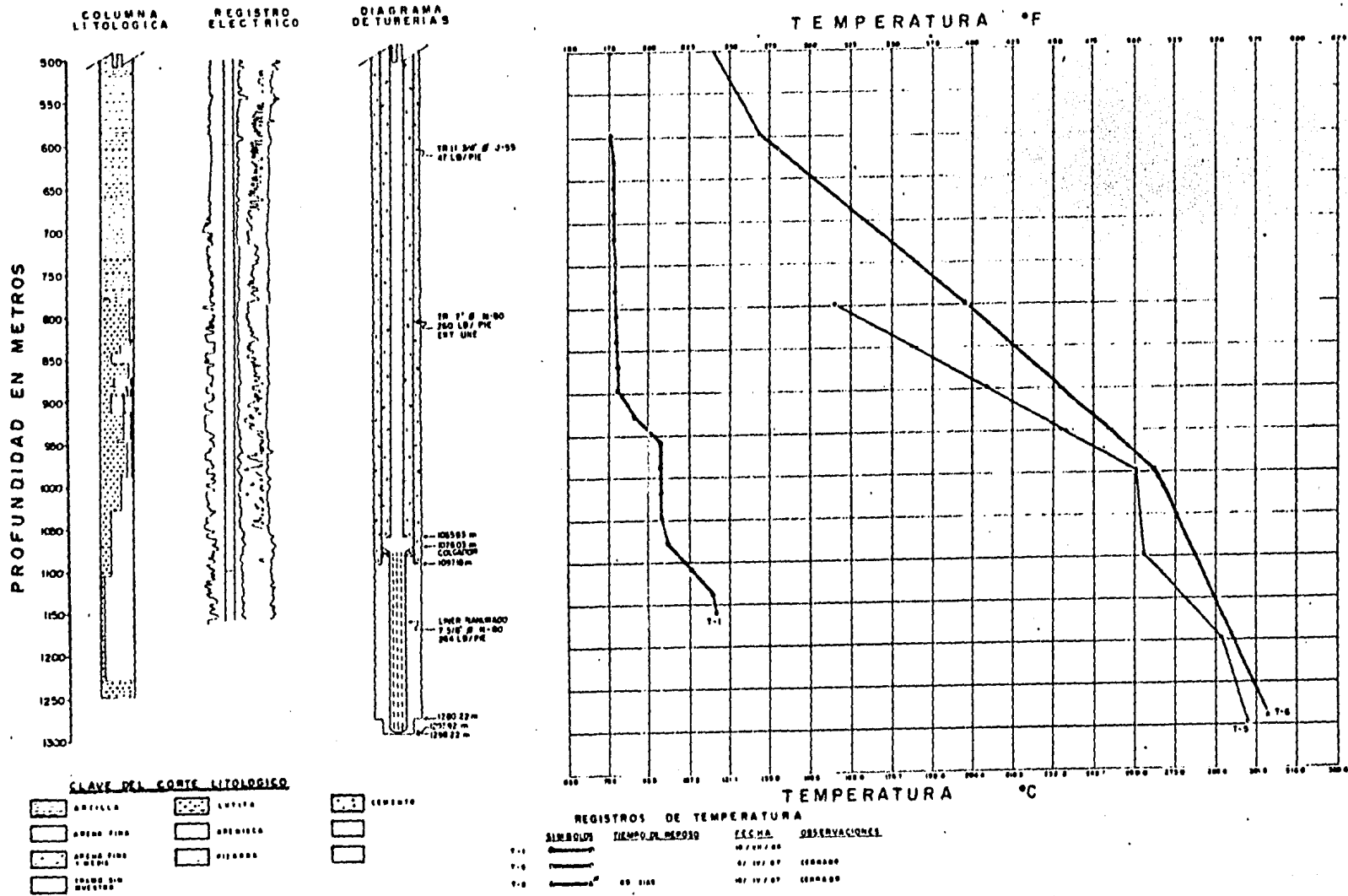
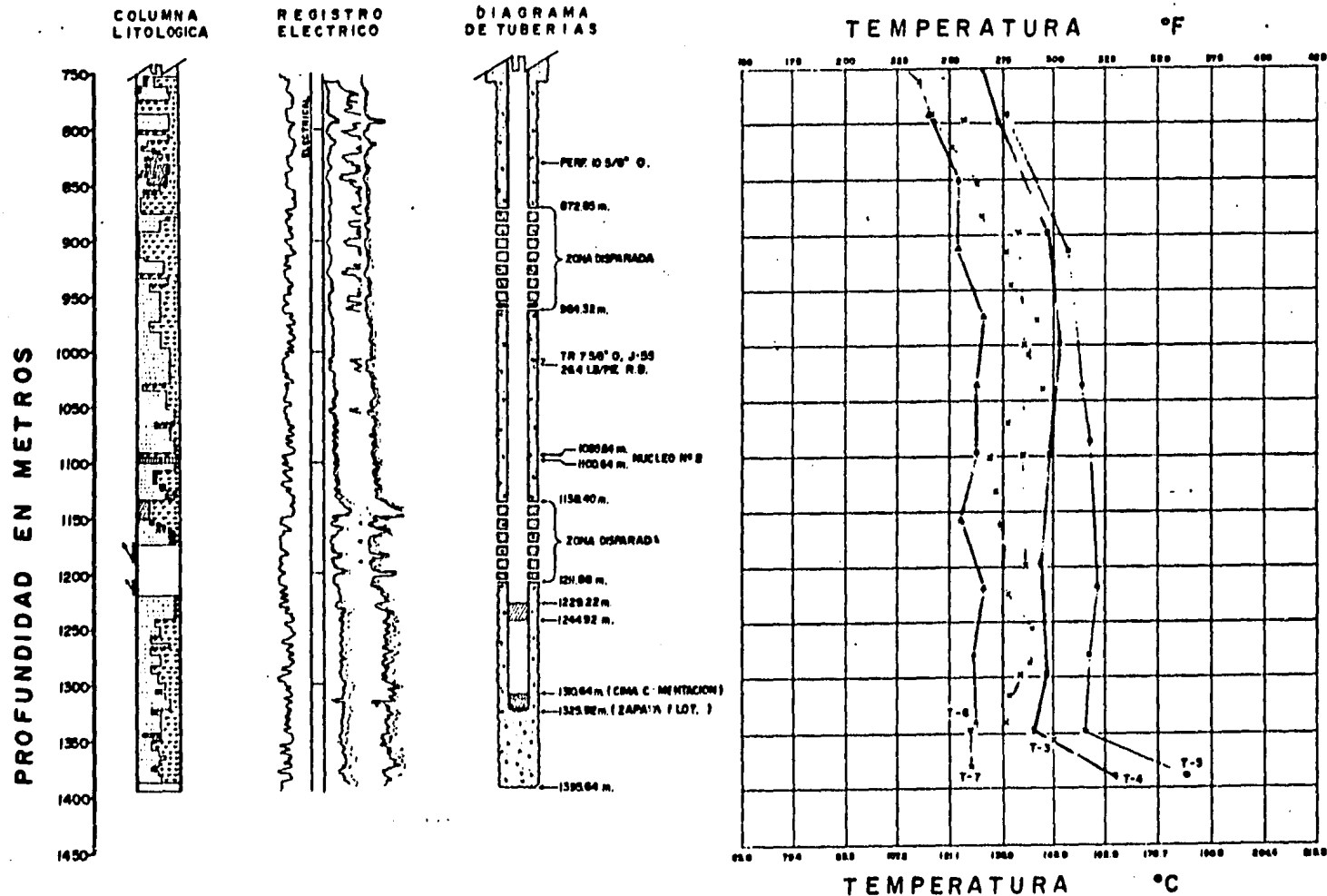


FIG.IV.I.I. CARACTERÍSTICAS DEL POZO M-5.

POZO M-II



CLAVE DEL CORTE LITOLÓGICO

- | | | | | | |
|--|---------|--|-------------------|--|--------------------------------------|
| | ARCILLA | | TRAMO SIN MUESTRA | | CENIZA VOLCÁNICA |
| | ARENA | | LUTITA | | CEMENTO |
| | LIMO | | ARENISCA | | ZONA DE PERMEABILIDAD DE CIRCULACIÓN |
| | NUCLEO | | | | |

REGISTROS DE TEMPERATURA

SÍMBOLO	TIEMPO DE PERFOR.	FECHA	OBSERVACIONES
T-3	8:00	02/IV/67	PERFORANDO
T-4	8:00	02/V/67	ESTÁTICO CON LADO DE PERFOR.
T-6	11:00	02/V/67	" " " " " "
T-6	4:44	02/V/67	" " " " " "
T-7	8:02	02/V/67	" " " " " "

FIG. IV.12. CARACTERÍSTICAS DEL POZO M-II,

terminación satisfactoria, corresponde al pozo M-35, ver figura IV.1.3., ya que en este caso los contrastes térmicos entre la serie de registros tomados fue determinante, sobre todo al coincidir esta información con la zona de pérdida de circulación durante la perforación, que en este caso fue muy severa, y que indudablemente dió una base sólida para la terminación de este pozo, del que se obtuvo una producción de 100 ton/hr de mezcla agua-vapor.

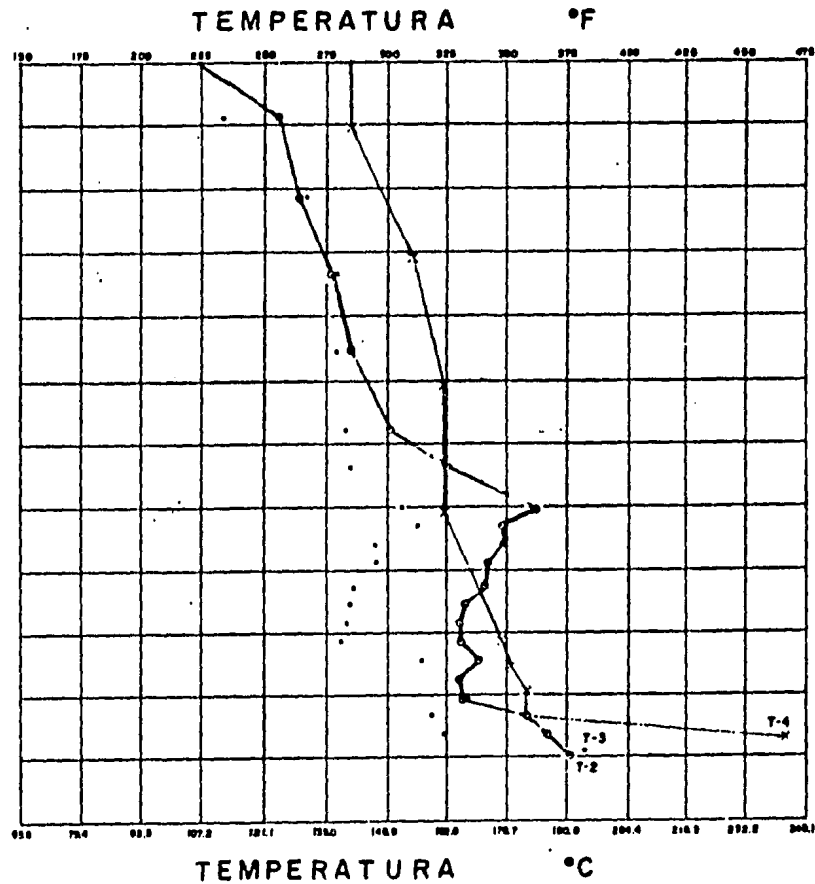
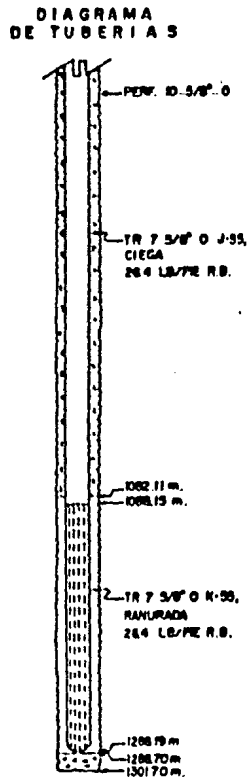
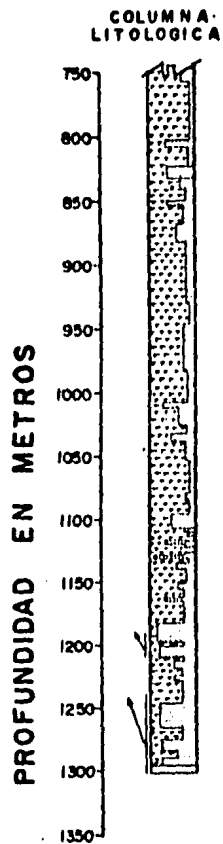
Por lo antes expuesto, y dado que los resultados para las terminaciones eficientes, no siempre fueron satisfactorias, se utiliza actualmente un sistema más refinado que los simples registros de temperatura eléctricos, para así poder concentrar las terminaciones en los estratos más permeables y calientes, basados en los siguientes parámetros de información:

1. Columna litológica.
2. Porcentaje acumulativo de areniscas porosas permeables de la zona caliente.
3. Análisis mineralógicos por rayos X para distinguir los minerales cuya génesis está íntimamente ligada a altas temperaturas.
4. Gráficas de temperatura de lodo de perforación a la entrada y salida del pozo.
5. Registros eléctricos que permiten confirmar los contrastes de zonas porosas permeables en la zona caliente. Cabe hacer notar que actualmente la terminación de algunos pozos, se decide sin registros eléctricos, debido a problemas de tipo económico.
6. Registros de temperatura. Por lo menos tres registros de temperatura de las primeras 24 horas después de terminada la perforación.

Un ejemplo de la confrontación de los parámetros físicos antes indicados se realizó en los pozos M-114 y M-130, ver figuras IV.1.4. y IV.1.5. respectivamente.

Con el sistema antes mencionado ha sido posible precisar con mayor rigor, los estratos más convenientes para su explotación, así se han reduci-

P O Z O M - 3 5



CLAVE DEL CORTE LITOLÓGICO

	ARCILLA		CEMENTO		PIEDRA
	ARENA		LIGNITA		ZONA DE PERDIDA DE CONSOLIDACION
	CENIZA VOLCÁNICA (TOMA)		CARBÓN O LIGNITO		TRAMO SIN MUESTRA
	ARENISA CUARCÍTICA				

REGISTROS DE TEMPERATURA

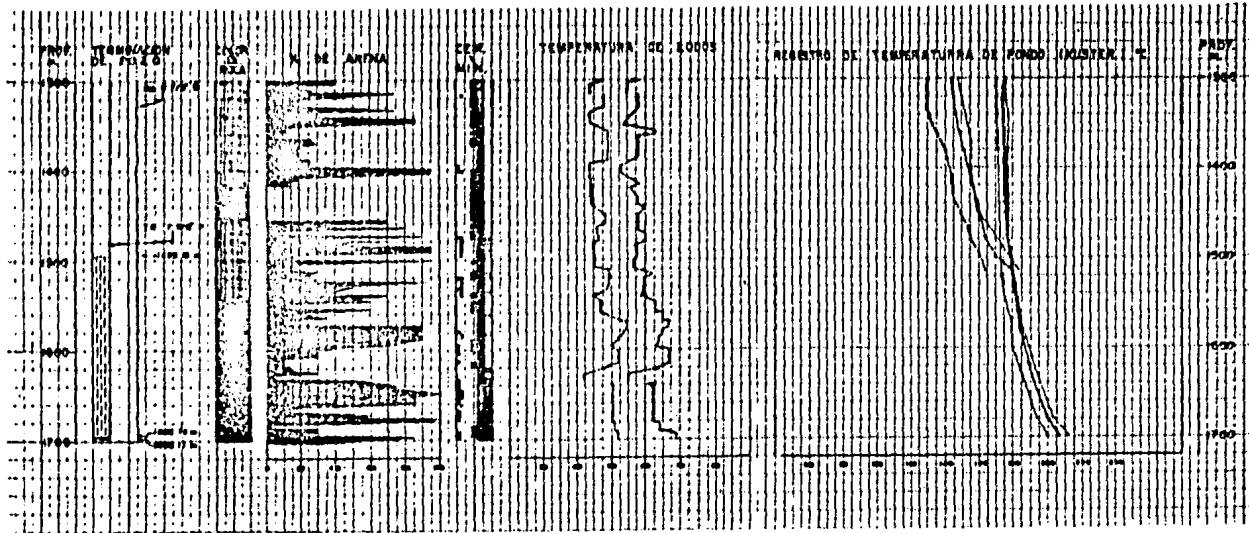
SÍMBOLOS	TIEMPO DE REPOSO	FECHA	OBSERVACIONES
T-1	6:30 hrs.	06/VII/76	ESTANDO CON LADO DE PERP
T-2	7:30 hrs	06/VII/76
T-4	4:00 hrs	17/VII/76

FIG.IV.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL POZO M-35.

POZO M-114

- LUTITAS**
- | | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| CAPE Y CAPE CLARO | PIRITA |
| CAPE A GRS | CUARZO LEONADO |
| GRS CLARO Y MEDIO | CEMENTANTE PIRITA |
| GRS MEDIO CON MINERALES COLOR VERDE | CEMENTANTE CaCO ₃ |
| GRS OSCURO | CEMENTANTE SILICE |
| GRS MEDIO Y GRS OSCURO | MINERALES DE COLOR VERDE |

- | | | |
|--|--------------------|-------------------|
| | 15 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V-1 |
| | 1.30 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V-2A |
| | 8 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V-3 |
| | 8 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V-5 |
| | 13 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V- |
| | 15 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V- |
| | 17 HRS 10 REPOSO | POZO ABIERTO V- |



REGISTRO ELECTRICO

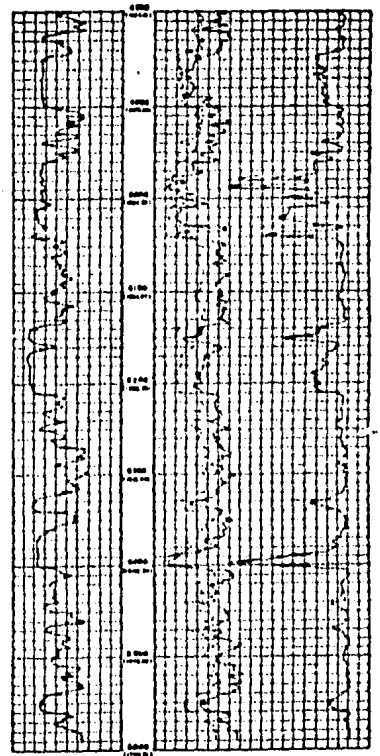


FIG. IV.1.4. REGISTROS DEL POZO M-114.

P O Z O M - 130

REGISTRO ELECTRICO

- LUTITAS**
- CAFE Y CAFE CLARO
 - CAFE A GRIS
 - GRIS CLARO Y MEDIO
 - GRIS MEDIO CON MINERALES COLOR VERDE
 - GRIS OSCURO
 - GRIS MEDIO Y GRIS OSCURO
 - PIRITA
 - CUARZO LICHADO
 - CEMENTO PIRITA
 - CEMENTANTE CoCo2
 - CEMENTANTE SILICE
 - MINERALES DE COLOR VERDE

- 7 HRS DE REPOSO ABIERTO 18 / V / 78
- 10 HRS DE REPOSO ABIERTO 10 / V / 78
- HRS DE REPOSO SIN FLUJO 13 / VI / 78
- 14 HRS DE REPOSO ABIERTO

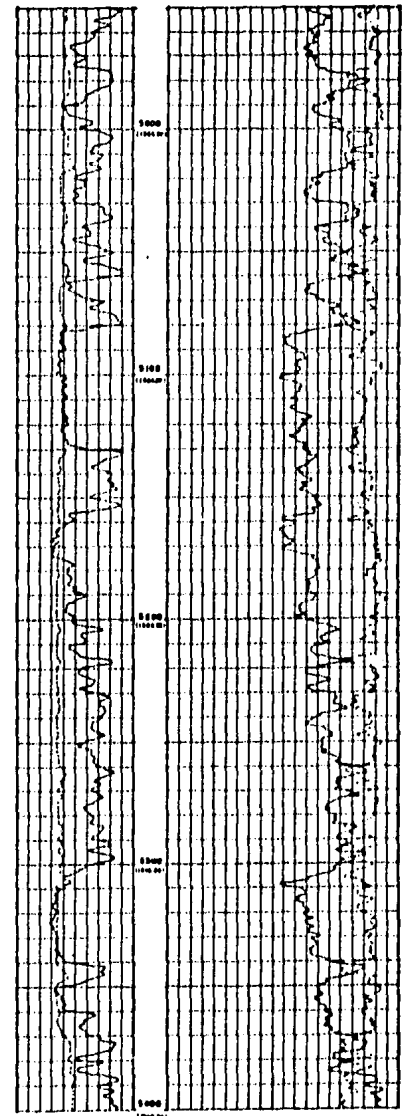
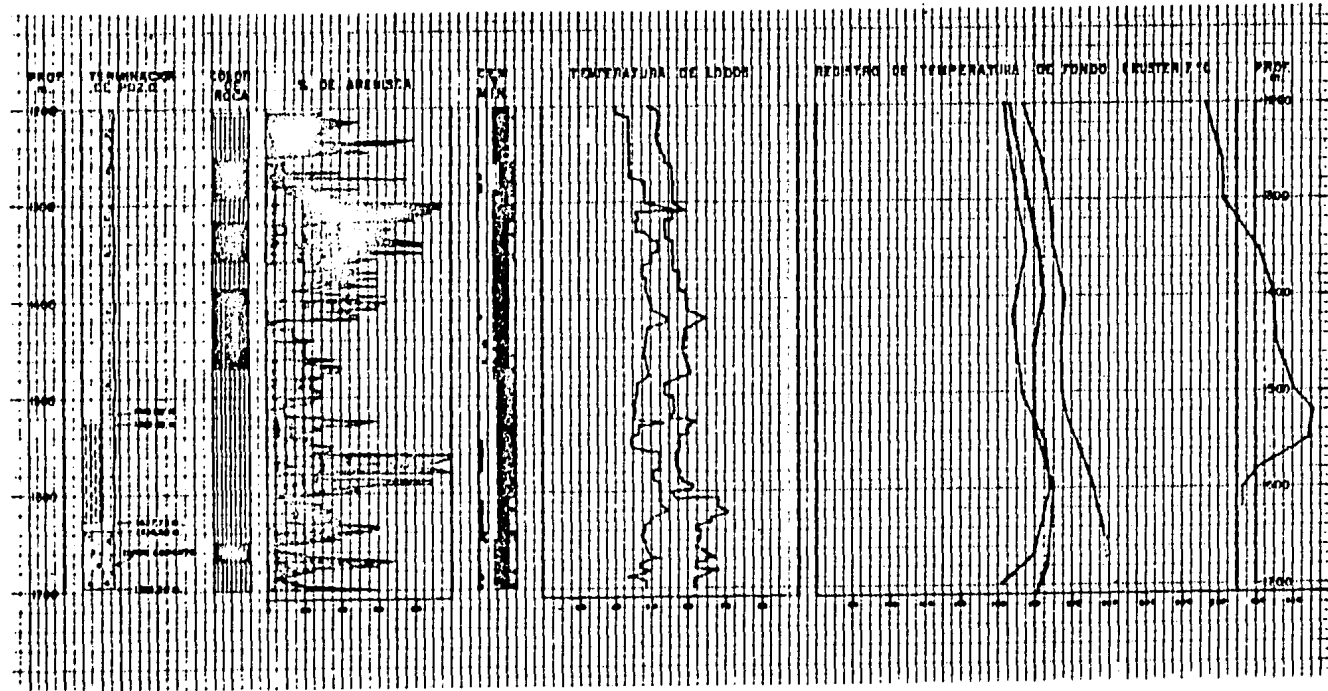


FIG. IV.1.5. REGISTROS DEL POZO M-130.

do las longitudes de tuberías ranuradas, y ha sido posible precisar en forma más eficaz las cementaciones que permitan sellar las conificaciones de agua proveniente de estratos superiores, menos calientes., indudablemente que uno de los aspectos más útiles en este sistema es la detección cuidadosa de los tipos de minerales asociados a las elevadas temperaturas, sin embargo, es importante subrayar que asimismo deben vigilarse aquellos minerales cuya génesis indica menor temperatura, ya que si en un caso dado se encuentran presentes junto con los de alta temperatura, implicaría tal vez invasiones posteriores a la formación de minerales correspondientes a altas temperaturas, que al explotarse reducirían significativamente la producción, en otras palabras, habrá que hacer un análisis discriminatorio apoyándose en el resto de los parámetros mencionados.

En conjunto, el resultado más significativo ha sido el incremento energético promedio que se ha tenido en pozos terminados con los sistemas actuales, reduciéndose además los volúmenes de agua extraída y asimismo las incrustaciones con sales tanto en los pozos como en las instalaciones superficiales, indudablemente que este sistema deberá optimizarse sobre todo lo que corresponde a herramientas, para obtener registros de temperatura que sufran menos fallas a altas temperaturas, impidiendo esto la obtención de registros térmicos continuos y con los contrastes térmicos más efectivos.

Una vez seleccionado el intervalo productor y decidida la longitud de tubería ranurada, se baja la tubería corta hasta la profundidad programada para cementar la sección de tubería ciega, como se vió anteriormente, e iniciar la etapa de lavado del pozo.

El lavado del pozo consiste en cambiar el fluido de perforación por agua, Se baja tubería de perforación franca hasta el fondo del pozo ya revestido en su totalidad y se inicia a bombear agua hasta que el fluido de perforación ha sido desalojado totalmente.

Al terminar de lavar el pozo, ya colocado arriba del cabeza 13 3/8" x 12"Ø (339.72mm x 304.8 mmØ) un carrete de expansión 12" x 10"Ø (304.8mm x

254.0 mm \emptyset) con el fin de dar espacio a la tubería de producción al momento de elongarse debido al calentamiento del pozo y una válvula maestra 10" \emptyset - (254mm \emptyset) arriba del carréte de expansión, se saca a la superficie la tubería de perforación y se cierra la válvula maestra, dando por terminada la perforación del pozo. Las figuras IV.1.6., IV.1.7. y IV.1.8. son ejemplos clásicos de terminaciones de pozos en Cerro Prieto.

IV.2. ETAPAS PARA INICIAR LA PRODUCCION.

Al inicio de la explotación del campo, el proceso que se siguió para la apertura de pozos fue un arranque casi inmediato después de la terminación.

De hecho puede decirse que se siguió en parte el sistema petrolero para arrancar pozos., sin embargo, como se detectaron fracturas y colapso en la tubería de revestimiento, se hizo un cuidadoso estudio, concluyendo que una de las causas más significativas de tales problemas, era el arranque súbito de los pozos.

Se considera que el sistema operacional en los pozos al iniciar la explotación, es decisivo para conservar en buen estado sus condiciones constructivas, se distinguen varios eventos los que actualmente se dividen en las siguientes etapas:

- A) Período de observación.
- B) Período de inducción.
- C) Período de calentamiento.
- D) Desarrollo y evaluación de la capacidad energética del pozo.

A) Período de Observación.

Inmediatamente después de lavar el pozo, se conectan a la válvula maestra manómetros y registradores de presión, para que en forma continua se reúna la información necesaria que permita juzgar la evolución del pozo

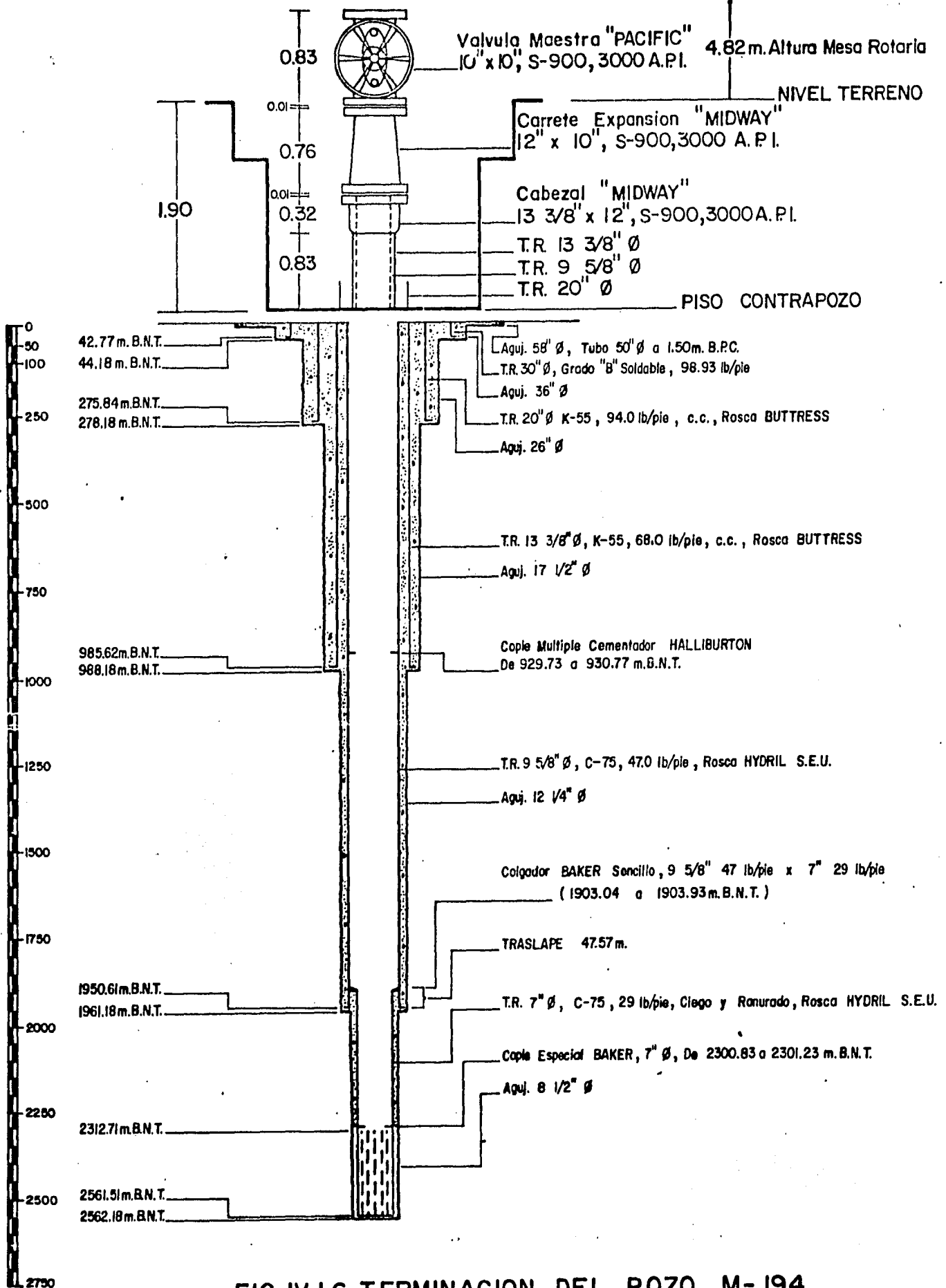


FIG. IV.1.6. TERMINACION DEL POZO M-194.

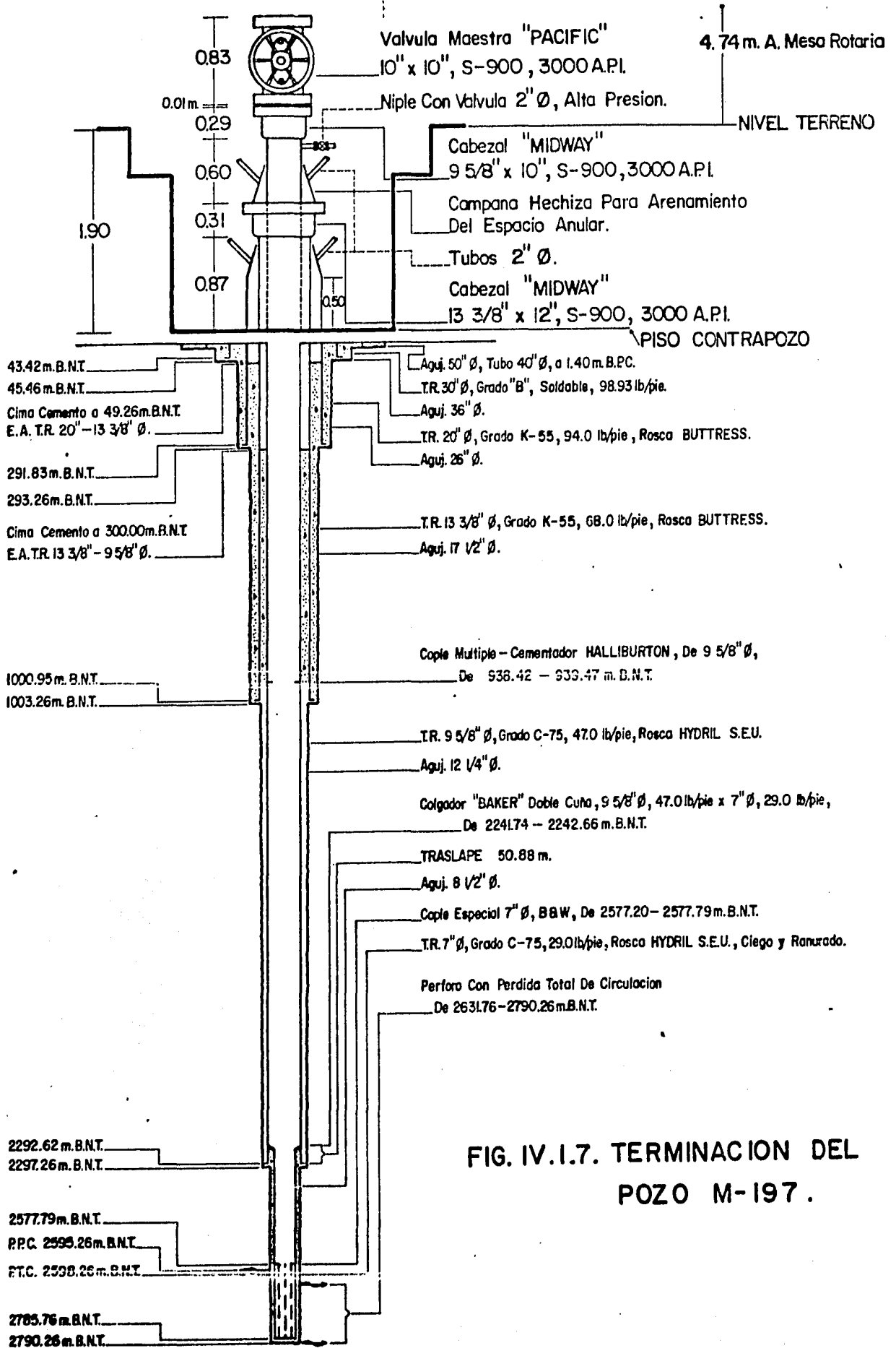


FIG. IV. I.7. TERMINACION DEL POZO M-197.

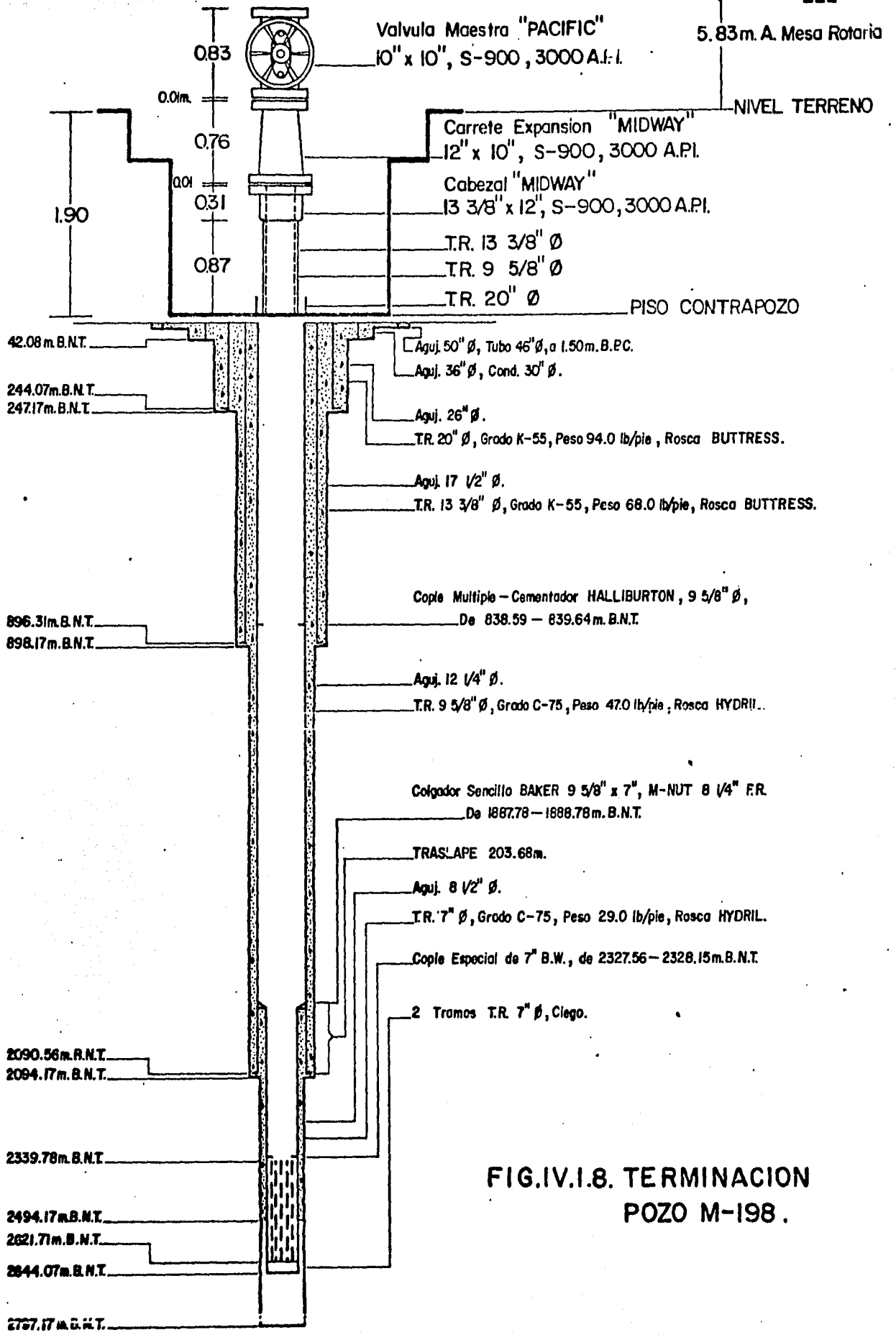


FIG.IV.I.8. TERMINACION POZO M-198.

B.P.C. = Bajo Fieco Contrapozo
B.N.T. = Bajo Nivel Terreno

simultánea a dicha instalación se colocan el indicador y la escala adecuada para medir el crecimiento de las tuberías de ademe, como resultado de la expansión longitudinal por efecto térmico.

Registros del subsuelo.

La serie de registros de temperatura se inicia con los primeros que se obtienen durante la perforación, los que en unión de la información litológica y registros eléctricos permiten la colocación de la tubería ranurada, y así buscar la más eficiente explotación.

Al terminar el lavado del pozo se inicia una serie de registros que tienen por objeto confirmar la adecuada colocación previamente efectuada de la tubería ranurada, y sobre todo el incremento de temperaturas, con respecto al tiempo, información que se considera muy importante, ya que de su análisis se definen los cuerpos de areniscas que aportan la mayor cantidad de energía térmica, y por lo tanto afina el conocimiento de la zona para las subsecuentes terminaciones.

Paralelos a dichos registros se inician los de calibración para vigilar los cambios del diámetro de la tubería de producción que permita detectar cualquier anomalía.

Nivel del espejo del agua.

En esta etapa se tiene especial cuidado en vigilar la posición que originalmente ocupó el nivel del espejo al terminar el lavado, y verificar en forma periódica si existe una elevación del mismo. En algunos casos ha subido rápidamente, en cinco días hasta la boca del pozo., en otros el espejo queda en los primeros 100m de profundidad, fenómeno ligado a la mayor o menor capacidad energética del yacimiento.

En el caso de los pozos cuyo nivel del agua llega a la superficie, se origina normalmente cierta presión que detecta en los registradores y manómetros instalados para tal objeto. Durante este período de observación se

instalan líneas de descarga, líneas de calentamiento, árboles de navidad, soportes de las líneas, silenciadores, vertedores y en general todos los accesorios complementarios, adecuados para la ejecución de las siguientes etapas de desarrollo y evaluación del pozo.

B) Período de inducción.

En aquellos pozos que no llega el nivel del espejo de agua a rebasar el nivel natural del terreno, dentro de un tiempo razonable (30 días) se requerirá de algún medio para estimular el flujo. En Cerro Prieto se han utilizado varios métodos de inducción dentro de los cuales se pueden señalar los siguientes:

1. Pistoneo.
2. Cubeteo.
3. Represión de vapor y su liberación.
4. Bombeo.
5. Inyección de aire, directa e inversa.

De los métodos de inducción anteriores, la inyección de aire, actualmente, es el más utilizado y tiene dos formas de aplicación, se emplea una tubería de 2"Ø (50.8mm) que se introduce al pozo 100m abajo del espejo de agua. El sistema se aplica hasta un nivel del espejo de 200m.

La inyección directa de aire utiliza un compresor de aire e instalaciones complementarias, se inyecta aire por medio de la tubería de 2"Ø (50.8mm) para burbujearlo en el agua, con el objeto de aerear el agua y aligerar la presión ejercida por la columna hidrostática en forma paulatina extraer la temperatura del agua extraída, para que con toda oportunidad se controle el calentamiento de la tubería productora. La operación se prolonga hasta el instante en que el agua empieza a fluir espontáneamente a partir de este momento se controla el volumen del flujo a criterio del operador.

La inyección inversa del aire utiliza el mismo equipo introduciendo -

aire en el espacio anular, entre la tubería de producción y la tubería de 2"Ø (50.8mm), desplazando la columna hidrostática por el interior de esta última, como en el caso anterior se controlan con todo cuidado los volúmenes extraídos y el incremento de temperatura, hasta el momento en que el pozo fluye y pasa su control por líneas de purga.

C) Período de calentamiento.

Encadenado al período de inducción, prosigue el período de calentamiento, que consiste en elevar la presión y la temperatura, tanto en el cabezal del pozo, como a lo largo del mismo, bajo absoluto control del operador. Este incremento se lleva hasta alcanzar la presión que se obtiene al descargar el fluido por un cono de 3"Ø (7.6 mm) de salida. El período de calentamiento se inicia con el flujo espontáneo de agua del pozo a través de una purga provista de una válvula de regulación, que permite limitar el gasto. Esta operación se ejecuta lentamente. La idea básica es dar oportunidad para que el calentamiento se prolongue a la tubería intermedia, a la superficial, a la conductora y si es posible calentar las formaciones que circundan al pozo. La duración de este período está limitada por la urgencia con que se quiera aprovechar el vapor y a factores económicos. Sin embargo de la práctica y observaciones realizadas, se ha precisado un período de calentamiento no menor de 20 días.

Instalaciones mecánicas.

Es conveniente instalar en el árbol de válvulas, (ver figura IV.2.1.) una línea de descarga de 2"Ø (50.8mm) con una longitud adecuada para que su extremo quede a la orilla de la plataforma en la que está construido el pozo. En el extremo de esta tubería se colocan cuatro ramas, una de 1/2"Ø (12.5mm), otra de 1"Ø (25.4 mm), y una tercera de 2"Ø (50.8mm), todas provistas de una válvula de control, y finalmente una cuarta línea que se conecta a un muestreador de arena, como se indica en la figura IV.2.2.

Operación del sistema.

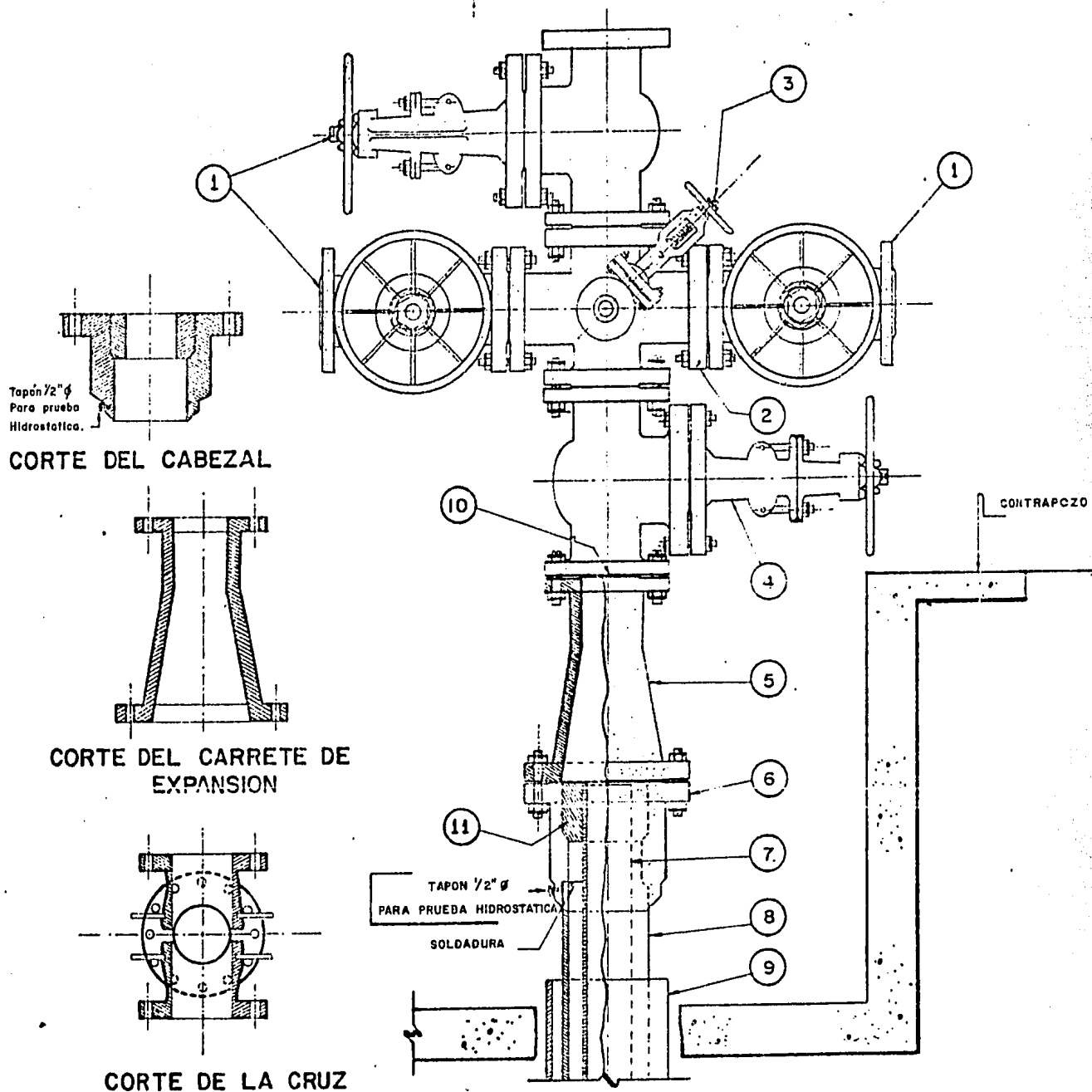


FIG.IV.2.1. ARBOL DE VALVULAS USADO ACTUALMENTE EN
 LOS POZOS GEOTERMICOS DE CERRO PRIETO,
 LAS ESPECIFICACIONES SE ENLISTAN EN LA TABLA IV.2.1.

- 1.-VALVULAS DE OPERACION 10" Ø S-900 (3000 API).
- 2.-CRUZ DE 10"X10"X10"X10"Ø S-900(3000API) X2"X2"Ø S-1500(5000API).
- 3.-VALVULA DE 2"Ø S-1500(5000 API).
- 4.-VALVULA MAESTRA 10" Ø S-900 (3 000 API).
- 5.-CARRETE DE EXPANSION 12"X10"Ø S-900(3000 API).
- 6.-CABEZAL 13 3/8"X 12"Ø S-900 (3000 API).
- 7.-T.R. 9 5/8"Ø 47 LB/PIE C-75 ROSCA HYDRIL S.E.U.
- 8.-T.R. 13 3/8"Ø 68 LB/PE K-55 ROSCA BUTRESS.
- 9.-T.R.20"Ø 106.5 LB/PIE K-55 ROSCA BUTTRESS.
- 10.- JUNTA ANULAR .
- 11.-ANILLO GUIA DE LA TUBERIA DE PRODUCCION.

TABLA IV.2.1.

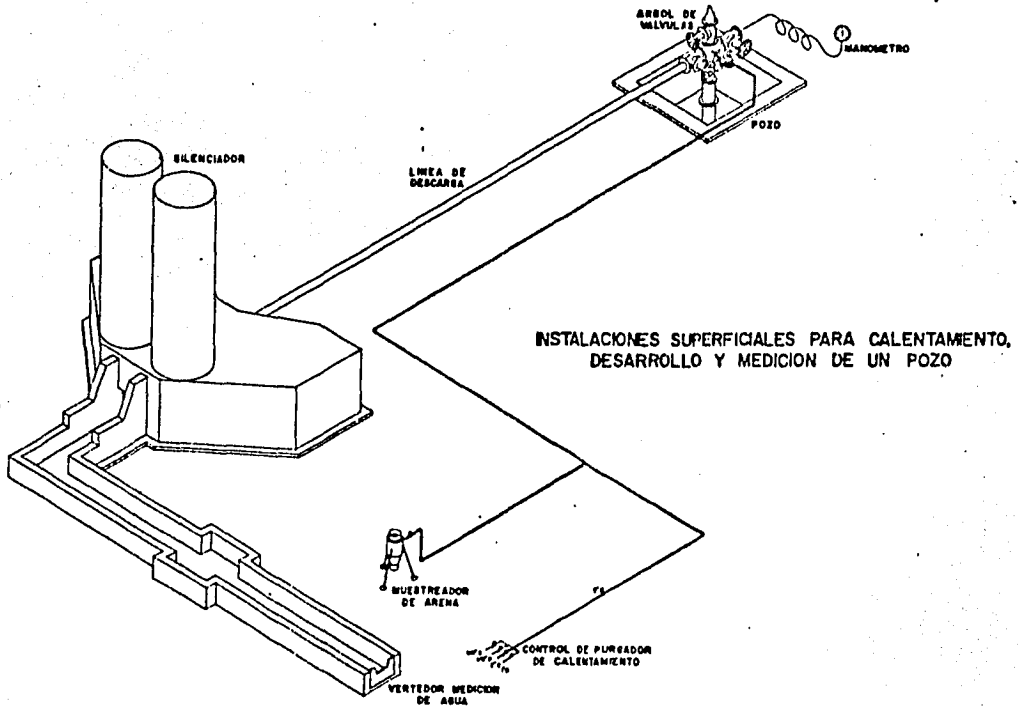


FIG.IV.2.2. INSTALACIONES SUPERFICIALES PARA CALENTAMIENTO, DESARROLLO Y MEDICION DE UN POZO GEOTERMICO EN CERRO PRIETO.

Inicialmente se deriva y descarga el flujo por la línea de 1/2"Ø (12.5mm) ya que es fácil controlar volúmenes pequeños. Esta es la etapa crítica para controlar el calentamiento adecuado del sistema. El método seguido para determinar el volumen del flujo de agua al iniciarse el calentamiento, se basa en experiencias y observaciones realizadas en los pozos de Cerro Prieto, que han determinado un gasto tal, que permita el desplazamiento por lo menos en dos días, del volumen total del agua contenida en toda la columna del pozo. Habiéndose cumplido lo anterior se incrementa la descarga hasta obtener un aumento de la presión en la cabeza del pozo, de 2kg/cm²/día hasta abrir totalmente la válvula de 1/2"Ø (12.5mm)., proseguirá la apertura aproximadamente con el mismo incremento de presión hasta abrir totalmente la válvula de 1"Ø (25.4mm) y finalmente la de 2"Ø (50.8mm).

El límite final de presión dependerá del comportamiento de cada pozo y de las distintas observaciones en la superficie y en el subsuelo. Los factores que hacen variar las condiciones anteriores son:

- A) La terminación del pozo.
- B) La temperatura y presión del yacimiento.
- C) La dilatación de las tuberías.
- D) La composición química del agua producida.

Con la información anterior se norma el criterio de apertura final del pozo. Se analizan muestras de agua descargada; con el auxilio del muestreador de arena deberá vigilarse el porcentaje, clase y tipo de arena arrojada en esta etapa.

D) Período de desarrollo.

EN esta etapa el pozo se descarga por un diámetro restringido, el que se incrementa hasta llegar al diámetro total de producción. El objetivo es que el pozo arroje todos los materiales y substancias que se emplearon en la perforación, recortes asentados en el fondo, la arena del yacimiento evitando así que al conectarlo al separador y sistema colector de vapor, pudiera dañar las instalaciones superficiales y turbinas de la Planta.

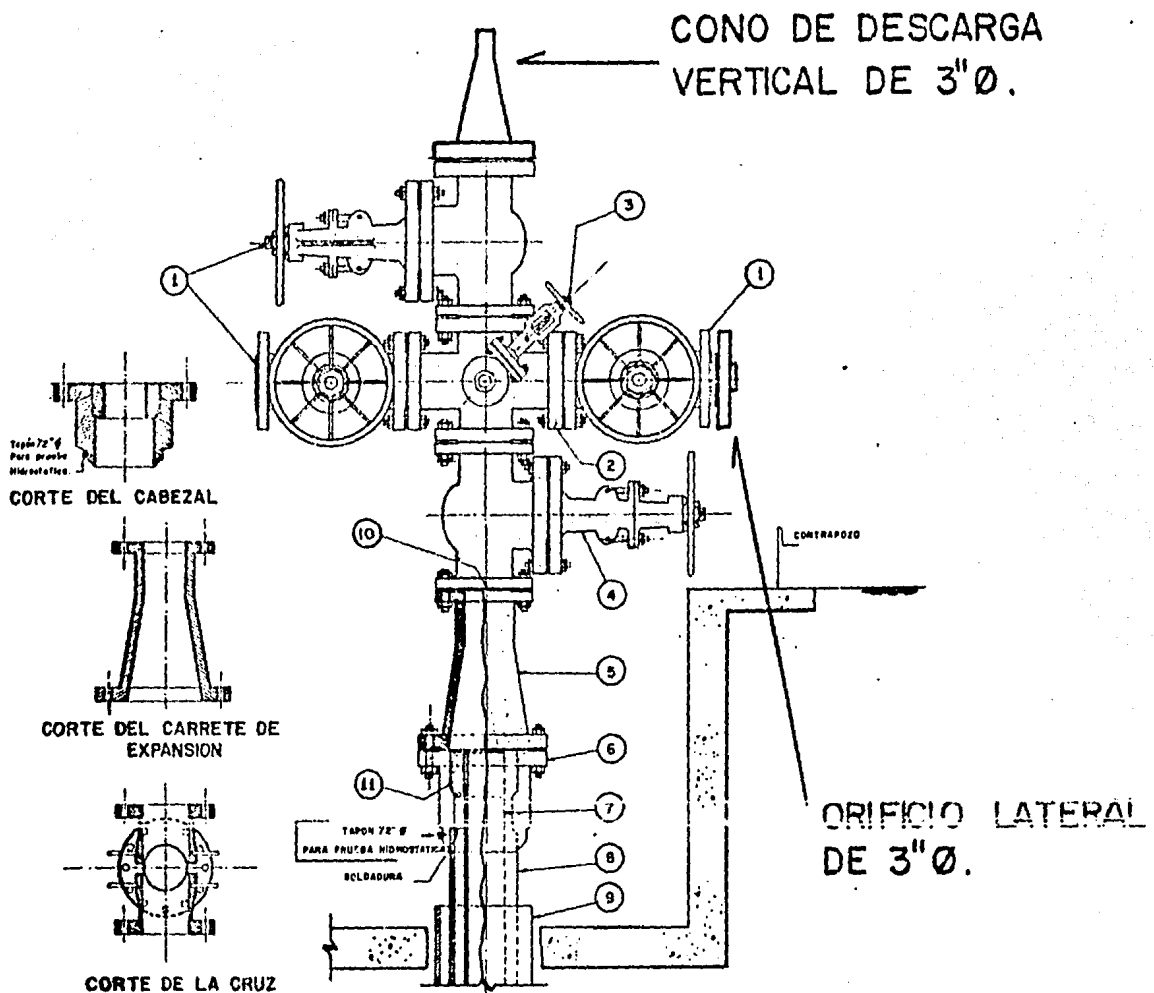


FIG.IV.2.3. ARBOL DE VALVULAS CON CONO INSTALADO SOBRE LA VALVULA DE OPERACION Y ORIFICIO EN UNA SALIDA LATERAL .

Instalaciones mecánicas.

En una de las descargas laterales de 6"Ø (152.4mm) del árbol de navidad, provistas de bridas adecuadas, se instalan orificios de diámetros variables. Sobre la válvula de operación se instalan en forma oportuna una serie de conos también con diámetros variables y equivalentes a los orificios 3"Ø (76.2mm), 4"Ø (101.6mm), 5"Ø (127mm), 6"Ø (152.4mm) y 7"Ø (177.8mm). Normalmente se inicia el desarrollo instalando un cono sobre la válvula de operación y un orificio de 3"Ø (76.2mm) en la descarga lateral, - ver figura IV.2.3.

Inicio del desarrollo.

Cuando el pozo está caliente y fluyendo por la válvula de 2"Ø (50.8 mm), se abre la válvula de operación y así el pozo descarga verticalmente a la atmósfera, por el cono de 3"Ø (76.2mm). En este momento se inicia el muestreo de arena y la recolección, dentro de lo posible, de partículas sólidas que arroje el pozo. Es común obtener pequeños fragmentos de areniscas, lutitas, restos de cemento, etc.

El agua arrojada comunmente es de color obscuro debido a los residuos de lignitos contenidos en el lodo de perforación, que muy seguramente invadió el yacimiento. La presión tiende a elevarse de 50 lb/pg² (3.52 kg/cm²) a 120 lb/pg² (8.44 kg/cm²), sobre la presión a la que se llegó con la línea de descarga de 2"Ø (50.8mm) y ésto en los primeros minutos., enseguida la presión tiende a bajar y estabilizarse de acuerdo a la capacidad del pozo. El porcentaje de arena llega a 0.0003% permaneciendo así 3 horas como mínimo para observar cualquier incremento en el mismo, antes de hacer - - otro cambio en el diámetro de la descarga.

Habiéndose confirmado la estabilización del porcentaje de arena, se hace en forma simultánea y con sumo cuidado el cambio del flujo vertical a la línea lateral, cerrando lentamente la válvula superior en la que está apoyado el cono y con el mismo cuidado se abre la válvula lateral, en la que está conectada la línea de descarga. La forma de vigilar la operación

es por medio del manómetro que se observa constantemente, para evitar variaciones en la presión de descarga, ya que de presentarse éstas, se rompe la estabilización lograda y es posible que el pozo inicie desalojar más arena.

Cerrada la descarga vertical, se cambia el cono instalado por uno de 4"Ø (101.6mm), hecha esta operación se invierte el procedimiento para descargar el pozo en forma vertical nuevamente. Se hace el cambio de orificio de 3"Ø (76.2mm) por uno de 4"Ø (101.6mm) en la línea de descarga lateral.

El tiempo que permanece la descarga vertical por el cono de 4"Ø (101.6mm) es 20 horas aproximadamente. En forma sucesiva se opera para los cambios posteriores de conos y orificios, hasta llegar al máximo diámetro de descarga que comunmente es de 7"Ø (177.8mm).

Medición de flujo.

Durante el desarrollo de un pozo se llevan a cabo valoraciones de los flujos de descarga. Se instala una toma de presión en el labio de una línea de descarga lateral, conectada a un silenciador, para aplicar el método de Russell James para medir el vapor, ver figura IV.2.2. En la salida de agua del silenciador, se construye un vertedor que permite aforar el gasto que arroja el pozo., dicha operación se realiza en los cambios de los orificios ya antes mencionados.

Habiendo terminado el desarrollo se toma una serie de registros de presión y temperatura, variando los flujos de descarga, efectuando al final un registro de calibración en la tubería de producción. De esta forma se hace la evaluación inicial de cada pozo, la que se confrontará oportunamente al operar el separador definitivo.

CAPITULO V. CONCLUSIONES.

En la perforación de pozos geotérmicos actualmente se tiene una gran variedad de problemas sin solución y varios de ellos son por falta de tecnología orientada a la geotermia, así como la falta de equipo de perforación adecuado a las necesidades geotérmicas. Se han aplicado soluciones prácticas a varios problemas durante la perforación, pero siempre usando equipo y tecnología para pozos petroleros, sin embargo necesariamente deben mejorarse esas soluciones y buscarse algunas otras que a la fecha no se han logrado.

El programa de lodos que actualmente se sigue puede mejorarse y reducir costos, optimizando la capacidad de refrigeración de la torre de enfriamiento, y reducir así el consumo de ciertos reactivos químicos para alta temperatura, los cuales representan un 37.5% del costo total de los materiales usados en la preparación y mantenimiento del lodo de perforación.

El programa de tuberías usado actualmente, es el que mejor resultado ha dado en la explotación del campo, por lo que es recomendable continuar usando las roscas de 2 pasos Hydrill S.E.U. en la zona caliente.

No se han detectado daños importantes en la sarta de perforación, fuera de los normales en este tipo de trabajo. En cuanto a pescas cuando se presentan en la zona caliente es uno de los problemas más difíciles de controlar debido a que no se cuenta con el equipo necesario para altas temperaturas. Es necesario diseñar nuevas herramientas para trabajar a las condiciones de los yacimientos geotérmicos.

Las cementaciones, sobre todo al efectuarse cerca, o en el yacimiento, no siempre son controlables debido a la alta permeabilidad de la formación productora. Por lo que se recomienda usar cementos ligeros para disminuir la incidencia de las pérdidas de circulación durante la cementación, éste problema se ha contemplado en todos los campos geotérmicos

existentes y hasta la fecha no existe una composición de cemento que demuestre ser satisfactoria ante los fluidos geotérmicos altamente degradantes, por lo que es de primordial importancia continuar buscando cementos apropiados para la industria geotérmica.

Los registros eléctricos en Cerro Prieto desafortunadamente se han dejado de tomar por circunstancias, que desde ningún punto de vista, justifican su abandono, ya que decidir la terminación de un pozo geotérmico sin la información de los registros eléctricos es prácticamente hacerlo a ciegas, independientemente de la información de pozos vecinos que se tenga.

Debido al origen sedimentario de los estratos productores en Cerro Prieto, los registros eléctricos nos proporcionan información de zonas --porosas y permeables que los registros de temperatura no pueden dar. Cabe aclarar que en otros campos geotérmicos puede no ser determinante la información de registros eléctricos para decidir la terminación de un pozo.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

1. Actas del primer simposio del campo geotérmico "Cerro Prieto", realizado por el "Departamento de Energía" de los E.U.A. división "Geotermia" y la "Comisión Federal de Electricidad", en San Diego California del 20 al 22 de Septiembre de 1978.
2. Actas del cuarto simposio del campo geotérmico "Cerro Prieto", realizado por el "Departamento de Energía" de los E.U.A. división "Geotermia" y la "Comisión Federal de Electricidad" en Guadalajara, Jalisco del 10 al 12 de Agosto de 1982.
3. R. Longwell Chester, F. Flint Ricard, "Geología Física", Editorial Limusa, primera edición.
4. Mc. Cray Arthur W., Cole Franklin., "Tecnología de la Perforación de Pozos Petroleros", Editorial C.E.C.S.A. cuarta edición.
5. Apuntes de Perforación, editados por la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.
6. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas Nov. 1978 Vol. 2 Núm. 11.
7. Tesis Profesional del Ing. J.M.E., Vaca S., "Pruebas de Intercepción de Presión en Pozos Geotérmicos" Facultad de Ingeniería U.N.A.M.
8. Halliburton "Geothermal Cementing".
9. Halliburton "Cementing Tables".
10. Halliburton "Technical DATA"
11. Milchem, "Drillings Fluids Reference Manual".
12. Milchem, "Mudfacts Engineering Handbook".