

551.49
M 385P
1956
F. Ing. Civ.
Cp. 1

069890

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

**PERFORACIONES PARA
VAPORES TERMALES**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR

NESTOR SALVADOR MARTINEZ

PREVIA LA OPCION DEL TITULO
DE DOCTOR EN INGENIERIA CIVIL

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, C. A.
1956



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

Rector:

Dr. Romeo Fortín Magaña

Secretario:

Dr. José Enrique Córdova



FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Decano:

Ing. J. Alfonso Valdivieso

Secretario:

Ing. Oscar Baños Pacheco



TRIBUNALES QUE PRACTICARON LOS EXAMENES
DEL DOCTORAMIENTO

Primer Examen General Privado

Ing. Víctor Manuel Valdés

Ing. Carlos Ghiringhello

Ing. Antonio Rivera Palomo

Segundo Examen General Privado

Ing. Alirio Cornejo

Ing. Leopoldo Notarbartolo

Ing. José Fonseca F.

Aprobaron la Tesis

Dr. Helmut Meyer-Abich

Dr. Víctor Ortiz

Dr. Mario Lewy Van Severen

DEDICATORIA

Esta Tesis la dedico con todo cariño

a mis queridos padres:

Salvador Martínez

María Teresa de Martínez

a mis hermanos:

Rosabella, Oswaldo y María Teresa

a mis profesores

a mis amigos.

PREFACIO

La presencia de diversas manifestaciones hidrotermales en El Salvador, ha sugerido la idea de su utilización con fines industriales, como se hace desde algún tiempo en otros países del mundo.

En el año de 1953, por cuenta del actual Gobierno, estuvo en el país el Prof. Ing. Francesco Penta, Director del Instituto de Geología de la Universidad de Roma, y quien por varios años ha dirigido las investigaciones que tenían por objeto la utilización de los vapores termales en varias regiones italianas, siendo en el mundo una de las personas que mejor conocen la materia. En su informe sugirió la conveniencia de iniciar una investigación similar en El Salvador.

En Septiembre de 1954 fui enviado a Italia para realizar estudios sobre la materia. De los estudios realizados por mí durante mi permanencia en ese país, y de mis anotaciones y observaciones, he preparado esta Tesis. Con ello no pretendo haber realizado un trabajo de valor científico, sino solamente el dar a mis colegas una idea de la técnica y equipo a usar en caso de que en nuestro país se inicie una investigación similar.

Aprovecho la oportunidad para expresar mi agradecimiento al actual Gobierno por la distinción de que me

hizo objeto al comisionarme para llevar a cabo este estudio. De la misma manera, doy las gracias a quienes en Italia me ayudaron de una u otra manera, con sus conocimientos o con su amistad, y en particular al Prof. Ing. Francesco Penta y demás personal del Instituto de Geologia de la Univ. de Roma; a la Sociedad "Larderello", a la Sociedad S.A.F.E..N. y a la Sociedad TERNI, S.A..

Néstor S. Martínez.

San Salvador, Mayo de 1956.

INDICE

CAP. 1	GENERALIDADES	pag. 1
CAP. 2	ORIGEN DE LOS VAPORES TERMALES	9
CAP. 3	LA SONDA ROTARY	22
CAP. 4	EL FANGO DE CIRCULACION	54
CAP. 5	INSTRUMENTOS REGISTRADORES	76
CAP. 6	TECNICA DE LA PERFORACION	80
CAP. 7	PUNTOS VARIOS	103
	CONCLUSION	116
	BIBLIOGRAFIA	120

CAPITULO PRIMERO.- GENERALIDADES.

I

Los fenómenos hidrotermales están en general relacionados con los fenómenos magmáticos. Debido al poco conocimiento de éstos últimos aún no se ha hallado una explicación concluyente de los primeros. Por lo tanto todo estudio que trate de explicar fundamentalmente los fenómenos hidrotermales, debe tener como base el conocimiento de los magmas, y de manera general, del fenómeno del volcanismo.

Para explicar el origen de los magmas existen diversas teorías que no enumero por no ser objeto de esta tesis.

Los magmas en fusión pueden salir a la superficie a través de las líneas de menor resistencia, causando las erupciones volcánicas; o pueden infiltrarse entre los estratos del terreno sin salir al exterior, dando origen a las intrusiones llamadas lacolitos y batolitos.

II

SCROFF, clasificando los diversos tipos de actividad volcánica, la divide en actividad permanente, moderada y esporádica. LACROIX los ha clasificado según la

semejanza con algunos volcanes muy conocidos, en hawai-
ana, stromboliana, vulcánica y pelcana. Finalmente,
tenemos la clasificación hecha por RITTMANN, muy ade-
cuada al estudio de los fenómenos endógenos:

1º. Actividad persistente exhalativa: emisión conti-
nua de vapor; actividad de geyser, aguas termales con
formación de incrustaciones.

2º. Actividad persistente central: emisión conti-
nua de vapor; lanzamiento de escorias con crecimiento
lento del cono volcánico; chorros intermitentes de la-
va que cae todavía líquida y entonces se consolida;
formación de un lago de lava en el cráter con corrien-
tes convectivas y sin ninguna consecuencia exterior.
Ejemplo el Paracutin en México.

3º. Actividad lenta cruptiva; formación de nuevas a-
pertura en el cráter, de las cuales sale, por meses
o años, lava incandescente; rotura de las paredes del
conducto, con formación de grietas laterales, de las
cuales, por meses o años, sale la lava; erupción de la-
vas viscosas precedidas de una nube ardiente; formación
de cúpulas de estancamiento, en cuyas faldas se acumu-
lan depósitos caóticos de bloques y escorias; formación
de protuberancias o espinas de lava sólida en el crá-
ter. Ejemplo, en la Martinica, el Monte Pelado.

4º. Erupciones improvisadas a conducto abierto; el
conducto se vacía con actividad explosiva, con lanza-
miento de lava y cenizas hasta llegar a un estado de a-
gotamiento; erupciones laterales con formación de una

o más grietas sobre las pendientes del volcán, de las cuales sale la lava; erupciones excéntricas al pie del monte con lanzamiento de lava, piedras y escorias, y luego rápida salida de la lava.

5º. Erupciones iniciales: erupción de cenizas y escorias, lanzamiento del tapón del conducto; erupción "pliniana" (el Vesuvio, en su erupción del año 79, y descrita por Plinio el Viejo) con fortísimos lanzamientos de pómez, escorias oscuras, cenizas y brechas y a veces corrientes de lava; erupciones de bloques de lava ya endurecidos o todavía plásticos, bombas volcánicas con superficie de corteza de pan.

6º. Perforaciones iniciales: erupciones gigantescas de pómez y cenizas; formación de depresiones volcánico-tectónicas; perforaciones con lanzamiento de cenizas y escorias; perforaciones mixtas con lava muy fluida; formación de embudos de explosión con paredes formadas con detritos; perforaciones de gas.

7º. Erupciones lineales explosivas, mixtas o efusivas con apertura de fracturas, corrientes lávicas y formación de pequeños conos de cenizas.

Todos los tipos mencionados son característicos de determinadas zonas volcánicas. No obstante conviene tener en cuenta que una misma zona puede hacer erupciones de diversos tipos, según las variaciones de composición del magma, de la degasificación sufrida en erupciones anteriores y de su temperatura.

Propiedades del magma. El estudio de las propiedades del magma ha proporcionado a la volcanología conocimientos de gran importancia. Mediante largos experimentos, investigadores americanos han determinado las leyes que rigen la fusión y solidificación de los magmas.

Consideremos primero una masa fundida de un solo mineral que comienza a enfriarse. Tenemos por ejemplo el cuarzo. A una temperatura mayor de 1270° C. el cuarzo permanece en estado de fusión.

Al bajar la temperatura a 1270° C. se forman cristales que crecen a medida que la masa se enfría, hasta alcanzar un estado sólido cristalino. Durante este proceso la temperatura permanece constante y el mineral cede el calor de fusión al externo; el proceso de fusión es un proceso exotérmico. Una vez solidificado, la cesión de calor al externo tiene por resultado un enfriamiento de la masa sólida.

Si se verifica el proceso inverso, al comunicar calor a la masa de cuarzo sólido, la temperatura de éste comienza a subir hasta llegar a 1270° C. o sea la temperatura de fusión. Si se continúa suministrando calor la masa comienza a fundirse permaneciendo constante la temperatura hasta obtener la completa disolución de los cristales; a partir de este momento, el cuarzo líquido aumentará de temperatura en proporción a la cantidad de calor absorbido. El proceso de fusión es un proceso endotérmico.

V

El proceso antes descrito constituye el caso más simple, pues la temperatura de fusión y solidificación es constante. Estudiemos ahora el caso de una mezcla homogénea al estado de fusión, de dos minerales: 80% diópside $/\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2/$ y 20% anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Esta mezcla solidifica como un eutéctico típico.

La diópside funde a 1391°C . y la anortita a 1550°C . No obstante, al verificarse la cristalización la temperatura baja hasta 1350°C . sin que se inicie el proceso. A esta temperatura comienzan a formarse cristales de diópside, y este proceso se continúa hasta los 1270° en que después de haberse segregado un 27.6% de la diópside, se llega a tener una mezcla del 58% de diópside y 42% anortita; en este momento toda la masa cristaliza bajo la forma de un eutéctico.

Con el variar de la composición de la mezcla varía la temperatura inicial de solidificación y la cantidad de diópside o anortita segregada, pero la temperatura final en el momento de la cristalización del eutéctico (1270°C . en nuestro caso) permanece invariable, lo mismo que la proporción 58% diópside- 42% anortita.
(Ejemplos de Principi)

VI

El proceso de cristalización de la mezcla de dos minerales es en todo similar al de una mezcla de una cantidad mayor de minerales, como en el caso de los magmas eruptivos. No obstante, en este caso el proceso

no puede ser estudiado en la práctica, ya que los gases presentes complican las reacciones químicas; por otra parte, los gases, debiendo permanecer siempre en la parte en fusión, aumentan la presión al avanzar el proceso de cristalización. Muchas veces los cristales ya formados son redisueltos y dan origen a nuevos cristales. De esta manera, si la temperatura y la presión varían por circunstancias locales, los productos eruptivos de un mismo magma pueden ser diversos.

VII

Uno de los elementos de particular interés en el fenómeno de cristalización del magma es el proceso de segregación de cristales, llamado diferenciación magnética.

Dada la profundidad del foco magnético y la lentitud del proceso de enfriamiento, los cristales formados en la parte superior o inferior de la columna en fusión descienden o ascienden por gravedad, dando origen a nuevos cambios en la composición del magma. Los elementos silícicos (silicato de alúmina) ascienden debido a su menor peso, mientras que los elementos férricos (silicatos de hierro y magnesio) descienden en el magma.

Así en el Vesuvio, del magma que se halla en el conducto se segrega la leucita, cuyos cristales, siendo más ligeros que el resto del magma, ascienden hasta obstruir la boca del cráter. En la siguiente erupción explosiva, la leucita se presenta en forma de inclu-

siones, formando la roca llamada itálica.

VIII

En el proceso de cristalización del magma tienen una influencia decisiva los gases en disolución. En primer lugar, causan las enormes presiones en el magma; ejercen una actividad química y catalizadora, y determinan la enorme violencia de las erupciones volcánicas.

Los principales minerales constituyentes del magma (ortoclasa, olivina, etc.) no admiten sustancias gaseosas en su composición, por lo cual, al avanzar el proceso de cristalización los gases permanecen disueltos en el residuo todavía fundido. Al avanzar el proceso, la tensión del gas aumenta, alcanzando un valor máximo a la temperatura de 600-700° C. En seguida, a través de una complicada serie de fenómenos y reacciones, la presión comienza a disminuir, hasta llegar a 372° C., o sea la temperatura crítica del agua. Aquí el vapor de agua, que constituye la mayor parte del fluido magmático, se condensa, dando origen a una solución acuosa que, a causa de su elevada temperatura contiene muchas sustancias en disolución. Cuando esta solución comienza a enfriarse, precipitan la mayor parte de los componentes sólidos que este magma final todavía contiene, quedando como resultado final del proceso un agua juvenil.

En el proceso de enfriamiento del magma, por lo tanto, se pueden distinguir cinco fases con diversas ca-

racterísticas (RITTMANN) :

- a) La fase del magma sobrecalentado, que se comporta como un líquido normal, en el cual la tensión del vapor es proporcional a la temperatura.
- b) La fase ortomagnética o fase de formación de las rocas ígneas comunes, en el cual al bajar la temperatura aumenta la tensión del vapor.
- c) La fase pegmatítica en la cual se solidifican grandes cristales de diversos minerales o de un solo mineral; la tensión del vapor alcanza un valor máximo.
- d) La fase pneumatolítica, en la cual la tensión del vapor decrece nuevamente al bajar la temperatura.
- e) La fase hidrotermal.

No podemos precisar un límite exacto de temperaturas para una u otra fase, ya que la composición química y el contenido de gas en el magma hacen variar la temperatura de solidificación. Un magma pobre de gas comienza su consolidación a unos 1200° C. y mostrará poca actividad pneumatolítica e hidrotermal; en cambio un magma rico de gas puede bajar su punto de fusión a 600- 700° C. y dar origen a grandes fenómenos de lanzamiento de cenizas y escorias. De la misma manera influirá transformando químicamente las rocas circundantes (Metamorfismo de contacto).

CAPITULO SEGUNDO.- ORIGEN DE LOS VAPORES TERMALES.

I

La palabra Fuerza Endógena se ha vuelto de uso común en Italia para designar la energía térmica contenida en el subsuelo y susceptible de ser utilizada.

La energía térmica, en rigor, es una de las formas de las fuerzas endógenas, y comprende el agua caliente y el vapor de agua existentes en el subsuelo y el calor del mismo susceptible de ser utilizado para calentar agua que por cualquier medio se introduzca en el mismo.

II

Numerosas pueden ser las causas que originen los depósitos de vapor en el subsuelo.

Ha sido sugerida la teoría de que el calor natural terrestre (grado geotérmico) pueda dar origen a la formación de aguas a elevada temperatura o de vapor de agua. Esto es poco probable, dado que siendo el grado geotérmico medio de 32-33 m, sería necesario descender 5 Kms. para obtener un aumento de 150° C. y a aquella profundidad es imposible la existencia de faldas freá-

ticas considerable.

Por otra parte la pérdida de calor que experimentarí el agua al salir a la superficie desde las grandes profundidades, excluye la posibilidad de que aguas de este origen puedan producir las manifestaciones fumarólicas en las cuales la temperatura del agua llega a ser de 200° C. o más.

III

Debemos considerar el caso de la evaporación del agua contenida en una roca o en un estrato de material sedimentario, causada por el contacto con el magma en fusión y que viniendo del bajo forma una gigantesca intrusión.

El estrato productivo puede estar constituido por material sedimentario como las arcillas y los esquistos, o de material eruptivo como las lavas fracturadas, las cenizas volcánicas o rocas intrusivas (granito, gabro, diorita, etc.).

GAUTIER Afirma que de 1 m³ de granito calentado a 400- 500° C. pueden obtenerse 27 Kg. de agua. En consecuencia de 1 Km³ se podrían obtener 27 millones de toneladas de vapor sobrecalentado a 370° C. De esta manera se ve, aunque de manera problemática, la posibilidad de esta hipótesis como explicación del origen de algunas manifestaciones de carácter endógeno que se hallan en terrenos sin actividad volcánica aparente.

Si es una arcilla que entra en contacto con el mag

ma, la cantidad de vapor por unidad de volumen de arcilla puede ser mucho mayor, lo mismo que en el caso de rocas calcáreas, que si son muy porosas, pueden absorber hasta un 100% de su peso en agua.

Es de observar que en estos casos la cantidad de vapor obtenida es limitada, ya que la acción destilante del magma se ejercerá sobre el pequeño volumen con que entra en contacto directo.

IV

Podemos considerar luego el caso de la existencia de una falda freática profunda, sea de infiltración terrestre o marina, o de un depósito subterráneo de agua, que entrase en contacto con el magma en fusión o ya consolidado pero aún a elevada temperatura. Esta agua una vez calentada, tendería a salir al exterior por su misma presión interna y posiblemente causaría manifestaciones fumarólicas, al pasar por las grietas o fallas del terreno.

No resulta difícil suponer, en áreas como el golfo de Nápoles en Italia, la existencia de intrusiones del magma a poca profundidad, que entren en contacto con faldas de agua, evaporándolas.

No obstante el poco conocimiento de la zona, se considera que por lo menos parte del agua evaporada es de origen marino, como lo muestra el hecho de que, en sondeos explorativos, se ha hallado a 1 Km. de profundidad, agua con una salinidad del 7%.

Podemos suponer como origen del vapor el residuo líquido-gaseoso a elevada temperatura, que queda cuando un magma llega a la fase final de consolidación.

Como se manifestó en el capítulo primero, el magma al consolidarse pasa por cinco fases sucesivas: fase del magma sobrecalentado, ortomagmática, pegmatítica, neumatolítica e hidrotermal.

Cuando la temperatura del magma ha bajado suficientemente como para permitir su consolidación se produce la segregación del agua y los gases en disolución, que gracias a la elevada temperatura alcanzan presiones elevadísimas.

Si el vapor halla una comunicación con la superficie, se manifestará exteriormente como sucede con los cráteres humeantes de algunos volcanes. Cuando la compacidad del terreno no permite la salida del vapor al exterior, se enfriará con el magma, no sin antes haber provocado importantes cambios mineralógicos en las rocas que lo rodean. En este caso es susceptible de utilización, toda vez que se encuentre en cantidad considerable.

El vapor proveniente del magma se conoce con el nombre de vapor primario.

El caso ideal está representado en la fig. 1. El vapor proveniente de la consolidación del magma asciende a través de las fracturas hasta encontrar el estrato permeable C, donde se acumula hasta llenarlo

completamente. Por cuanto lo he llamado vapor, probablemente, debido a la elevada presión y temperatura, se presentará en estado líquido, como se discutirá después.

En este caso el estrato permeable constituye un depósito de vapor, algo así como los tanques de abastecimiento de una ciudad, los cuales absorben los picos de carga en las horas de demanda máxima, a expensas del agua contenida en ellos.

Una vez localizado el estrato productivo, al proceder a su utilización, pueden presentarse dos casos diversos: que el consumo de vapor sea igual o menor que la afluencia de vapor al estrato, o que sea superior. En el primer caso, la duración de la productividad estará limitada solamente por las pérdidas internas de calor, y podrá fácilmente ser de varios miles de años.

En el caso de que la cantidad de vapor utilizada sea superior a la afluencia del mismo en el estrato que actúa como depósito de vapor, parte de éste será suministrado por el estrato. Como consecuencia, se produce una expansión del fluido restante dentro del estrato, teniendo como consecuencia una disminución de la presión que tiene como consecuencia una disminución del rendimiento total del campo.

Este problema parece que tiende a presentarse en Larderello debido a una sobreexplotación del campo vaporífero. Este fenómeno se ha caracterizado por una disminución de la presión en casi todos los pozos perforados, y por un aumento en la temperatura del vapor. Esto

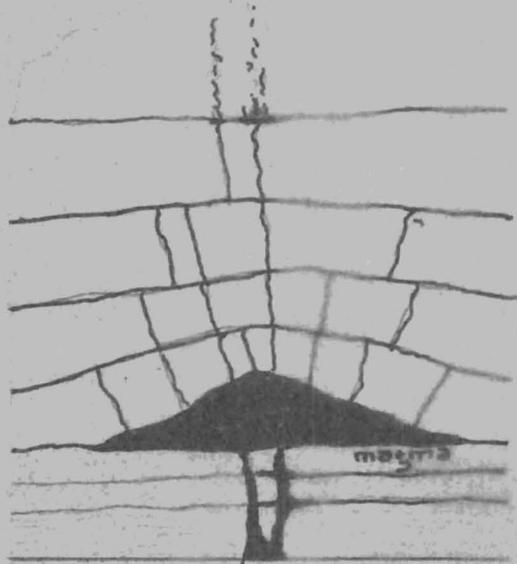


FIGURA 1
Segregación directa de vapores por el magma

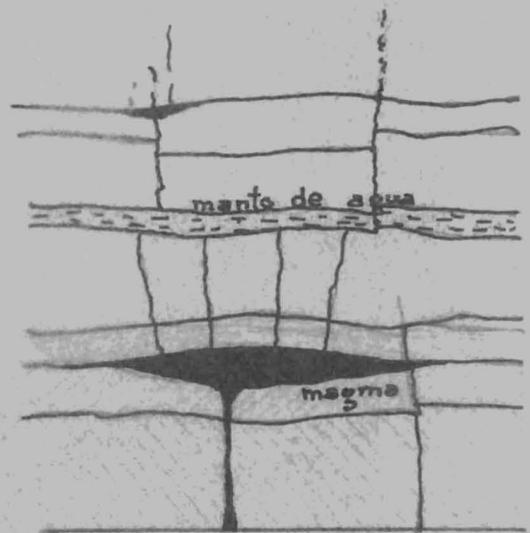


FIGURA 2
Calentamiento de una falda acuífera por los vapores del magma

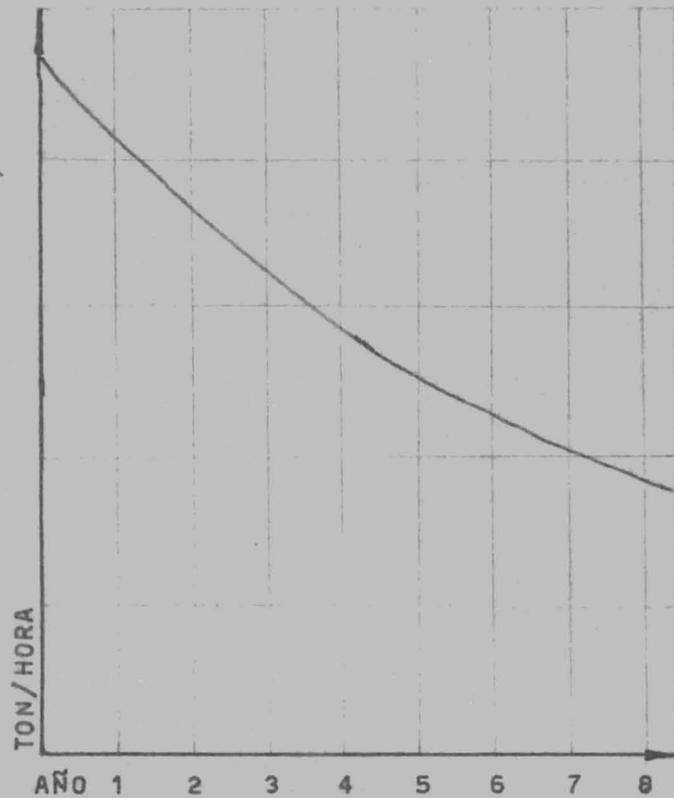


FIGURA 3. Curva del decrecimiento de la producción de vapor de un campo sobreexplotado

tiene como explicación la disminución del nivel hidrostático del fluido, y la llegada al estrato de vapor primario en cada vez mayor cantidad.

VI

En seguida se puede considerar el caso de una falda de agua no muy profunda y que recibe, a través de una serie de grietas, el vapor primario de un magma.

Cuando la falda acuífera es una falda estacionaria (depósito subterráneo, agua de infiltración marina), con el transcurso del tiempo el agua se calentará hasta alcanzar la temperatura del vapor en las cercanías de la falla, decreciendo la temperatura al aumentar la distancia, hasta llegar a la misma temperatura del terreno.

Al perforar un pozo muy cerca de la falla productiva el agua saldrá muy caliente en los primeros días. Conforme sale el vapor que ha sido calentada por largos años por el vapor, será sustituida por agua fría, la cual a su vez será calentada por el vapor, pero debido al poco tiempo de contacto no tomará su temperatura. De esta manera, el agua se enfriará más y más hasta alcanzar un equilibrio dictado por la cantidad de agua que sale, y las calorías/hora del vapor que llega. La curva del decremento de la producción tomará una forma hiperbólica, una de cuyas asíntotas representará el límite de la producción. (Ver Fig. 2)

Conforme nos alejamos de la falla puede atenuarse

la disminución de temperatura, y a una cierta distancia se presentará el fenómeno inverso, o sea que la temperatura aumentará con el pasar del tiempo hasta que, como en el caso anterior, se estabilizará.

Debemos observar que en estos últimos casos de producción indirecta de vapor, la cantidad total de energía depende principalmente de la capacidad de las fallas y no está en razón directa con el número de pozos perforados.

VII

Aún no se ha podido precisar con exactitud cuál es la causa de las diversas manifestaciones presentes en los varios países. Uno de los estudios que puede conducirnos a la identificación de las mismas es el conocimiento de los gases magmáticos y demás gases del subsuelo, considerados en general como gases minerales para distinguirlos de los gases provenientes de la fermentación de organismos vegetales o animales (gases del carbón y del petróleo) que se forman a temperatura ambiente.

Las manifestaciones gaseosas mencionadas pueden dividirse en cinco categorías:

Fumarolas secas a más de 100°. Contienen vapor de agua, hidrógeno, cloruros alcalinos y metálicos.

Fumarolas ácidas, conteniendo SH_2 , SO_2 , cloruro férrico, cloruro de amonio, y en su fase más fría, CO_2 .

Fumarolas alcalinas, conteniendo CO_2 , cloruro amónico

y carbonato amónico.

Fumarolas frías, desde 100° C. hasta la temperatura ambiente, y conteniendo vapor de agua, CO₂ y SH₂.

Mofetas o emanaciones de CO₂ a la temperatura ambiente o casi.

El Dr. U. Sborgi en una conferencia dictada a la Asociación Italiana de Química, observó justamente que estos cinco tipos de manifestaciones se presentan diversamente distribuidas en el espacio y en el tiempo; las fumarolas más calientes se presentan al centro de actividad (cráter) y las mofetas a mayor distancia. Cuando la actividad aparente cesa, las manifestaciones a alta temperatura son las primeras que desaparecen; todas las demás cesan sucesivamente; las mofetas subsisten cuando la actividad ha cesado.

Esto es el caso más común, pero pueden presentarse diversamente.

VIII

Por cuanto nos es desconocida la marcha del fenómeno, podemos establecer ya como causa del mismo la acción del magma que hace evaporar el agua con la cual entra en contacto directo o indirecto, o la segregación del agua que contiene. De esta manera, todas las manifestaciones, no obstante ser diferentes unas de otras, pueden ser relacionadas a un fenómeno único magmático; para establecer el origen de cada manifestación es necesario un conocimiento más profundo de los gases mag-

máticos. En el estudio de la formación de los gases volcánicos es necesario prescindir de toda teoría exclusivista, pues los mismos gases pueden tener un origen tanto orgánico como inorgánico, tanto analítico como sintético.

El Dr. SBORGI estudió muy bien la relación entre la temperatura de una fumarola y su composición, y afirma que el fenómeno fumarólico constituye una gigantesca destilación fraccionada en la cual el vapor de agua a elevada temperatura reacciona químicamente con las materias solubles a esa temperatura, y las deposita al enfriarse ya modificadas. De esta manera los productos que se forman o subliman a temperatura más elevada se hallan en las primeras fases, mientras aquellos productos con un punto de ebullición más bajo se hallan presentes en todas las fases.

CLARKE (The Data of Geochemistry) dice:

"Los gases salen de un cráter activo a una temperatura tal que son prácticamente secos. Contienen vapor sobrecalentado, hidrógeno, monóxido de carbono, metano, cloruros metálicos al estado de vapor y otras sustancias de menor importancia. El oxígeno puede estar presente en ellos con un poco de nitrógeno, argo, azufre y compuestos gaseosos del flúor.

2º. El hidrógeno se oxida formando más vapor de agua y el monóxido de carbono se transforma en CO_2 ; del azufre se produce anhídrido sulfuroso. El vapor de agua reacciona con una parte de los cloruros metálicos, genera ácido clorhídrico, y así las fumarolas ácidas ha-

con su aparición.

3º. Los gases ácidos de la segunda fase se abren su camino a través de las grietas de la lava y de las rocas adyacentes, y su contenido ácido se consume al efectuarse varias reacciones neumatolíticas, las rocas se corroen, y donde existen sulfuros se produce SH_2 . Si se hallan rocas carbonatadas se produce CO_2 .

4º. Queda solamente el CO_2 y el vapor de agua."

Este parece ser el curso general de los hechos, si bien puede ser modificado por peculiaridades locales.

IX

Una luz en la marcha del fenómeno la puede dar el contenido gaseoso de la fumarola, y en particular el contenido de gases raros: helio, argón, criptón y xenón. Estos gases no se combinan con los demás elementos por lo cual pueden salir a la superficie en cualquier condición del terreno, y cualquiera que sean las reacciones químicas que se realicen en el interior del subsuelo. Su presencia en una fumarola afirma la idea de que el gas primario ha quedado aprisionado en el interior de la tierra.

En el estudio de la proporción de gases raros y su relación con la proporción de los mismos en la atmósfera, debemos considerar su solubilidad en el agua a las diversas temperaturas. En la tabla de la pag. 20 están indicados los valores de la solubilidad para las temperaturas 0°C. , 20°C. y 50°C.

De la misma manera, la proporción del hidrógeno- metano- anhídrido carbónico- gases raros puede variar de un lugar a otro aún tratándose de manifestaciones con un mismo origen, siempre que varíe la temperatura.

En estas observaciones debemos notar que existe una casi total carencia de datos, ya que solamente han sido estudiadas las manifestaciones de Larderello, en las cuales se han hallado discrepancias notables entre las relaciones $\frac{\text{He- Ne- Ar- Kr del aire}}{\text{He- Ne- Ar- Kr endógenos}}$, como para poder suponer un origen diverso.

TABLA DE SOLUBILIDAD Lts. gas en Lts. de agua a 760 mm,

Temp.	helio	argón	Kriptón	Xenón
0°	0.00967	0.053	0.1105	0.242
20°	0.0088	0.034	0.0625	0.123
50°	0.107	0.0257	0.0378	0.090

X

Para concluir, observemos que todas las posibilidades mencionadas presuponen la existencia de un magma a relativamente poca profundidad, y la existencia de un estrato permeable comunicante con la fuente de vapor magma o materia en contacto con el mismo) y separado de la superficie por un estrato relativamente impermeable. Digo relativamente porque el vapor, aunque se halle separado por él de la superficie, siempre puede hallar fallas o pequeñas grietas para manifestarse en la superficie.

A estas condiciones que según mi juicio son indis-

pensables, es necesario agregar otras de carácter práctico que pueden limitar la utilización del vapor.

Un problema de capital importancia lo constituyen las incrustaciones, que pueden disminuir la producción de vapor hasta obligar a parar las centrales. Este es el caso de la central de Cetara en Isquia (Italia) construida antes de la II Guerra, según un esquema muy simple, con una turbina y un generador de 500 KwH alimentados con el vapor de un solo pozo. Las incrustaciones que el CaCO_3 formaron en el pozo obligaron a suspender su funcionamiento después de pocos años, y actualmente se ha perforado otro pozo a pocos metros para poder reanudar el servicio, con un costo considerable.

En el caso de Larderello, el problema de las incrustaciones se presenta muy atenuado debido a su composición: H_2O , CO_2 , CH_4 , H_2S , N_2 , H_3BO_3 , NH_3 y gases raros; no obstante, el decremento observado en la producción de cada pozo debe ser atribuido en gran parte a la formación de incrustaciones, siendo debido a las sales de calcio y magnesio que se depositan en las fracturas.

CAPITULO TERCERO. LA SONDA ROTARY.

La técnica de la perforación tiene su origen en la antigua civilización china. Con objeto de extraer la sal de ciertas aguas subterráneas los chinos realizaron cientos de perforaciones, algunas de las cuales alcanzaron hasta 500 metros de profundidad. Para tan grande empresa utilizaban primitivas máquinas construídas enteramente de madera que funcionaban por el sistema a percusión.

El desarrollo de los métodos actuales ha tenido origen en los Estados Unidos, donde desde la segunda mitad del siglo pasado se lleva a cabo la explotación intensiva del petróleo, y por esto se puede decir que la historia de la sonda Rotary es la historia del petróleo.

Para los primeros sondeos se utilizaba una sonda a percusión del tipo más simple: una máquina a vapor de doble efecto que suministraba el movimiento a una excéntrica que subía y bajaba alternativamente una viga de hierro de la cual pendía el percusor o herramienta de perforación.

Desde 1859, en que se perforó por primera vez en busca de petróleo, hasta nuestros días, se ha mejorado mucho el equipo de perforación a percusión, tendiéndose a construirlo en unidades standard.

El sistema Rotary tiene un origen reciente. Mientras el método a percusión funciona perfectamente en terrenos duros, causa problemas en terrenos arcillosos y arenosos porque la vibración y el impacto del percusor causan derrumbes y formación de cavidades en las paredes del pozo, con los respectivos contratiempos en el sondeo y sobre todo a la hora de fijar la tubería de revestimiento.

Su uso se ha extendido a todos los tipos de terreno gracias al perfeccionamiento de la sonda y su automatización. No obstante actualmente ha sido casi enteramente sustituida por la sonda Rotary. Tanto una como otra ofrecen grandes ventajas.

II

La sonda a percusión puede dividirse en dos partes con funciones enteramente diferentes. La primera y más importante es la parte motriz, constituida por el mecanismo destinado a hacer subir y bajar rítmicamente el percusor o herramienta de perforación por medio de una viga conectada a una gran polea de madera con un pin excéntrico.

Esto constituye el mecanismo esencial de la sonda a percusión. Su operación es muy simple. Aplicada la

fuerza motriz (a vapor, diesel o electricidad) a la po_{le}a, esta comunica un movimiento oscilatorio a la viga. Del extremo de ésta pende la herramienta por medio de un cable de acero. La caída de la herramienta se regula variando la posición del pin excéntrico, pudiendo ser de 2 1/2" a 4 1/2".

La fuerza de la caída del percusor fragmenta el terreno, y de esta manera realiza la perforación.

La segunda parte la constituye la torre de manobra que sirve para sostener las diversas herramientas que se introducen en el pozo y la tubería de revestimiento.

Para la extracción de los detritos del fondo del pozo, se suspende el movimiento del percusor y se introduce una cuchara que recoge el material suelto y lo lleva a la superficie; después de haber limpiado el pozo se reanuda la operación.

III

La sonda Rotary ha desplazado casi completamente a la sonda a percusión, y es por esto que le dedico casi toda la atención.

La sonda Rotary fué usada por primera vez en terrenos arcillosos, en sustitución de la sonda a percusión que en este tipo de terrenos ocasiona perjudiciales derrumbes y cavidades en el pozo que dificultan la cementación, y que tiende a atascarse con la arcilla.

Durante algún tiempo se creyó que su uso en terrenos duros no era conveniente por lo cual no se difundió

extensamente; no obstante hoy día su uso se ha extendido a todos los tipos de terreno, gracias a la fabricación de escalpelos de gran dureza.

Muchos operadores aún prefieren el sistema a percusión porque afirman que es más seguro y permite un mejor estudio de los estratos atravesados. Para satisfacer ambos gustos se fabrican equipos combinados de funcionamiento satisfactorio.

IV

La sonda Rotary perfora por la acción de un escalpelo rotatorio que ejerce una presión considerable, generalmente de varias toneladas, y el cual realiza un agujero casi cilíndrico. La remoción de los detritos se lleva a cabo circulando un fango especial a través del pozo, y el cual desciende a través de las astas que hacen girar el escalpelo y asciende a lo largo de las paredes del pozo. El equipo incluye una torre de regular altura, la cual sirve para introducir y extraer las astas y la tubería de revestimiento y para soportar parte del peso de la batería de astas durante la perforación, de manera que sobre el fondo se ejerza una presión de pocas toneladas, aunque si el peso de la batería es considerablemente mayor.

El mecanismo de una sonda Rotary puede ser clasificado en tres grupos según su función:

1º) Grupo de perforación, constituido por el escalpelo, la batería de astas que sostiene al escalpelo, la tabla Rotary (o plano rotatorio) que junto con el tambor de

maniobra comunica el movimiento rotatorio a la batería, y el equipo de motores, que puede ser accionado a vapor, electricidad o Diesel.

2º) Grupo de circulación, el cual, como lo indica su nombre, sirve para circular el fango que arrastra al exterior los detritos producidos por el escalpelo; consta de la batería de astas, la cabeza de inyección, las bombas del fango, el tanque de sedimentación y diversos equipos auxiliares.

3º) Grupo de maniobra, constituido por la torre, de la cual pende un aparejo; del tambor destinado a maniobrar el cable que hace subir o bajar el aparejo, y de diversos accesorios que sirven para facilitar las distintas maniobras.

Esta clasificación sirve solamente para comprender mejor las funciones de una sonda Rotary. En la práctica, casi todas las partes sirven para dos o más funciones: la torre sirve para la perforación y para la maniobra, las astas para la circulación y para la perforación, los motores cumplen su trabajo para las tres funciones, etc.

Y después de estos preliminares, describiré parte por parte los diversos elementos que componen la sonda Rotary.

V

Torre de perforación. Las torres de perforación pueden ser de hierro o de madera. Su selección depende

de la consideración de las ventajas y desventajas en cada caso particular.

La torre de acero tiene un peso considerablemente menor para una misma resistencia. Al ser sometida a un gran esfuerzo ofrece mayor seguridad gracias a la mayor uniformidad del acero que no presenta nudos o defectos internos como la madera. En el caso de que ceda una de sus partes, ésta probablemente se dobla lentamente en vez de desplomarse como ocurre con las torres de madera.

La duración de una torre de acero es considerablemente mayor, y esta particularidad reviste una mayor importancia en el trópico, donde la humedad y el sol vuelven pronto inservible la madera. En este caso la selección de esta última solo puede hacerse cuando será utilizada por un corto período.

Los partidarios de las torres de madera, además de considerar el menor costo inicial, afirman que la elasticidad de la madera absorbe mejor las vibraciones del motor y el impacto de la batería, alargándoles la vida.

El peligro de incendio, que debe ser considerado en las zonas petrolíferas, no existe en nuestro caso.

TORRES DE ACERO. Las torres de acero se construyen generalmente de secciones tubulares o de hierro perfilado, de preferencia angular. En este caso las secciones principales son de 4"x 4" o de 5"x 5" y el resto de 2"x 2" o de 2½"x 2½". En el primer caso, las secciones principales tienen un ϕ 3" o 4" y el resto 1½" o 2".

Aunque las torres fabricadas comercialmente tienen ya la resistencia adecuada según la carga especificada por el comprador, será siempre conveniente hacer una estimación previa.

El cálculo de los esfuerzos máximos a que se somete una torre puede aproximarse así:

A) Carga muerta.

Peso de la torre. Puede variar de 12.000 a 70.000 Kg.

Peso del bloque fijo, del bloque móvil y del cable.

Carga sostenida por el bloque móvil. En general la carga máxima estará representada por el peso de la tubería de revestimiento de un diámetro de 10-12". Por ejemplo una tubería de 1000 mts. de longitud y ϕ 12" con un peso de 67 Kg./m.l. impone a la torre una carga de 67T. A esto debe agregarse la fricción de la tubería contra las paredes que puede estimarse en un 25%, y disminuirse el empuje hidrostático del fango sobre la columna.

Debe considerarse así mismo el esfuerzo que se realiza al tratar de alzar una tubería de revestimiento o batería de astas bloqueada dentro del pozo. En este caso, deberá sumarse a la carga muerta el impacto causado por las tracciones a que se somete bruscamente la batería o tubería bloqueada, y que puede ser de 4 a 5 veces la carga.

Un criterio recomendable es el de calcular la torre para que soporte la misma carga capaz de causar la rotura del cable del aparejo, o sea, siendo P la carga vertical que deberá ser capaz de resistir la torre; siendo

R la resistencia a la tracción del cable y siendo N el número de poleas del bloque móvil, tenemos la fórmula :

$$P ; 2R (N + 1).$$

En una torre normal con un bloque móvil de cinco poleas y un cable de ϕ 1" con una resistencia de 33,100 Kg.:

$$P : 33,100 \times 2 (5 + 1) : 397,200 \text{ Kg.}$$

En nuestros cálculos debe considerarse así mismo la carga de viento. A este efecto, la velocidad del viento variará con las regiones según la mayor o menor exposición del lugar, su altura sobre el nivel del mar, su posición geográfica y otras consideraciones. La presión unitaria se calcula con base a la fórmula

$$P : 0.0024 v^2$$

en la cual P está expresado en libras por pulgada cuadrada y V en mph. De esta manera, un viento de 100 K.P. H. (60 m.p.h.) ocasiona una presión horizontal de :
 $0.0024 \times 60 \times 60 : 8.4 \# / \text{plg}^2.$

En regiones como el golfo de Méjico, expuestas a la acción de los huracanes, conviene anclar la parte superior de la torre por medio de tirantes de acero unidos a puntos fijos en el suelo, para evitar una oscilación excesiva.

Debe tenerse en cuenta al calcular el área expuesta a la acción del viento, de incluir el área de la batería de estas cuando se halla fuera del pozo.

Dimensiones de las torres. Actualmente existe la tendencia a agrupar las diversas torres en pocos tipos standard, precisados por las especificaciones A.P.I.

TABLA I

TORRES STANDARD SEGUN LAS NORMAS A.P.I.

TIPO	1 1/2	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Columnas principales	$3\frac{1}{2} \times 3\frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$	$4 \times 4 \times \frac{1}{4}$	$4 \times 4 \times \frac{3}{8}$	$5 \times 5 \times \frac{3}{8}$	$6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	$6 \times 6 \times \frac{5}{8}$	$8 \times 8 \times \frac{1}{2}$	$8 \times 8 \times \frac{5}{8}$	$8 \times 8 \times \frac{3}{4}$
Columnas de base	$4 \times 4 \times \frac{1}{4}$	$4 \times 4 \times \frac{3}{8}$	$5 \times 5 \times \frac{3}{8}$	$6 \times 6 \times \frac{3}{8}$	$6 \times 6 \times \frac{1}{2}$	$6 \times 6 \times \frac{5}{8}$	$6 \times 6 \times \frac{3}{4}$	$8 \times 8 \times \frac{5}{8}$	$8 \times 8 \times \frac{3}{4}$	$8 \times 8 \times 1$
Capacidad: torres de a- cero dulce	66900	85800	126500	185700	245800	323000	397000	465000	576600	687000
Capacidad: torres de a- cero al Si.	81700	107900	159100	243800	332700	436600	537100	644800	799600	952000

TABLA I (Cont)

ALTURA	BASE (serie regular)	BASE(serie pendiente unif.)	Abertura centro
136'	26'	26'	5' 8"
122'	24'	21' 5"	5' 6"
94'	24'	20' $3\frac{1}{4}$ "	5' 6"
87'	24'	19' 1 $\frac{3}{8}$ "	5' 6"
80'	20'	16' 9 $\frac{7}{8}$ "	5' 6"
73'	20'		4' 4"
66'	20'		4' 4"

TABLA 11

PARA EL CALCULO DE LAS CARGAS HORIZONTALES DE LA TORRE

ALTURA TORRE	SUPERFICIE EXPUESTA AL VIENTO	COMP. HOR. PESO ASTAS
80'	3' 11" x 67' 6"	1210 Kg.
87'	3' 11" x 67' 6"	1210
94'	3' 11" x 67' 6"	1210
122'	3' 11" x 90' 0"	1610
136'	5' 8" x 90' 0"	3460

TABLA III

SUBESTRUCTURAS STANDARD A.P.I.

DIMENCIONES BASE	TIPO	PESO MAXIMO DE LA TORRE, Kg.	ID. DE LAS ASTAS	ID. DE LA COL. REVESTIMIENTO	CARGA TOTAL
24'	Standard	340200	68040	136080	699500
26'	Standard	340200	90720	204120	793300
30'	Standard	340200	90720	204120	868600
36'		680400	158760	272160	1213300

Para las dimensiones indicadas pueden estudiarse las tablas I y II en las cuales puede observarse que existen diez tipos de torre para cada altura de la misma, y cuatro tipos de subestructuras standard (existen tres tipos pesados de subestructuras que no he incluido en la tabla III porque se usan solamente en sondeos a grandísima profundidad.

Antenas. Bajo este nombre se comprenden aquellas torres especiales que pueden ser alzadas sin montaje o con muy poco. Su utilidad es notoria en los casos en que se realizan perforaciones en un corto tiempo por lo cual el tiempo de montaje representa una proporción considerable del total; en este caso es más razonable y económico desplazar la torre de un punto a otro en vez de desmontarla y montarla de nuevo, siempre que las vías de comunicación lo permitan.

VI

Aparejo. (Hoisting Block and Hook). Este es lo que en español se llama también polipasto, y consta de un bloque fijo de poleas, de un bloque móvil y del cable que lo acciona.

El bloque fijo está colocado en la parte superior de la torre y transmite a ésta la carga que pende del gancho, su propio peso, el del bloque móvil y el del cable. Consta de varias poleas montadas sobre un mismo eje horizontal, de acero especial. Suelen tener un diámetro grande para evitar el desgaste del cable, sien

do recomendable que su diámetro debería ser el mismo que el de las del bloque fijo, generalmente es menor por razones de espacio.

En la parte inferior está colocado el gancho simple o el gancho compuesto, que incluye dos prolongaciones a los lados que sirven para colocar simétricamente los elevadores de tubería.

El cable. Sirve para transmitir al bloque fijo las cargas que sostienen el bloque móvil, por medio del gancho, permitiendo el ascenso o descenso de éste. A este objeto, el cable está enrollado por una parte al tambor rotatorio, y por la otra está fijado bajo la torre. Su esfuerzo es inversamente proporcional al mínimo de ramas que están entre el bloque fijo y el bloque móvil.

De su función pueden deducirse la importancia de su buena conservación, ya que su rotura repentina puede ocasionar daños irreparables al pozo, al equipo y aún la muerte de las personas que se hallen cerca. Debe ser observado y engrasado con frecuencia, sobre todo si al perforar se atraviesan ciertas formaciones arcillosas, que comunicando al cable esfuerzos vibratorios ocasionan su desgaste en los puntos de contacto con las poleas. Para subsanar este inconveniente, se acostumbra cambiar periódicamente la posición del cable, acortándolo o desplazándolo de una longitud que no sea múltiplo de la circunferencia del tambor, para que cada vez sean expuestas al desgaste secciones distintas del ca-

TABLA IV

RESISTENCIA NOMINAL DE LOS CABLES 6x19, CON ALMA DE CAÑAMO, NO GALVANIZADOS (Esp. API)

Diam. en pulgadas	PESO Kg/m.	ACERO PLOW STEEL		ACERO IMPROVED PLY STEEL	
		mínima Kg.	Nominal	Mínima, Kg.	Nominal
1/2"	0.595	8270	8500	9500	9750
9/16	0.760	10430	10700	11940	12270
5/8	0.937	12840	13180	14800	15200
3/4	1.340	18300	18800	21100	21600
7/8	1.830	24800	25400	28500	29300
1	2.380	32200	33100	37000	38000
1 1/8	3.030	40500	41500	46800	47800
1 1/4	3.720	50000	51000	57200	58700
1 3/8	4.510	60000	61300	68600	70500
1 1/2	5.350	70900	72600	81300	83500

Los cables galvanizados resisten un 10% menos y los cables con alma de acero un 7.5% más que las cifras arriba indicadas.

ble.

Por estas razones, siempre por economía, se aconseja comprar el cable de una longitud bastante mayor de la estrictamente necesaria.

Los cables pueden ser (según las especificaciones API) de dos tipos según la calidad del acero: "Improved Plow steel" de gran calidad, con una resistencia un 10-20% superior a la normal y un precio 30% mayor, y Plow steel, inferior al primero.

En general, y basándose en la experiencia, se suele utilizar el cable 6 x 19 con numerosas variedades que dependen de la disposición de los 19 hilos. Así tenemos el tipo Seale 1-9-9- (1ª capa 1 hilo; 2ª capa 9 hilos, 3ª capa 9 hilos); el tipo Warrington 1-6-12; el tipo Filler 1-6-6-12.

Para la resistencia y el peso del cable según su diámetro, se puede consultar la tabla IV.

VII

Plano rotatorio (Rotary table). Constituye el órgano característico del sistema Rotary y sirve para comunicar la rotación a la batería de astas por medio del asta cuadrada.

Su peso y dimensiones varían según la casa que la construye, y solamente es uniforme la abertura central cuya medida sirve también para dominarla

Consta en primer lugar de la base de acero fundido con una superficie superior rugosa y la cual va fijada

TABLA V
 PLANO ROTATORIO (ROTARY TABLE) (Spec. API)

ABERTURA CENTRAL	PESO Kg.	CAPACIDAD ACEITE, gls.	DIAMETRO mts.	No. BOLAS DEL COJINETE	ALTURA mts.
12 $\frac{1}{2}$ "	1500	5	1.90	26 de ϕ 1 $\frac{1}{4}$ "	0.46
17 $\frac{1}{2}$ "	3000	12	2.31	27 de ϕ 2 $\frac{1}{2}$ "	0.58
20 $\frac{1}{2}$ "	4400	12	2.39	27 de ϕ 3 "	0.68
20 $\frac{1}{2}$ "	4450	12	2.46	27 de ϕ 3 "	0.74
27 $\frac{1}{2}$ "	5200	14	2.39	34 de ϕ 3 "	0.68

a la subestructura de la torre. En su centro, sobre una superficie enteramente lisa, está fijado un cojinete de esferas, sobre el cual se apoya el cuerpo rotatorio. Este comprende la superficie lisa correspondiente a la superficie de apoyo sobre el cojinete, la corona dentada por medio de la cual recibe la potencia transmitida por el árbol de transmisión, y la abertura central en la que se introduce el bloque porta-cuñas.

Tanto la corona como el cojinete están embebidos en aceite lubricante para impedir su desgaste, y el cual circula gracias al movimiento rotatorio del conjunto.

Sobre el cuerpo rotatorio está colocada una cubierta de seguridad que transmite a la base las cargas que ocasionalmente se ejerzan sobre ella.

VIII

Batería de perforación. Comprende el escalpelo, las astas pesadas, las astas normales y el asta cuadrada, y las distintas reducciones que enlazan unas y otras.

Asta cuadrada. Está unida por su extremo superior a la cabeza de inyección y por su parte inferior a las astas normales. Su longitud suele ser de 11 mts. y sirve para transmitir al escalpelo la rotación del plano rotatorio, independientemente de la posición de la batería.

Su sección exterior puede ser cuadrada o exagonal y su interior es hueco para permitir el paso del fango. Para asegurarles una mayor resistencia, suelen cons-

TABLA VI
 ESPECIFICACIONES A.P.I. PARA LAS ASTAS CUADRADAS

LADO	LARGO UTIL	LARGO TOTAL	∅ A LOS EXTREMOS	∅ AGUJERO CENTRAL	PESO
plgs.	pies	pies	pulgadas	pulgadas	Kg.
3	37	40	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	390
3	27	30	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	344
$3\frac{1}{2}$	37	40	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{4}$	458
$3\frac{1}{2}$	27	30	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{4}$	408
$4\frac{1}{2}$	37	40	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	826
$4\frac{1}{2}$	27	30	$7\frac{3}{4}$ ó $5\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	767
$5\frac{1}{4}$	37	40	$7\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	1247
$5\frac{1}{4}$	27	30	$7\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	1268
6	37	40	$7\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{2}$	1656
6	27	30	$7\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{2}$	

truirse de acero especial de cementación.

Sus características están indicadas en la tabla VI.

Astas normales. Las astas normales unen, a través de toda la profundidad del pozo, al asta cuadrada con el escalpelo, transmitiendo a éste su movimiento rotatorio, y llevar al fondo del pozo el fango especial de circulación.

Se fabrican en tres series de longitudes: de 18 a 20', de 27 a 30', y de 38 a 45'. Aunque en la perforación se introducen una a una, en la maniobra de extracción de la batería, se extraen en pasos de dos a cuatro astas, para economizar tiempo y evitar el excesivo desgaste de las juntas fileteadas. Con este último propósito también se acostumbra intercalar cada tres o cuatro astas, las llamadas juntas rápidas o especiales, que sufren el desgaste, conservando intactos los filetes de las astas.

Las astas suelen sufrir un gran desgaste en las juntas, que por su mayor diámetro rozan constantemente con las paredes. Para disminuir este desgaste, se recomienda usar protectores de hule. Estos tienen la forma de anillos, de un diámetro externo ligeramente superior al de las juntas, y que aplicados sobre las astas impiden el contacto de aquéllas con las paredes.

Los protectores se introducen a presión sobre las astas por medio de un aparato de funcionamiento hidráulico o mecánico.

Cuando se usan las astas por la primera vez, convie

ne enroscarlas cuidadosamente, ya que una distribución no uniforme de la presión puede ocasionar un desgaste parcial que permitiendo la salida del fango, terminará por causar la rotura de la batería en ese punto.

Se recomienda usar juntas recubiertas de una ligera capa de cobre (0.0003" de espesor) cuya maleabilidad asegurará un ajuste inicial perfecto.

También se recomienda de vez en cuando medir el espesor de las astas, para asegurarse de que la acción abrasiva del fango no ha disminuido su sección excesivamente.

Astas pesadas. Están colocadas en la parte inferior de la batería, entre las astas de perforación y el escalpelo. Suelen tener 9 mts. de longitud, y cuando aumenta la profundidad de la perforación, se aumenta también su número.

Su función es múltiple. En primer lugar sirven para tener las astas de perforación en tensión, pues de no hacerse así estarían sometidas a un esfuerzo combinado de compresión y torsión que no podrían resistir debido a su sección muy pequeña. En consecuencia, para evitar el someter la batería a estos esfuerzos, debe calcularse siempre que el eje neutro de la batería caiga sobre las astas pesadas.

Su segunda función es la de hacer actuar la batería de astas como una plomada, para mantener la verticalidad del pozo. En seguida, evitan la excesiva la excesiva trepidación de la batería, y finalmente aseguran

una presión más o menos constante sobre el fondo.

Cabeza de inyección. Suspendida del gancho, sirve para soportar la batería de astas, permitiendo su rotación, y a la vez asegura la circulación del fango que viene de la bomba, dentro de las astas. A causa de los grandes esfuerzos y presiones a que se somete, se comprende que debe ser un mecanismo de precisión.

Su elemento principal lo constituye el cojinete a esferas, ya que debe soportar todo el peso de la batería. Se halla sumergido en un baño de aceite que se debe revisar cada cierto tiempo.

IX

Escalpelo. El escalpelo constituye el instrumento penetrador de la roca que se perfora. Según la naturaleza del terreno, varía el tipo de escalpelo a utilizar. En primer lugar tenemos el llamado tipo "a cola de pez" (fishtail bit) el cual se utiliza para atravesar formaciones blandas: arcillas, arenas, etc., por su gran rapidez de avance. No sirve para las formaciones duras o abrasivas pues se desgasta rápidamente, ni para terrenos fracturados, que pueden por impacto ocasionar su rotura.

El escalpelo a cola de pez en su forma primitiva ha caído en desuso, siendo sustituido por escarpelos (drag bits) revestidos en metales duros, como el carborundum, y con agujeros para la salida del fango revestidos de tubos de acero especial recambiables.

Actualmente el escalpelo a conos (cone rock bits) es de uso universal. Siendo fabricado originalmente para la perforación de terrenos duros, su uso se ha extendido a casi todos los tipos de terreno. Los diámetros más usados son los de 7 7/8" y 8 3/4" que permiten una construcción robusta de los soportes y más resistencia en los dientes. Los diámetros menores conviene usarlos solo en los casos de necesidad pues sus dimensiones representan una solución de compromiso en detrimento de la resistencia.

El A.P.I. prescribe el diámetro de escalpelo a usar según el diámetro de la tubería de revestimiento, no permitiendo en ningún caso que el espacio libre entre el escalpelo y la tubería sea menor de 1/16" (ver tabla VIII)

La tabla VIII indica el tipo de escalpelo Hughes a utilizar según el terreno a perforar. Como puede observarse la clasificación es bastante elástica, permitiendo muchas veces el uso de un mismo escalpelo en dos tipos de terreno de dureza no muy diferente.

El escalpelo que se utiliza en terrenos blandos debe tener dientes grandes que permitan un avance rápido y que no se empasten en terrenos arcillosos; su espaciamiento debe ser tal que cada diente caiga en el espacio no tocado por el cono precedente, asegurando así una constante penetración y disgregación del material. Este escalpelo se usa en general a poca presión y alta velocidad.

TABLA VII

TIPOS DE ESCALPELOS MARCA "HUGHES"

- TIPO "OSC" Para formaciones rocosas no consolidadas, fracturadas y medias. Esquistos arcillosos, sal, yeso, arcilla, anhidrita y rocas calcáreas.
- Rocas de mediana dureza son aquellas perforables a razón de 20-100' / hora.
- TIPO "OSQ-2" Rocas semiduras. Arenas comprimidas, esquistos arcillosos, sal, anhidrita, etc.
- Rocas semiduras son aquellas con una velocidad de perforación de 5-50' / hora.
- TIPO "OWS" Rocas duras. Carbonato cálcico y magnésico, dolomita, esquistos duros, anhidrita dura.
- Rocas duras son aquellas con una velocidad de perforación de 3- 20' / hora.
- TIPO "W7A" Rocas duras abrasivas. Piritita, cuarzita, arenisca dolomítica, granito, etc.
- Incluye las rocas más duras halladas en la perforación Rotary.

TABLA VIII

TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Diam. exterior tubería, plgs.	Diam. interior plgs.	Diam. escal-pelo, plgs.	Peso, lbs/ pie lin.
6 5/8	6.135	6	17.0
	5.675	5 5/8	28.0
7	6.538	6 1/4	17.0
	6.456	6 1/4	20.0
	6.366	6 1/4	23.0
	6.276	6 1/8	26.0
	6.184	6	29.0
	6.094	6	32.0
7 5/8	7.125	6 3/4	20.0
	7.025	6 3/4	24.0
	6.969	6 3/4	26.4
	6.875	6 3/4	
	6.625	6 1/4	
8 5/8	8.097	7 7/8	24.0
	8.017	7 7/8	28.0
	7.921	7 5/8	32.0
	7.825	7 5/8	36.0
	7.725	7 5/8	40.0
	7.625	7 3/8	44.0
	7.511	7 3/8	49.0
9 5/8	9.063	8 3/4	29.3
	9.001	8 3/4	32.3
	8.921	8 3/4	36.0
	8.835	8 5/8	40.0
	8.755	8 5/8	43.5
	8.681	8 1/2	47.0
10 3/4	10.192	9 7/8	32.8
	10.050	9 7/8	40.5
11 3/4	11.150	11	38.0
13 3/8	12.715	12 1/4	48.0
	12.615	12 1/4	54.5
	12.515	12 1/4	61.0
	12.415	12 1/4	68.0
	12.347	12	72.0
16	15.375	15	55.0
	15.250	15	65.0
20	19.124	17 1/2	94.0

En los escalpelos para terrenos duros, los dientes de los conos son menores, para facilitar la trituración de la roca; cuando además los terrenos son fracturados, se aconseja usar un escalpelo en el cual el ángulo de ataque de los dientes sea obtuso, con objeto de evitar su rotura.

En estos terrenos es aconsejable usar una velocidad baja de rotación y una presión alta. Al atravesar formaciones rocosas abrasivas, es recomendable también comprobar frecuentemente el diámetro del escalpelo cambiando cuando se haya reducido mucho, para evitar dificultades al revestir el pozo.

X

Sistema de comando (Drawworks). Este comprende dos elementos completamente diferentes: el tambor de maniobras que hace subir o bajar el aparejo, y el mecanismo de transmisión de potencia a la batería. Uno y otro contienen los mecanismos de mando necesarios, frenos, cambios de velocidades, etc.

El mecanismo que hace alzar y bajar el bloque móvil de poleas y el gancho, está constituido por el tambor de maniobra en el cual está enrollado el extremo libre del cable del aparejo (el otro extremo está anclado a la base de la torre) y al cual se le pueden comunicar diversas velocidades por medio de un sistema de engranajes similar al de un automóvil. Este mecanismo sirve para alzar y bajar la batería de perforación y los diver-

Los utensilios que se introducen dentro del pozo, así como la tubería de revestimiento. Incluye un potente freno enfriado a agua.

La potencia del sistema se utiliza plenamente cuando se extrae la batería del fondo del pozo. Cuando éste ha llegado a varios miles de metros, el tiempo de extracción llega a representar un gran porcentaje del tiempo total. En este caso, es preferible usar motores de gran potencia y una buena caja de cambios con objeto de ahorrar tiempo.

La velocidad de la rotación de la batería en perforación puede también ser regulada por medio de un adecuado sistema de cambio de velocidades.

Todos los controles de la sonda están reunidos en un solo punto para permitir al operador su maniobra. Aunque la operación de un sistema mecánico de control es muy sencillo, existe la tendencia al uso de mecanismos automáticos o a aire comprimido, que reducen a un mínimo la fatiga del operador.

Entre estos dispositivos automáticos tenemos el Fluid Drive, que evita el uso del embrague y la sobrecarga de los motores al ocurrir cualquier incidente.

El freno electromagnético que, no funcionando por fricción no está sujeto a desgaste.

El freno hidráulico.

XI

Bombas para fango. Son bombas aspirante-impelen-

tes a doble efecto, y en general están constituidos por dos cuerpos con dos cilindros y dos émbolos, desplazados $\frac{1}{4}$ de carrera entre sí, asegurando de esta manera un flujo continuo de fango.

La construcción es similar a la de las bombas para agua, pero mucho más robusta, ya que deben desarrollar altísimas presiones, muchas veces hasta de 3500 psi., por lo cual su peso se eleva hasta las 15 tons.

En general una sonda incluye dos bombas, de manera que una trabaje cuando la otra está en reparación, y utilizándose asimismo cuando se trabaja en la cementación del revestimiento. De la misma manera, cuando se necesita una mayor presión, se disponen en serie, y cuando se necesita un mayor caudal, en paralelo. El rendimiento de una bomba depende del área de los pistones, de la carrera y de la velocidad de los pistones. Debe preferirse, entre dos bombas de igual rendimiento, aquella que tenga un área mayor de pistones y una carrera mayor, pues ésto representa un desgaste menor de las camisas y de las guarniciones del pistón, debido a la menor velocidad de éste, y una menor presión, gracias a su superficie mayor.

La inyección del cemento empleado en la cementación de las tuberías de revestimiento del pozo se lleva a cabo generalmente con las mismas bombas empleadas para la circulación del fango. Esta maniobra (la cementación) requiere una presión considerablemente mayor que la normalmente usada durante la perforación. Para

lograrla, inmediatamente antes de comenzar la inyección del cemento, se sustituyen las camisas y los pistones de la bomba por otros de menor diámetro: si las camisas normales son de $7\frac{1}{4}$ se sustituyen por camisas de $5\frac{1}{4}$ " con lo cual se obtiene un caudal de 0.52 veces el caudal normal y una presión 1.92 veces mayor.

La bomba de fangos contiene, en el tubo de aspiración, una rejilla metálica que actúa como filtro, y en el tubo de salida, una cámara de aire destinada a regularizar el flujo del fango y a absorber el golpe de ariete causado por una obstrucción cualquiera en el sistema circulatorio.

La salida del fango de la bomba se lleva a cabo por medio de un tubo de acero que va de la bomba a la torre y cuyo extremo está colocado a una altura de unos seis metros. Este extremo está unido con la cabeza de inyección por medio de un tubo de hule flexible y armado con hilo de acero, el cual lo hace resistir la presión y las vibraciones.

De particular importancia es la unión de la manguera en ambos extremos; puede ser hecha por medio de "Flanges" o de juntas fileteadas.

XII

Para la eliminación de los detritos, la sonda Rotary incluye dos equipos: la malla vibratoria y los tanques de sedimentación.

Al salir del pozo, el fango viene descargado sobre

la malla vibratoria. Esta consta de un marco que contiene la red, colocado en posición inclinada y apoyado en resortes; y de un motor que por medio de un eje exéentricamente equilibrado comunica a la malla el movimiento vibratorio.

El fango, una vez que ha atravesado la malla, y en consecuencia desprovisto de los detritos de diámetro regular, pasa a los tanques de sedimentación. Estos son tanques de gran superficie, de manera que el fango tiene tiempo de depositar la arena y los detritos de pequeño diámetro, los cuales de tiempo en tiempo pueden ser eliminados por medio de válvulas de descarga colocadas en el fondo de los mismos.

XIII

Quedan por describir solamente los motores que accionan los diversos mecanismos de la sonda. Estos mecanismos son: la batería de perforación, las bombas de fango y el tambor de maniobras. Estos motores pueden ser de varios tipos: eléctricos, Diesel, a gasolina, a vapor. La selección de uno u otro tipo dependerá de un conjunto de circunstancias, como el precio de los combustibles, la disponibilidad de agua, el precio y la existencia de electricidad en la zona, la naturaleza de la perforación, etc.

En rasgos generales, es preferible utilizar máquinas a vapor donde el agua y los combustibles sólidos cuestan poco, para pozos a gran profundidad, teniendo

en cuenta que el vapor es la fuente de potencia más elástica, sea por la velocidad que por el valor del par de fuerza motriz.

Donde el agua y los combustibles cuestan mucho será recomendable el uso de motores a explosión o Diesel.

Finalmente, el uso de motores eléctricos puede ser recomendable en zonas como Larderello, donde la electricidad cuesta poco y no se halla a más de 1 km. de distancia en ningún caso. En este aspecto, los motores de corriente alterna ofrecen con respecto a los motores a corriente continua, la ventaja de que pueden ser usados transformadores para elevar o bajar el voltaje de línea y de trabajo de los diversos implementos, sea de 110, 125, 220 o 440 voltios.

La potencia necesaria para el funcionamiento eficiente de la sonda Rotary depende en primer lugar de la dureza del terreno perforado; del diámetro de la perforación; de la profundidad de la misma y de las exigencias particulares del sondeo que se realiza.

En seguida viene determinada por la exigencia de poder extraer la batería de astas en el menor tiempo posible, sobre todo cuando se alcanzan elevadas profundidades; en este caso la maniobra completa de extracción e introducción de las astas sea para cambiar escalpelo o para realizar medidas en el fondo del pozo, puede representar, como ya se dijo, una fracción considerable del tiempo total de trabajo.

En E.E.U.U. se adopta como mínimo de potencia ne-

cesaria, 1 HP. por cada diez pies de profundidad del pozo.

Siempre que sea posible, será conveniente distribuir la potencia entre varios motores, con objeto de poder tener siempre, por lo menos uno parado o en revisión.

CAPITULO QUINTO.- EL FANGO DE CIRCULACION

I

El fango de circulación es un elemento de capital importancia en el trabajo de perforación, y se ha dicho que un buen fango representa el 90% de una buena perforación. Sin dar a éste esta importancia, debe reconocerse que un buen fango asegura un trabajo sin inconvenientes, y que un mal fango pone en peligro todo el trabajo.

1) Su función fundamental es la remoción de los detritos formados en el fondo del pozo por el escapelo, arrastrándolos en su movimiento ascendente hasta la superficie, donde son separados del mismo y eliminados.

La velocidad de ascensión de las partículas y por lo tanto la capacidad de remoción de las mismas por el fango depende:

- a) de las dimensiones de las partículas, siendo tanto mayor cuanto menor sea el diámetro de éstas.
- b) de la relación entre la densidad de las partículas y la densidad del fango.
- c) de la velocidad del fango dentro del pozo.
- d) de la viscosidad del fango.

La velocidad ascensional de los detritos está expresada por la ley de Stokes:

$$V_a : v = \frac{2 g r^2 (d_1 - d_2)}{g u}$$

en la cual,

v_a : velocidad ascensional de los detritos
en cm/ seg.

v : velocidad del fango en cm/ seg.

d_1 : densidad de los detritos

d_2 : densidad del fango

u : viscosidad del fluido en poises

g : aceleración de la gravedad en cm/ seg

2) En caso de suspensión del funcionamiento de las bombas por una causa cualquiera, debe ser capaz de mantener en suspensión los detritos, pues si éstos se acumulan inmediatamente sobre el fondo, pueden bloquear la batería, con lo cual impiden su extracción y ocasionan costosos trabajos de recuperación.

3) Debe funcionar como líquido enfriador y lubricante. Durante la perforación, parte de la energía se transforma en calor, en el escalpelo y en la batería cuando ésta roza contra las paredes. El fango debe absorber y disipar éste calor, y funcionar como lubricante disminuyendo el rozamiento.

4) Forma un revestimiento impermeable en las paredes del pozo. La presión de la columna hidrostática del fango, fuerza al agua a penetrar en los estratos, mientras la fase sólida penetra muy poco o queda en las

paredes formando el revestimiento que la impermeabiliza y cierra el paso a nuevas filtraciones.

Esto es especialmente importante en terrenos arcillosos en los cuales el agua, hinchándolos, disminuye el diámetro del pozo, pudiendo con ésto llegar a bloquear la batería.

5) Debe impedir la erupción de gases o vapores a alta presión, y de las faldas acuíferas. La presión de estas últimas en general es la presión equivalente a la columna hidrostática pero por cualquier razón puede alcanzar un valor mayor, debiéndose recurrir entonces a fangos de composición especial, por medio de baritina u otro material denso mantenido en suspensión en el mismo, equilibrando así la presión existente en el estrato.

Por cuanto un fango puede cumplir satisfactoriamente todas estas funciones, está sujeto frecuentemente a condiciones particulares que lo alteran (dilución o absorción de agua, efecto de las altas temperaturas, contaminaciones diversas) debiéndose por lo tanto estudiar los correctivos que se aplican en cada caso particular.

II

Propiedades del fango. Densidad. Es la propiedad que debe ser controlada con mayor frecuencia, generalmente cada tres horas.

La densidad puede ser expresada en libras por galón, kg. por dm^3 ; el API recomienda el uso de la ex-

presión siguiente: libras por plg. cuadrada por 100' de profundidad, la cual permite el cálculo inmediato de la presión en el fondo del pozo.

En general, se prefiere el uso de un fango ligero, pues los materiales usados para apesantar el fango son caros; por otra parte un fango denso exige un mayor esfuerzo a las bombas.

No obstante, un fango denso:

Ejerce una mayor presión sobre el fondo, impidiendo inesperadas erupciones de gases o líquidos a presión. Ejerce un mayor empuje sobre las astas, disminuyendo su paso aparente, con lo cual se facilita la maniobra de extracción.

Aumenta la velocidad de subida de los detritos, aproximándola a la velocidad de circulación.

Según Rettinger, la velocidad de subida de los detritos se obtiene aplicando la fórmula:

$$V_d : V_f - 7.1 \frac{d (P_1 - P_2)}{P_2}$$

V_d : velocidad ascensional de los detritos en cm/seg.

V_f : velocidad ascensional del fango en cm/seg.

P_1 : densidad de los detritos.

P_2 : densidad del fango

d : diámetro de los detritos en cm.

Si los detritos son de forma esférica. Si son de forma plana, el coeficiente 7.1 se sustituye por 5.2

Para medir la densidad del fango, existen dos métodos principales: el del hidrómetro y el de la ba-

lanza para fango.

El hidrómetro consiste en un flotador cilíndrico graduado que se introduce en un recipiente de plástico o metal.

Lleno de fango éste último, se introduce en el mismo un flotador, que penetra en el fango más o menos según la densidad de éste. La densidad se lee en una escala graduada grabada en el flotador.

El flotador es hueco, y su interior contiene pequeñas municiones de plomo que sirven para darle el peso adecuado. Para tararlo, se llena el recipiente de agua destilada a 20° C. El hidrómetro debe indicar una densidad de 1.00; para obtener esta lectura se extraen o introducen municiones en el interior del flotador.

La balanza para fango consiste en una balanza, la cual en uno de sus brazos tiene un recipiente destinado al fango, y en el otro un peso móvil que se mueve sobre una escala, en la cual están indicados los valores de la densidad.

Para llevar a cabo la prueba, se llena el recipiente de fango y se tapa con una tapadera especial, que automáticamente deja dentro del recipiente una cantidad exactamente medida de fango.

La densidad del fango se controla variando la proporción de sus componentes. La arcilla permite llevar la densidad hasta 1.17. Si una vez alcanzado este valor se quiere aumentar agregando más arcilla, el fango se vuelve excesivamente viscoso, y es necesario agre-

garle un agente químico llamado refinador, pudiéndose llegar así hasta un valor de 1.22.

Si por las condiciones particulares del pozo es necesario sobrepasar este valor, se le agregan minerales de alta densidad finamente pulverizados.

III

Viscosidad del fango. La viscosidad es la resistencia al flujo de un líquido. Entre los fluidos usados en la perforación, el agua ofrece la menor viscosidad. El agua y los aceites tienen una viscosidad variable con la temperatura, disminuyendo con el aumentar de esta.

Los fluidos de perforación a base arcillosa, a una misma temperatura, disminuyen de viscosidad al aumentar la velocidad de circulación debido a sus propiedades tixotrópicas.

La viscosidad del fango se mide, en el campo, por medio del embudo de Marsh. Este consiste, según las normas API, en un embudo de 12" de longitud, 6" de diámetro en la boca y 3/16" en el fondo, al cual está soldado un tubo de 2" de longitud y 3/16" de diámetro interno. A 3/4" del borde superior está soldada una malla metálica que cubre la mitad de la boca, y la cual indica un volumen de 1500 cc.

Para medir la viscosidad del fango, se llena el embudo con 1500 cc. de fango, filtrándolo a través de la malla y tapando el orificio de salida con un dedo.

Se descarga libremente el fango a través del orificio de salida recogiénolo en una probeta graduada hasta obtener un volúmen de 946 cc. y controlado con un cronómetro el tiempo necesario en segundos. Este viene llamado "viscosidad Marsh".

Con el viscosímetro Marsh no se pueden obtener datos precisos, dado que la velocidad de salida depende también de la temperatura y de la densidad del fango. Por esta razón en los laboratorios se prefiere usar el viscosímetro Stormer.

Este consiste, en líneas generales, en un rotor cilíndrico que puede ser introducido dentro de un recipiente que contiene el fango cuya viscosidad se determina.

El rotor puede ser hecho girar a diversas velocidades, por medio de pesos atados a una cuerdecilla y de una serie de engranajes. El número de vueltas del rotor viene indicado por un contador.

Para llevar a cabo la medida, se llena de fango el recipiente, después de pasar a aquél por una malla Nº 80; luego se ajusta la altura del recipiente de manera que el rotor se sumerja en el fango hasta una profundidad determinada.

En seguida, se deja libre el mecanismo y la acción de las pesas hace girar el rotor. El peso en gramos necesario para hacerlo girar a 600 rpm. se traslada a una tabla especial, la cual indicará la viscosidad en centipoises.

Tixotropía. Es la propiedad que presentan las sustancias coloidales en suspensión, de pasar del estado "sol" al estado "gel" (esto es, de coagularse) al estar en reposo, rompiéndose de nuevo este estado al entrar en movimiento.

Esta propiedad es muy importante porque, en el caso de que por una causa cualquiera (rotura de la batería, bloqueo de la misma, desperfectos en las bombas o falta de fuerza motriz) se suspenda la circulación, un fango tixotrópico se coagula, manteniendo los detritos en suspensión e impidiendo que se acumulen alrededor de las astas y sobre el escalpelo, lo cual impediría su extracción.

El elemento tixotrópico en el fango lo constituye la arcilla, y particularmente la bentonita, arcilla especial.

La tixotropía se mide de la misma manera que la viscosidad, solo que se mide después de haber dejado reposar el recipiente por cinco o diez minutos; su valor se expresa entonces, como "viscosidad Marsh después de n minutos" o en "centipoises después de n minutos".

En un fango de perforación, no es conveniente que la tixotropía sea muy alta, pues se vuelve difícil romper el estado del gel al reanudar la circulación después de haberla suspendido por cualquier causa. Así si la viscosidad Marsh de un fango es de 19 segundos, la viscosidad después de 5 minutos no deberá exeder

los 29 segundos.

IV

Características de filtración del fango. El comportamiento de los fangos con respecto a las paredes del pozo, depende de la capacidad de los mismos de formar revestimientos sutiles e impermeables.

Estas características vienen determinadas por medio de un aparato llamado filtro-prensa, y que funciona así: haciendo pasar el fango a través de un filtro dejará sobre este la parte sólida, y la parte líquida podrá ser recogida y medida en una probeta.

Un filtro-prensa consta de un cilindro de 3" de diámetro interno y 5" de altura. La parte superior se cubre por medio de una tapadera conectada a un cilindro de gas a presión; en el fondo lleva una malla metálica sobre la cual se coloca papel de filtro. Una vez lleno de fango, se coloca el conjunto en un marco metálico y se cierra a presión por medio de un tornillo. Se somete al fango a una presión de 100 psi. por 30 minutos. El agua que filtra se recoge en una probeta y su valor en c.c. se llamará "agua libre) del fango

Se abre el cilindro, y el espesor de la arcilla depositada sobre el papel de filtro se llama el "panel". No deberá exceder de 3mm., y el agua libre del 4%.

V

Por último, debe verificarse el contenido de arena del fango. La arena desgasta la bomba del fango y la batería de perforación, y tiende a depositarse en las paredes del pozo, engrosando el panel.

En el laboratorio y en el campo la manera más simple de medir el contenido de arena es por medio la probeta graduada. Esta es una probeta de vidrio, cuyo fondo, de forma cónica, está graduado en mm^3 permitiendo la lectura directa del volumen de sedimento.

Para llevar a cabo la medida, se introducen en la probeta 75 c.c. de fango, se diluye con 175 c.c. de agua y se agita el todo vigorosamente. Se deja reposar el líquido por cinco minutos y luego se mide el volumen de sedimento depositado.

VI

El pH. El pH es el índice de concentración iónica de una solución acuosa. El pH normal del fango a base de bentonita es ligeramente alcalino. La contaminación por diversas sales tiende a variar el pH, de la misma manera, algunas sustancias usadas en la corrección del fango tienen un pH elevado por lo cual la medida del pH del fango puede dar a conocer tanto el grado de contaminación como el de corrección del mismo.

Existen dos métodos para medir el pH: el método electrométrico y el método colorimétrico. Este último, por su sencillez, se usa de preferencia, pues los ins

trumentos usados en el método electrométrico son delicados y no siempre pueden ser confiados al personal de la sonda.

VII

La perforación en terrenos vaporíferos presenta grandes diferencias con la perforación en terrenos petrolíferos, tanto por el tipo de roca generalmente atravesada, como por los requisitos a llenar antes y después de la perforación; esto se aplica particularmente al fango.

En general, las perforaciones en busca de petróleo se hacen en terrenos sedimentarios y a temperaturas relativamente bajas. Durante la perforación deben tomarse medidas especiales para detectar los estratos productivos aunque estén a baja presión, y así mismo deben poderse controlar, dando al fango una densidad adecuada, los depósitos a alta presión.

Cuando se perforan en terrenos vaporíferos, generalmente se perforan estratos volcánicos, fracturados o muy permeables, en los cuales se presentan frecuentes pérdidas de la circulación. Puede observarse una perforación en la cual se atravesó una caverna. Fue necesario introducir más de 5000 m³ de fango, para llenarla y proseguir la perforación. (El fango costaba L.1600: \$ 6.40 al m³.)

Otro problema inherente a este tipo de perforación es el de las altas temperaturas, las cuales tienden

a coagular los coloides que forman el elemento principal del fango a su completa solidificación.

Un fluido de circulación magnífico para nuestro caso lo constituiría el aceite, por ser resistente a las altas temperaturas. Pero su elevado costo en nuestros países vuelve su uso prohibitivo.

El fango comunmente usado en la industria petrolera, el fango agua-bentonita, se revela absolutamente inadecuado en las perforaciones para el vapor. Un derivado, el fango arcilla-agua-bentonita, ofrece magníficos resultados. Está formado por la mezcla de los elementos mencionados en la proporción 1 m³ agua/ 200 kg. arcilla/ 100kg. bentonita. Este fango presenta, junto a las propiedades tixotrópicas de la bentonita, una resistencia moderada al calor que le confiere la arcilla.

En Larderello se usa casi exclusivamente este tipo de fango.

VIII

Corrección del fango.

1º) Corrección del fango de la contaminación por cemento. Cuando el fango bentonítico se contamina de cemento, su viscosidad aumenta notablemente, lo mismo que el agua libre, mientras que disminuye la propiedad de formar pared.

Este caso se presenta a menudo durante la perfo-

ración cuando, después de una cementación, se perfora el cemento que queda en el fondo del tubo de revestimiento, y puede ser atribuida a la acción del hidrato de calcio sobre los coloides arcillosos. Siendo altamente alcalino, eleva asimismo el valor del pH.

En consecuencia, la corrección de este fango debe tener las siguientes finalidades:

Remoción de todo el hidrato de calcio y su transformación en un precipitado insoluble; reducción del pH a su valor normal; recuperación de las propiedades coloidales del fango contaminado, y por medio del agregado de bentonita o arcilla, de llevar el fango a su condición inicial.

En general se acostumbra agregar al fango partes iguales de fosfato monosódico y fosfatos complejos, de preferencia hexametafosfato sódico.

El fosfato monosódico combina con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando hidrato sódico soluble y fosfato cálcico que es insoluble y precipita. El hidrato sódico luego reacciona con el hexametafosfato sódico formando fosfato bisódico.

Este mismo tratamiento lleva el pH a su valor normal, una vez que haya precipitado todo el hidróxido cálcico.

Este tratamiento tiende a disminuir la viscosidad, por lo cual se aconseja disminuir el fosfato complejo y agregar bentonita, con lo cual también disminuye el agua libre.

El agregado de bentonita puede requerir después el uso del pirofosfato ácido de sodio, con un pH de 4.8, el cual reduce la excesiva viscosidad y precipita el ión calcio.

El uso del pirofosfato ácido se recomienda particularmente cuando se perforan arcillas bentoníticas, pues éstas en un medio alcalino tienden a disolverse en el fango aumentando su viscosidad y densidad, y el pirofosfato, disminuyendo el pH del fango, disminuye la tendencia indicada.

2º) Corrección del fango contaminado por sales de calcio. Cuando se perforan estratos de yeso, anhídrita o rocas calcáreas, parte de los detritos se disuelve en el fango ocasionando su contaminación. Debe observarse que estos materiales se disuelven poquísimos en el fango, pero en proporción suficiente para cambiar sus propiedades, y en especial para coagular la arcilla coloidal. La alteración depende asimismo del tratamiento y preparación sufridos por el fango. En particular depende de si las sales solubles de calcio se agregan al fango antes o después de la hidratación de la bentonita. En el primer caso, la sodio-bentonita en presencia del ión calcio, se transforma en calciobentonita antes de hidratarse; la calcio-bentonita, siendo poco hidratable, disminuye la viscosidad.

En el segundo caso, estando ya hidratada la bentonita, las partículas de arcilla coloidal aumentan su atracción, ocasionando un aumento de la viscosidad.

En consecuencia, al perforar formaciones conteniendo sales de calcio, con un fango sin bentonita, al agregar ésta, baja inmediatamente la viscosidad, aumenta la capacidad de formar gel, pero disminuye su rigidez final, y aumenta enormemente el agua libre.

En el segundo caso, el efecto es el mismo, excepto que aumenta la viscosidad y la rigidez final de gel.

En uno u otro caso, el tratamiento químico debe tener como finalidad la eliminación del calcio soluble y su precipitación bajo forma insoluble.

Puede usarse la soda o el fosfato disódico. La primera tiene un pH de 11.0 y la segunda de 8.6. La soda se usa cuando se desea elevar el pH del fango y el fosfato cuando su valor es casi normal.

Uno y otro tratamiento aumentan la viscosidad del fango, siendo necesario agregar agentes fluidificantes, como el tannato sódico, ácido tánico o fosfatos complejos.

Si el agua libre es mucha, se disminuye agregando bentonita.

3º) Reducción de la viscosidad del fango. La reducción de la viscosidad del fango se efectúa en general por medio de agentes químicos que provocan una dispersión de las partículas arcillosas en el agua, lo cual a su vez acarrea la ventaja de disminuir el agua libre.

Para disminuir la viscosidad puede usarse el agua pero con el inconveniente de que disminuye la densidad y aumenta las pérdidas por filtración.

En general sólo se emplea en la parte inicial de la perforación de un pozo profundo, para no enriquecer el fango de sustancias químicas que dificulten un tratamiento ulterior.

Como agente defloculante podemos mencionar en primer lugar el tannato sódico, producido por la acción del ácido tánico sobre la soda cáustica.

El ácido tánico se halla en el comercio bajo el nombre de "quebracho", un subproducto de la industria del cuero. Se cree que la disminución de la viscosidad es debida a la formación de una especie de película protectora de la arcilla coloidal, que disminuye la fuerza de atracción entre las partículas. La soda así mismo permite una regulación del pH.

Al mismo efecto pueden usarse los fosfatos complejos: pirofosfatos, tetrafosfatos y metafosfatos. Estos presentan el inconveniente de hidratarse con el tiempo cesando su acción; en consecuencia es preciso repetir el tratamiento a intervalos regulares.

4º) Tratamiento del fango sujeto a las altas temperaturas. El fango sujeto a altas temperaturas (80º y más) experimenta notables cambios en sus propiedades. La bentonita se coagula aumentando la viscosidad del fango pero disminuyendo la rigidez del gel y aumenta el agua libre. El pH permanece igual.

Para corregirlo, se suele agregar quebracho lo cual disminuye la coagulación; habiendo disminuido la viscosidad, se procede a aumentarla por medio del

gel-o-gum, que reduce también el agua libre.

Estos compuestos pueden ser agregados hasta una cierta proporción, siendo luego necesario recurrir a los fosfatos, y finalmente a la sustitución del fango por nuevo fango.

Como se dijo antes, el fango a solo agua y bentonita no resiste las altas temperaturas, prefiriéndose el fango con una elevada proporción de arcilla y poca bentonita.

IX

Pérdidas de la circulación. Cuando la pérdida de fango dentro del pozo reviste proporciones notables, se dice que existe una pérdida de la circulación.

En un terreno normal, se verifica siempre una pérdida constante del fluido, debido al absorbimiento del mismo por los estratos del terreno no revestidos. Cuando el valor de la pérdida aumenta, es preciso remediarla.

En primer lugar, debemos considerar las pérdidas de fango causadas por la elevada presión de trabajo, siendo el fluido absorbido por los estratos permeables. Para remediarla, se acostumbra mezclar en el fango determinadas sustancias sólidas que, siendo retenidas contra las paredes del pozo, en breve tiempo obturan las vías microscópicas por donde penetra el fango. Entre estos agentes pueden mencionarse el afrecho, serrín, pulpa de madera, mica, hojuelas de celofán, etc.

Cuando por un conocimiento previo del terreno sea posible prever anticipadamente el atravesamiento de tales estratos, se pueden mezclar al fango las mencionadas sustancias aún antes de que ocurra la pérdida de circulación.

Siempre que sea posible, puede también recurrirse a la disminución de la densidad del fango y a la reducción de la velocidad de circulación. Esto tiene una doble finalidad: la disminución de las pérdidas debido a filtración por la reducción de la presión, y por el aumento de la viscosidad causado por la disminución de la velocidad del flujo.

Finalmente, puede ser empleado el método de las soluciones químicas, el cual consiste en bombear dentro del estrato absorbente dos sustancias químicas sucesivamente, las cuales, reaccionando entre sí, forman un precipitado dentro del terreno. Pueden ser usados con este propósito soluciones de silicato de sodio y luego de HCl con precipitación de sílice; soluciones de carbonato de sodio y luego de cloruro de calcio, con precipitación de carbonato cálcico; finalmente, soluciones de silicato de sodio que reaccionando con las sales de calcio y de magnesio contenidas en el terreno, forman silicatos insolubles de calcio y de magnesio.

Pérdidas de la circulación a baja presión. Ocurren en terrenos de una elevada permeabilidad. Pueden en principio ser remediadas de la misma manera que

las pérdidas a alta presión, pero muchas veces no bastan estos procedimientos debido a la gran porosidad del terreno; entonces se recurre a la inyección de malta de cemento, pura o mezclada con fibras vegetales.

Finalmente, en terrenos fracturados o erosionados por la circulación de las aguas subterráneas, pueden presentarse verdaderas cavernas, capaces de absorber grandes cantidades de fango sin llenarse. En este caso puede procederse a obstruirla llenando el fondo del pozo con arcilla que se deja caer desde la boca bajo la forma de bloque o de bolas, y que luego son apelmazadas con el escalpelo; en último caso se introducen dentro del pozo ramas y troncos de árboles.

Cuando se trata de una fractura productiva de vapor, no es posible emplear obturantes, recurriéndose en este caso a la perforación ciega (Blind drilling) que consiste en inyectar agua en vez de fango durante la perforación, arrastrando los detritos dentro de la fractura sin que salgan a la superficie.

El método puede representar un cierto peligro, pues en caso de una suspensión de la circulación, los detritos se acumulan inmediatamente en el fondo pudiendo bloquear la batería.

X

De todo lo visto anteriormente se desprende la necesidad de ejercer un control estricto del fango. To-

do el personal de la sonda debe ser capaz de llevar a cabo las diversas operaciones para el control del fango, y debe conocer las características normales y anormales del mismo, y sus correcciones, de manera que pueda, en ausencia del ingeniero, realizar una corrección de urgencia.

Periódicamente (cada dos o tres horas) se controlan las siguientes propiedades del fango: densidad, viscosidad, tixotropía, agua libre y panel, contenido de arena, temperatura a la entrada y a la salida del pozo y pérdidas por absorción.

Es recomendable el uso del informe diario del fango, similar al modelo que sigue:

INFORME DIARIO DEL FANGO

PERFORACION N° _____ ZONA _____ FECHA _____

FORMACION GEOLOGICA EN PERFORACION

AL INICIO _____

AL FIN _____

/ HORA									
CARACTERISTICAS									
DENSIDAD del fango a la entrada									
DENSIDAD del fango a la salida									
VISCOSIDAD Marsh en segundos									
id. después de 10'									
AGUA LIBRE en cc. después de 15'									
id. desp. de 30'									
PANEL en mm.									
ARENA gr/ lt.									
pH									
TEMP. en °C.									
ABSORBIMIENTO lt/h.									
AVANCE en cm.									
PRESION DE LA BOMBA en k/c ²									
NIVEL TANQUE cms.									
AGREGADOS Agua Arcilla Bentonita Quebracho Soda Tripolifosfato Varios									
OBSERVACIONES									
TRATAMIENTO									

Este módulo se llena por triplicado; una copia queda en el campo y las otras dos pasan a la oficina, una para los archivos y la otra al ingeniero encargado de la sonda, el cual anota sobre la misma las observaciones necesarias.

CAPITULO QUINTO - INSTRUMENTOS REGISTRADORES.

I

El presente capítulo será dedicado a los diversos instrumentos indicadores de la sonda Rotary.

II

El drillómetro o indicador de peso. Sirve para indicar la parte del peso de la batería soportada por el escalpelo, y en consecuencia, para calcular la presión que se ejerce sobre el fondo, teniendo en cuenta que parte del peso de la batería viene equilibrado por el empuje del fango, tanto mayor cuanto mayor es su densidad. En los instrumentos mas completos, el drillómetro indica también el peso que grava sobre el escalpelo.

El drillómetro consta de dos partes principales. La primera consiste en una caja metálica plana, llena de aceite y que en una de sus caras tiene ^{un} diafragma.

Aplicada al cable del aparejo, éste presiona contra el diafragma, con una presión proporcional a la tensión que aquél sufre, y dicha presión se trasmite al indicador por medio del aceite. La segunda parte es tá constituida por el indicador, el cual es en esencia un manómetro de precision, que indica las variaciones

de presión del aceite.

Como se ha dicho, al peso indicado por el drillómetro, debe agregarse el peso contrarrestado por el empuje hidrostático, en la siguiente proporción:

PESO ESP. DEL FANGO	PESO DE AGREGAR A LA LECTURA
1.00	14.5%
1.08	16.0
1.20	18.2
1.32	20.3
1.44	22.7
1.56	25.0
1.68	27.4
1.80	30.0
1.92	32.6
2.04	35.5
2.16	38.3
2.28	41.2
2.40	44.5

El drillómetro incluye muchas veces un registrador del peso, el cual consiste en una plumilla cuyos desplazamientos son proporcionales al peso indicado por el drillómetro, y la cual corre sobre un disco accionado por un mecanismo de reloj. Sus indicaciones son muy útiles al ingeniero para poder observar el rendimiento de la sonda y el trabajo del perforador, sin que sea necesaria su presencia constante en la sonda.

Deben mencionarse los comunes manómetros que indican la presión de inyección del fango y la presión de las bombas de lubricación cuando existen.

IV

El tacómetro indica el número de revoluciones por minuto del plano rotatorio. Su utilidad ha aumentado en estos últimos tiempos, siendo necesario su uso cuando se perfora con los nuevos escalpelos o con el aire comprimido, con bajas presiones sobre el escalpelo y alta velocidad de rotación, la cual puede llegar a 500 rpm.

V

Registrador del tiempo de perforación (Geolograph) Por su importancia es el segundo de los instrumentos registradores. Sirve para reconocer o comprobar la identificación de los estratos identificados por medio del examen de las muestras o del muestreo eléctrico. En la perforación Rotary, los cambios en la velocidad de penetración se deben en general a cambios en la litología o en la textura de la formación que se perfora. Los factores mecánicos: carga sobre el escalpelo, volumen en la circulación, estado del escalpelo, influyen en la velocidad de perforación pero no pueden causar los cambios bruscos que algunas veces se registran.

Las indicaciones pueden ser obtenidas de una manera

aproximada sobre el asta cuadrada y midiendo el tiempo necesario para perforar cada intervalo. No obstante, es mucho mejor el uso de los indicadores mecánicos que indican la velocidad de perforación y el tiempo necesario para las maniobras y demás operaciones efectuadas.

El "Geolograph" es accionado por medio de un cable unido a la cabeza de inyección del fango. Incluye un mecanismo de relojería que acciona a cuerda, hace mover una cinta, de papel con velocidad regular. Sobre esta cinta, dividida en horas y minutos, se apoya una pluma a esfera que traza sobre el papel una línea continua.

Cada vez que la cabeza de inyección y en consecuencia la batería de perforación se desplaza 25 cm. y 1 mt. la pluma se desplaza hacia la izquierda. Las maniobras de la batería vienen indicadas por medio de una segunda pluma, la cual se desplaza a la derecha siempre que la batería se apoya sobre el fondo.

El Geolograph incluye un indicador que señala siempre la profundidad del pozo, accionado automáticamente por el mismo mecanismo.

VI

Los instrumentos mencionados constituyen el equipo standard de la sonda Rotary. Existen otros instrumentos auxiliares que faciliten el control de la sonda. Tales son: el indicador automático del nivel del tanque del fango, el de la densidad del mismo, el medidor del pH del fango, y los diversos indicadores de temperatura.

CAPITULO SEXTO. LA TECNICA DE LA PERFORACION.

I

El primer paso en la realización de un sondeo consiste en la sección del lugar. Como en todo trabajo de ingeniería, en dicha selección influyen factores de orden técnico, práctico y económico, cada uno de los cuales juega un importante papel.

Cuando se trate de hacer un primer sondeo EN una zona inexplorada, no existen razones de peso para hacerlo en un preciso lugar. En éste caso, se puede escoger el lugar de más elevada termalidad, suponiendo que el calor salga a la superficie en forma vertical. Si existe un levantamiento geológico minucioso del lugar, puede escogerse como lugar más adecuado, alguna de las fallas del terreno, que dé origen a manifestaciones fumarólicas, o cuya presencia haya sido revelada por la geofísica.

En caso de trabajar en una zona ampliamente conocida, como Larderello, el caso es distinto, pues ya se conocen las líneas de fratura por las cuales circula el vapor, y en este caso el problema de la selección

del sitio se reduce a determinar la conveniencia económica de perforar en esa zona, comparando el costo de la perforación y el transporte del vapor, con el valor de la energía adicional que se espera producir, teniendo en cuenta, como se dijo en el punto V del capítulo II, que la apertura de un nuevo pozo en una región ya explorada integralmente, puede disminuir el rendimiento total, al ocasionar una disminución de la presión de trabajo de las turbinas, que en consecuencia quedan trabajando fuera de sus características.

Una manera de determinar la conveniencia o inconveniencia de perforar en una fractura en la cual ya se han realizado diversas perforaciones, consiste en valerse de las características de cada pozo para determinar la curva característica de la falla para diversos valores de la presión. Esta curva suele asumir una forma hiperbólica. Conocidas las características del fluido (entalpía y entropía) puede ser determinada la presión más conveniente de trabajo. Conocida ésta, se perforará en las zonas de mayor presión solamente, y no se tocarán las de igual o menor presión que la calculada, bajo el riesgo de romper el equilibrio termodinámico turbinas-fractura.

Debido a estas condiciones es que no se aconseja construir grandes centrales tipo Lardarello, las cuales vuelven difícil el trabajo de la perforación y no permiten el aprovechamiento total de la energía del campo.

Una vez escogido el campo de la perforación, es necesario asegurarse la provisión de agua, pues en ciertos momentos pueden necesitarse grandes cantidades de la misma, sobre todo al tener pérdidas de la circulación y durante la cementación.

La accesibilidad al lugar es también muy importante. Se debe construir un camino transitable en todo tiempo, invierno y verano y por el cual puedan pasar camiones de 10 toneladas.

Otro dato importante es en conocimiento de la naturaleza del terreno que se va a construir, para la selección del tipo de escalpelo que se deberá usar más durante la perforación. Un escalpelo puede perforar de 1 a 80 metros según la dureza de la roca, y para evitar la suspensión del trabajo, debe preverse la cantidad de escalpelos que se usarán.

Así mismo deben tenerse todas las piezas de recambio necesarias, y el material de consumo: bentonita, escalpelos, camisas y empaques para la bomba de fangos, grasa y aceite, piezas de recambio para los motores, manómetros, correctivos químicos para el fango, etc. De la misma manera, debe reunirse con anticipación todo el material que se usará dentro del pozo: tuberías de revestimiento, cemento y válvulas de seguridad y de compuerta comunes, etc.

Estas cosas revisten gran importancia en países como el nuestro, completamente aislados de los países productores de petróleo y no industriales, como en el caso

de El Salvador. De no tomar todas las precauciones, se corre el riesgo de que por un pequeño desperfecto se pierdan semanas y aún meses de trabajo.

II

La primera fase del montaje de la torre es la construcción de las fundaciones de la torre. Las casas constructoras de torres suministran los diagramas de construcción y demás datos necesarios.

Una vez completada la construcción de la fundación se procede al montaje de la torre, comenzando por la subestructura y el piso de trabajo, el cual se halla generalmente a 4 ó 6 metros de altura sobre el suelo.

La operación de montaje de la torre se facilita mucho si se usa el mástil como el indicado en la fig. 4. Por la polea pasa un cable que por un extremo va enrollado a un cabrestante accionado a motor y a cuyo otro extremo se ata la pieza que se desea alzar.

Existen diversos tipos de torres muy fáciles de montar; entre estas está la torre que se monta horizontalmente y luego se alza por medio del mismo tambor de maniobras.

Las torres portátiles ahorran el tiempo de montaje y desmontaje de la torre pero, pesando junto con el camión transportador varias toneladas, requieren amplias carreteras y su transporte no siempre resulta fácil. Existen, de la misma manera, camiones que transportan equipos completos de perforación, pero su movimiento

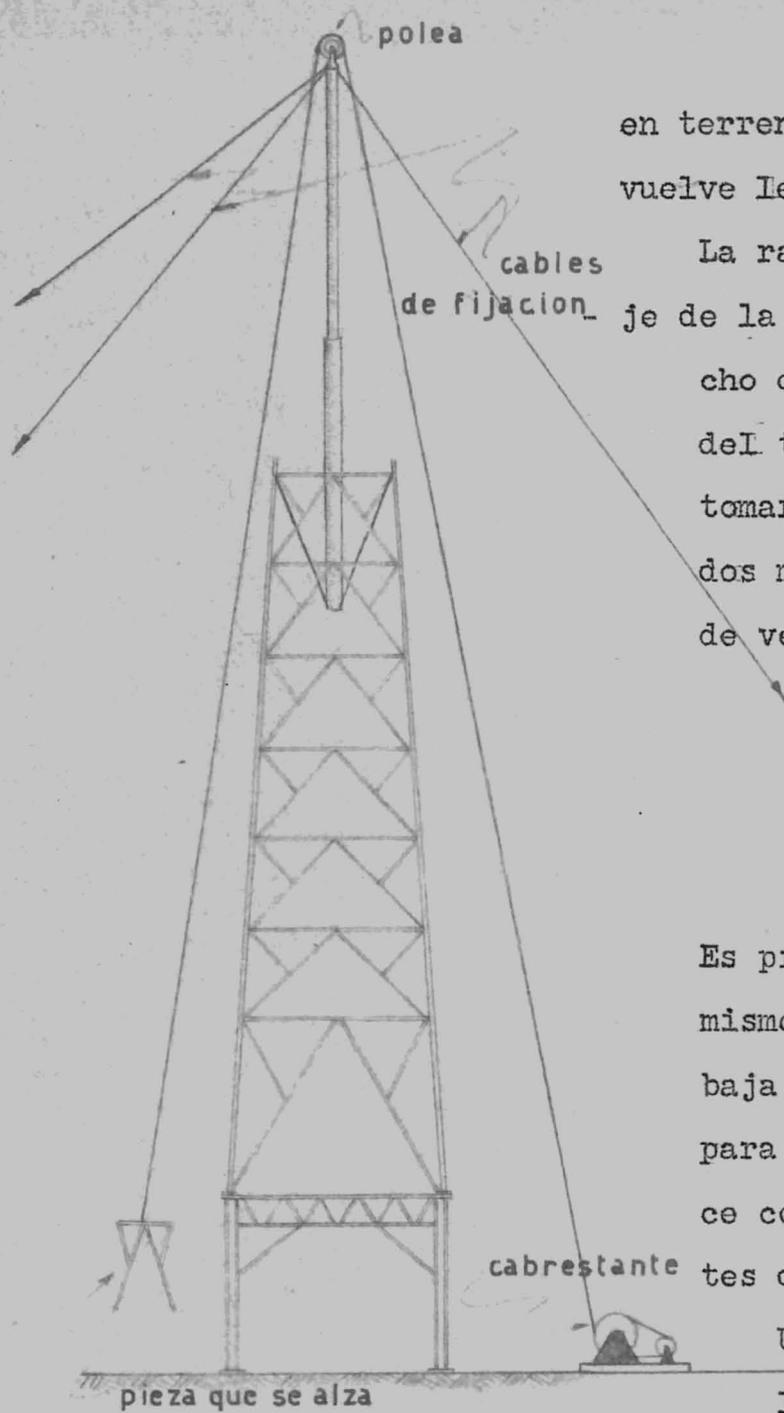


fig 4. Uso del mastil en el montaje de la torre de la sonda.

en terreno montañoso se vuelve lento y difícil. La rapidez del montaje de la torre depende mucho de la organización del trabajo, pudiendo tomar de un máximo de dos meses a un mínimo de veinte días.

Es preferible que el mismo personal que trabaja monte la sonda para que se familiarice con las diversas partes de la misma.

Una vez montada la torre se procede a montar el tambor de maniobras, el aparejo y

Los motores.

De esta manera, puede ya utilizarse el equipo para mover el resto de las cosas. Se instala una malla vibra-

toria, los tanques de sedimentación, las bombas de fango. Estas van generalmente encerradas en una caseta de madera y lámina en la cual se conservan los instrumentos de control del fango, las piezas de recambio de la misma bomba y los interruptores de electricidad.

Una vez terminado el montaje se prueban las diversas partes y puede procederse a la perforación.

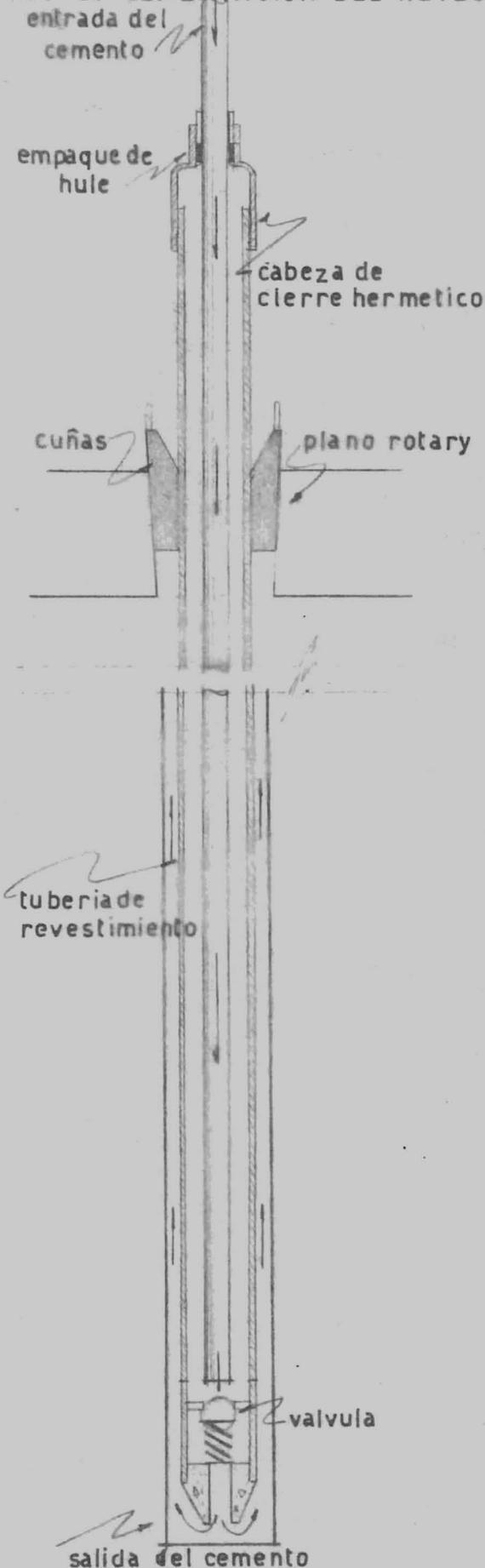
III

En primer lugar se perfora un pozo de unos 4 mts. de prof. y 1 metro de lado, de forma cuadrada, en seguida, con un escalpelo generalmente de 24" de diámetro, se perfora hasta unos 20 metros de profundidad. Este pozo se reviste inmediatamente con tubo de acero de 20" de diámetro, el cual se cementa introduciendo cemento líquido en el espacio que queda entre el tubo y la pared del pozo. Para este trabajo se usa generalmente cemento de fraguado rápido.

Después de 24 horas puede reanudarse la perforación. La parte inferior del pozo se ha llenado de cemento que es necesario perforar. Se recomienda hacerlo circulando agua en vez de fango a fin de no contaminar éste.

La segunda tubería se coloca a unos 80 metros de profundidad. Esta es una simple estimación; la profundidad en cada caso se determina según el espesor de la capa vegetal y de los estratos más o menos alterados. Para un sondeo de 500 a 1000 metros es suficiente revestir el pozo hasta aquí con tubería de ϕ 16". Con el progre-

FIG 5. CEMENTACION DEL REVESTIMIENTO



so de la técnica de perforación, se ha abandonado la antigua costumbre de cambiar el diámetro de la tubería cada vez que haya una pérdida de la circulación o un incidente cualquiera.

Para cementar la segunda tubería, se usa el sistema de la Fig.5.

La tubería de revestimiento tendrá una válvula construida en plástico y cemento, la cual permite la salida del fango y del cemento pero no su entrada. Una vez colocada y fijada por medio de cuñas al plano rotatorio, se bajan las astas de perforación. Previamente, en la parte superior de la tubería, se ha atornillado un cabezal que cierra herméticamente

camente el espacio comprendido entre las astas y la tubería.

Para preparar el cemento se usan mezcladores a chorro, capaces de mezclar 1 m^3 por minuto o más.

La presión de la bomba de fangos obliga al cemento a descender dentro de las astas y luego a llenar el espacio comprendido entre la tubería y el terreno. Cuando el cemento ha llenado todo este espacio y comienza a salir, se suspende el bombeo de cemento y se bombea fango, calculando que desaloje el cemento que esté aún dentro de las astas. En seguida se extraen éstas y se deja reposar al pozo el tiempo necesario para que fragüe el cemento empleado, el cual se recomienda que sea del tipo rápido. En seguida se perfora el tapón de cemento, se desecha el fango contaminado, que se sustituye con fango nuevo; se lavan cuidadosamente las astas, la bomba del fango y la tubería que haya entrado en contacto con el cemento.

IV

La tercera etapa del sondeo comienza entonces, y por la profundidad a alcanzar, es la más delicada.

Cuando se perfora en busca de vapor deben tenerse en cuenta varios factores:

1º) Que debe alcanzarse el estrato productiva con un diámetro suficientemente grande para evitar grandes pérdidas de presión del vapor. Es recomendable el uso de la última tubería de un diámetro no inferior a 8".

2º) Que en muchos casos, existe una profundidad económica para el sondeo. Cuando éste llega a tener 1000 o más, deberá obtenerse del mismo un elevado rendimiento y no estar sujeto a las incrustaciones para que resulte económico. Un sondeo puede costar hasta \$ 500 el metro, y en Lardorello para mantener en funcionamiento las centrales, existen más de un centenar de perforaciones.

3º) Que debe ser evitada en manera absoluta el contacto entre las diversas faldas termales y frías del subsuelo.

4º) Que deben tomarse muestras cada vez que haya un cambio de terreno. El vapor suele hallarse en las zonas de contacto entre las diversas formaciones o en los estratos permables o fracturados. La existencia de este terreno en zonas de manifestaciones fumarólicas puede ser un indicio real de la presencia de vapor en gran cantidad, aun si no se halla en ese lugar.

IV

La naturaleza del terreno puede ser conocida por medio del análisis de los detritos con el auxilio de los registros del Geolograph.

Las variaciones en la velocidad de perforación denotan un cambio en la litología. Cuando se conoce la estratigrafía de un lugar, se puede determinar la potencia de los estratos de ese lugar.

El rumor de la batería al perforar sirve al operador

experimentado para conocer otros factores: regularidad del terreno, existencia de fracturas y de oquedades, y aún la inclinación de los estratos.

El dato más seguro lo suministra el análisis de los detritos de perforación. Estos permiten conocer la naturaleza del terreno; no obstante no permiten conocer la disposición de los diversos estratos.

En general se acostumbra tomar una muestra de los detritos cada 50 cms. y luego mezclar 4 muestras para obtener una muestra representativa de 2 mts. perforados. Cuando es posible se aconseja usar un aparato automático para recoger las muestras. Luego la muestra se lava y se pone a secar al sol. El color de la roca se aprecia mejor cuando está mojada. Luego se mide la densidad, dureza y se puede hacer análisis de porosidad.

Usando una baja velocidad de rotación del escalpelo se puede obtener detritos relativamente grandes.

Al indicar la profundidad real a la cual corresponden los diversos detritos, debe tenerse en cuenta el tiempo que emplean en subir del fondo a la superficie.

V

Cuando se desea conocer exactamente la naturaleza del terreno, se recurre al uso del escalpelo para muestras. Estos pueden ser de dos tipos: El escalpelo a ruedas o conos dentados, y la corona de diamantes.

El primer tipo es similar al escalpelo a conos normalmente usado en la perforación, de forma anular, de-

jando al perforar una muestra cilíndrica, la cual penetra en un asta especial a la cual está atornillado el escalpelo. Este tiene además una serie de dientes que al llevarse a cabo la extracción retienen la muestra.

Cuando se perfora con este tipo de escalpelo se disminuye la velocidad de circulación del fango; es conveniente no dar al escalpelo presión mayor de 1 - 2 tons. a fin de no romper los pines que sostienen los conos, que a causa de sus reducidas dimensiones son muy delicados.

Con este tipo de escalpelo pueden tomarse muestras hasta de 4 mts. de longitud a una velocidad regular. Al perforar un terreno desconocido es preciso tomar muestras cada vez que cambia la velocidad de perforación y en consecuencia que se sospeche un cambio en la litología del terreno.

La corona de diamantes consiste en un anillo de metal duro en el cual estan aplicados pequeños diamantes industriales. Su costo es elevado, pero su duración es prácticamente ilimitada.

Con la corona de diamantes se usa poca presión y alta velocidad. Su uso no se aconseja en terrenos fracturados, pues el impacto puede ocasionar la pérdida de los diamantes.

VI

Cuando se trabaja con el escalpelo de 12" se usan astas de ϕ 6" y cuando el escalpelo tiene 8" se usan astas

de $\phi 4\frac{1}{2}$ ". Debido a su menor diámetro, éstas están sujetas a frecuentes roturas, debido a descuidos del operador, que en un cierto instante puede dejar que las astas trabajen a compresión. La fatiga del material deja minúsculas grietas, que el fango las agranda y las oculta. En general, el punto de rotura está entre el tubo y el mango de la rosca debido a la concentración de esfuerzos en ese punto. La rotura se siente inmediatamente por la mayor velocidad que alcanza la máquina.

Cuando ocurre un incidente de esta clase, es necesario proceder a la recuperación de la parte que quede dentro del pozo; de lo contrario, después de algunas horas, la cantidad de detritos puede bloquear la batería.

Cuando el fango tiene la viscosidad y tixotropía necesarias, los detritos pueden permanecer largo tiempo en suspensión; de aquí la necesidad de mantenerlo siempre en buenas condiciones.

Para la recuperación de la batería se emplea el macho fileteado o la campana. Cuando se emplea el macho, se suele emplear además una campana para centrar el asta

El macho se aconseja cuando se trata de recuperar las astas pesadas, las cuales tienen la superficie exterior endurecida por cementación y su interior blando. Una vez bajado el macho o la campana se hace entrar levemente en contacto con el asta rota y luego se hace girar, primero a mano y luego con algunas vueltas de la máquina; de esta manera el utensilio hace su propia rosca en el asta. Luego se dan algunos pequeños tirones para cer-

ciorarse de que la rosca ha agarrado bien, y se comienza a tirar lentamente la batería.

Si la operación de recuperación se hace inmediatamente, todo se resuelve en un momento. Cuando por la falta de instrumentos de recuperación o por falta de fuerza motriz se retarda la operación y se acumulan los detritos, no se puede alzar la batería y posiblemente quedarán después bloqueadas. En este caso, si se poseen, se recurre a las astas de rosca izquierda (las astas normales tienen rosca derecha); es necesario extraerlas por secciones o una a una. Si, como en nuestro caso, interviene el calor, el fango con los detritos se cuece y se convierte en una materia sólida como ladrillo cocido. En este caso es necesario limpiar el espacio entre cada asta y la pared del pozo, por medio de un tubo largo dentado, y extraer las astas una a una por medio de las astas de rosca izquierda.

Cuando es una llave o un fragmento metálico que ha caído dentro del pozo, puede usarse una especie de draga o lo que es mejor, un electroimán.

Para reducir al mínimo la rotura de las astas, es conveniente examinarlas de cuando en cuando, y medir el espesor de las paredes, que la acción abrasiva del fango tiende a disminuir.

VII

A medida que se perfora se agregan nuevas astas a la batería. Cada vez que se agrega un asta se anota su lon

gitud en una hoja, en la cual está escrito el número de las astas, y en orden de introducción, la longitud de cada una, el número de uniones especiales y de reducciones empleado y el tipo de escalpelo que se usa. De esta manera, al ocurrir un incidente puede conocerse la longitud de la batería que ha quedado dentro del pozo y el diámetro de la parte a pescar.

Sobre el plano de trabajo se coloca un bloque de madera de unos 4" de espesor, sobre el cual se colocan las astas a medida que se extraen. El asta cuadrada se coloca en un tubo introducido parcialmente en la tierra.

Las astas se introducen una a una durante la perforación pero durante la maniobra se extraen en pasos de dos o tres. Por esto es conveniente intercalar cada dos o tres astas las llamadas juntas especiales, que enroscan o desenroscan con una sola vuelta de la batería y que absorben el desgaste a que está sujeta la misma.

VIII

Del informe diario de trabajo el jefe perforador anota los metros perforados en su turno, el terreno encontrado, las anomalías observadas, la temperatura del fango a la entrada y la salida y luego la temperatura diferencial. Estos datos expresan las propiedades del pozo; recomiendo colocarlos sobre un papel milimetrado, en la forma indicada en la figura 7.

IX

En general el aumento de la temperatura diferencial

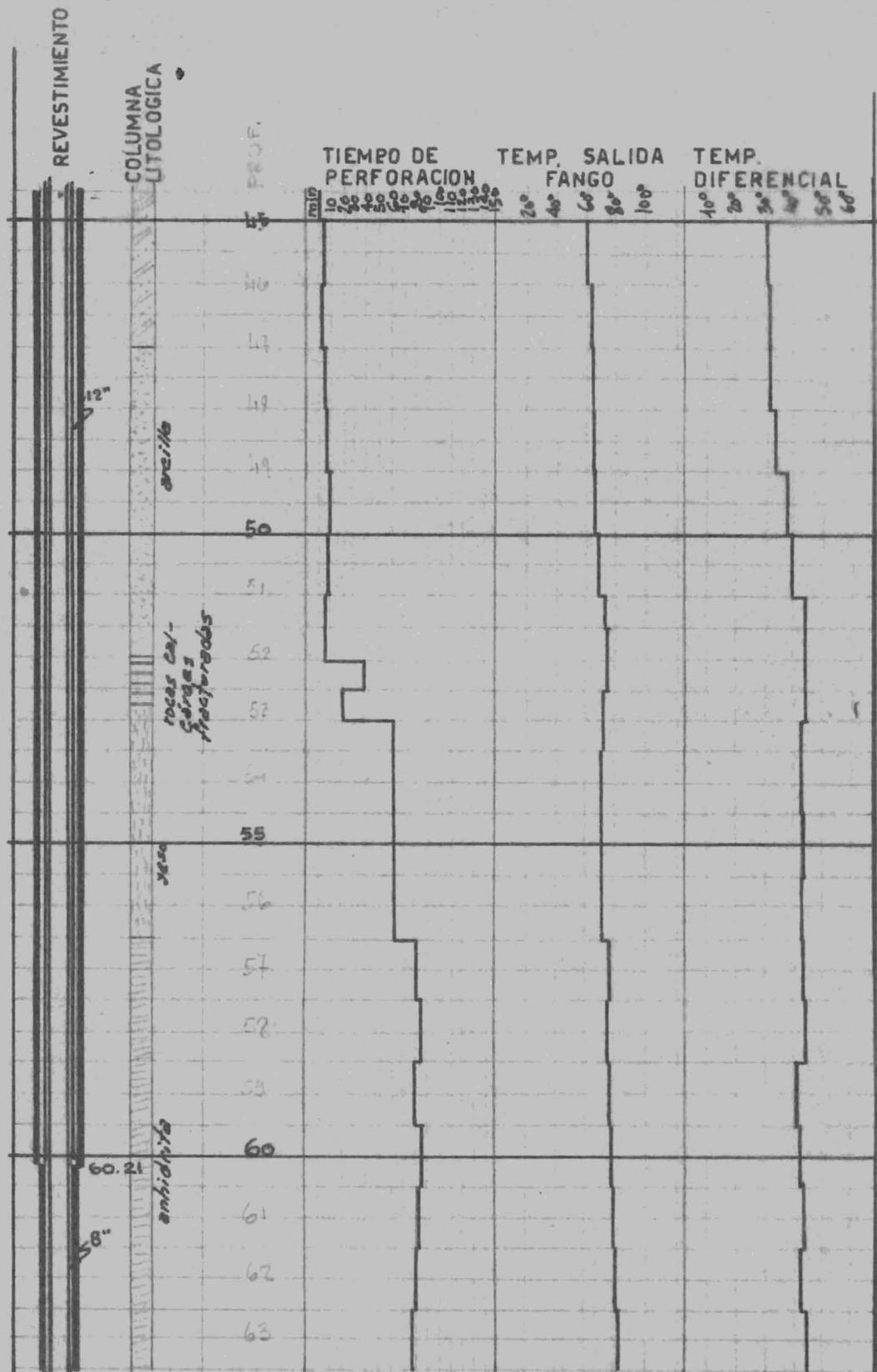


FIG. 7. RECORD DEL SONDEO

denota el aproximarse de una falda de vapor o agua caliente. Cuando estamos cerca de la falda, se aconseja revestir el pozo para evitar que la potencia del vapor cause derrumbes que cierren la via de salida del vapor.

La tubería de revestimiento es uno de los factores que mas influyen en el costo del sondeo. Evita los derrumbamientos dentro del pozo y evita el contacto de la diversas faldas acuíferas entre sí.

Existen dos tipos de tuberías de revestimiento: de rosca y soldadas. Las primeras presentan la ventaja de no requerir ningun equipo adicional, sino solamente las llaves para hacerla girar. La tubería soldada ofrece en cambio una impermeabilidad completa y una resistencia mayor^{ya} que, al revestir el pozo con una tubería muy larga, se corre el peligro de que se rompan los filetes de la rosca, sobre todo si como es común el pozo no es perfectamente vertical sino que sigue una trayectoria espiral.

Cuando se rompe la tubería de revestimiento, el fragmento que se rompe es difícil de recuperar y se vuelve necesario introducir una tubería de diámetro menor o una tubería telescópica. Esto reduce el diámetro de la perforación, con el consiguiente peligro de que se llegue al estrato productivo con un diámetro excesivamente reducido.

Antes de proceder a revestir el pozo, es necesario circular el fango por algun tiempo y despues posiblemente circular agua. En seguida se usan los repasadores pa-

ra limpiar las paredes del fango acumulado allí durante la perforación, y el cual impide que el cemento adhiera bien, y que además puede permitir el paso de sustancias líquidas de uno a otro estrato. Para acelerar la acción de limpieza pueden usarse dos en serie. Luego se introduce la tubería. Esta operación no siempre resulta fácil y en caso que resulte difícil hacer bajar la tubería, es necesario repasar nuevamente la paredes.

La cementación de una tubería de revestimiento de 500 mts. de largo o más puede hacerse básicamente de la misma manera que la cementación descrita anteriormente, pero es recomendable el uso de los tapones.

En la cementación a dos tapones, la cabeza hermética que contiene dos tapones, cada uno de los cuales puede ser soltado en un momento dado, y empujado por el fluido que circula hasta llegar al fondo del pozo, separándose herméticamente el líquido que está sobre él, con el que está debajo.

Al iniciar la cementación y una vez mezclados el agua y el cemento, se suelta el tapón inferior y se comienza a bombear el cemento, el cual empuja al tapón hacia abajo y desaloja completamente el fango de dentro la tubería. El tapón tiene un agujero de unas 3" de diámetro, cubierto con una membrana de cuero. De esta manera, una vez que el tapón ha llegado al fondo del pozo y se apoya contra la válvula de la zapata, sufre toda la presión de la bomba de fangos y la membrana se rompe, permitiendo la salida del cemento que llena el espacio

que hay entre la pared del pozo y la tubería de revestimiento.

Para calcular la cantidad de cemento que se utiliza, hay que calcular el espacio que queda entre la tubería y la pared del pozo y al volumen que resulte se le agrega un porcentaje debido a las irregularidades y oquedades que queden.

La presión indicada por el manómetro de la bomba del fango sirve para indicar el estado de la cementación. Para explicarlo mejor haré un ejemplo práctico.

Se trata de cementar un pozo perforado de 500 mts. de profundidad, con escarpelo de 12" y en el cual se introduce la tubería de revestimiento de 8" diámetro interno y 8½" diámetro externo. La densidad del fango es de 1.16 y la del cemento de 1.70 . Dada la naturaleza del terreno calcularemos un 33% de exeso. Calcular el número de quintales de cemento a usar, la presión inicial y final de la bomba, si la presión normal de circulación es de 30 atmósferas.

Diam. int. de la tubería: 8" : 20.32 cm.

Area " " " " : $0.785 \times 20.20 \times 20.32$: 324 c²

Diam. ext. de la tubería: 8½" : 21.59 cm.

Area " " " " : : 366 c²

Diam. del pozo : 30.5 cm.

Area " " : 838 c²

Volúmen del espacio a cementar: $\frac{838 - 366}{10.000} \cdot 500$: 23.6m³

Volumen de la tubería: $\frac{324 \times 500}{10.000}$: 16.2 m³

Presión inicial: 30 atm. : 31 k/c^2

Presión cuando el cemento ha llenado la tubería: es igual a la diferencia entre la presión ejercida por la columna de cemento que llena la tubería y la columna de fango que llena el espacio entre la tubería y la pared del pozo.

o sea: $(1.70 - 1.16) \quad : \quad - 27 \text{ k/c}^2$

En el instante en que se ha detenido el flujo de cemento y se comienza a romper el tapón de madera.

A este punto el cemento empieza a fluir por su propio peso dentro del espacio a cementar.

Volumen total de la mezcla de cemento y agua a usar: .

$23.6 \times 1.33 : 30.8 \text{ m}^3$

El segundo tapón se suelta cuando quede por rellenar un volumen igual al volumen de la tubería; de esta manera, el cemento que está dentro de ella, llena completamente el espacio que se cementa y el fango se limita a quedar dentro de la tubería.

Volumen de la tubería: 16.2 m^3

Con este volumen se cementa una columna de altura x

x: $\quad : \quad 256 \text{ mts.}$

Presión de la bomba en este instante:

$(1.70 - 1.16) 2560/100 : - 13.8 \text{ k/c}^2$

A esto se agrega la presión de trabajo de las bombas la cual en el caso del fango es de 30 atm. pero que cuando se bombea cemento será de : $30 \times 1.70/1.16 : 44 \text{ atm.}$

o sea 45.5 k/c^2

Presión en este instante: $-13.8 + 45.5 : 31.7 \text{ k/c}^2$

Presión final: $1.70 \times \frac{5000}{100} + 31 \times \frac{1.70}{1.16} : 130 \text{ K/c}^2$.

Para reiniciar la perforación es necesario romper el tapón de cemento que queda en el fondo. Este tapón generalmente contamina el fango por lo cual es aconsejable usar el mismo fango con que se ha estado perforando y luego desecharlo y sustituirlo por el fango de los tanques de reserva, libre de contaminación.

Cada vez que se coloca una tubería de revestimiento es necesario colocar en su extremo superior una válvula de seguridad que permita cerrar el pozo aún cuando estén dentro las astas de perforación. De esta manera, en caso de que se verifique una erupción inesperada del vapor, se puede controlar inmediatamente. El conjunto de los dispositivos puede verse en la fig. 8. Comprende una válvula de compuerta de servicio pesado y una válvula de seguridad colocados en el tubo vertical, una té especial en cuyas dos ramas horizontales van colocadas otras dos válvulas de alta presión. Al verificarse la erupción del vapor se abren estas últimas para que salga. El rumor de la salida del vapor en pozos de gran rendimiento se oye hasta varios Kms. de distancia.

Al obtenerse una pérdida de la circulación y un aumento de la termalidad, es muy probable que nos hallemos en presencia de vapor. Esto no puede hacer erupción espontáneamente si su tensión es menor que la presión de la columna de fango que grava sobre él, por lo cual se requiere que ésta entre en ebullición, lo cual puede requerir varios días.

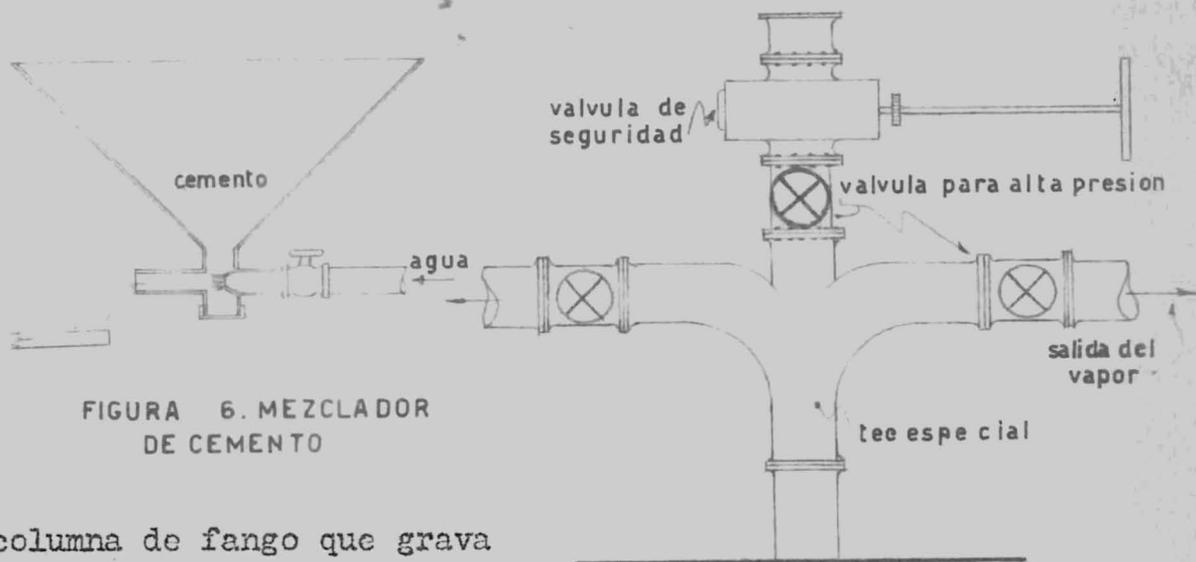


FIGURA 6. MEZCLADOR DE CEMENTO

FIGURA 8. SISTEMA DE VALVULAS EN LA BOCA DEL POZO

la columna de fango que grava sobre él, por lo cual se requiere que ésta entre en ebullición, lo cual puede requerir varios días.

Cuando no obstante el tiempo, el vapor no hace erupción espontáneamente, es necesario extraer parte del agua y fango para disminuir la presión. Esto se hace por medio de un émbolo de hule que ajusta perfectamente con las paredes de la tubería. Se determina el nivel del pozo y luego se extraen, por medio del émbolo, de 50 a 100 mts. de columna de agua. Esta operación se hace varias veces hasta que se produzca la erupción del vapor.

La operación se realiza generalmente en los pozos que contienen vapor a baja presión o baja temperatura.

XI

La continuación de la perforación se vuelve mas difícil al tropezar con un manto o falda de agua caliente

o vapor. Esto por dos cosas: primero, porque el fango de perforación puede obstruir las vías de salida del vapor y segundo porque las altas temperaturas tienden a dañar el fango, que se vuelve difícil de mantener en buen estado; tercero porque debido a la existencia de fracturas y oquedades existen pérdidas de la circulación.

Todo esto se obvia perforando con agua y dejando que ésta desaparezca en las fracturas sin volver a salir a la superficie. En este caso conviene perforar con regular presión en el escarpelo y baja velocidad para reducir los detritos a polvo fino, fácilmente transportado por el agua.

Cuando se halla un estrato que produce poco vapor, conviene continuar perforando para ver si se halla uno más productivo. Si con un mismo pozo se hallan dos estratos productivos, a diferente presión y se desea utilizar ambos, pueden colocarse dos tuberías concéntricas cada una de las cuales transporta una clase de vapor. En este caso a la salida se colocan dos tuberías para conducir cada vapor a su turbina correspondiente.

XII

Para realizar medidas de temperatura dentro del pozo es necesario aguardar 24 horas después de suspender la circulación del fango, a fin de que aquella se estabilice. Puede usarse al efecto un termómetro introducido dentro de un cilindro de plomo, para bajar el cual

se usa un cable de acero. Existe en el mercado un aparato que acciona el cable de acero por medio de un motor de gasolina y el cual a su vez registra la cantidad de cable que está dentro del pozo. De esta manera se facilita mucho la introducción de los termómetros u otros objetos dentro del pozo.

La SCLUMBERGER, compañía francesa de Geofísica, realiza todas las clases de medidas en pozos: termometrías, resistividad, potencial espontáneo, diámetro del pozo, inclinación, radio-actividad, todas las cuales son muy importantes.

Probablemente la Termometría es la medida más importante que se lleva a cabo en un sondeo.

CAPITULO SEPTIMO.- PUNTOS VARIOS.

I

En los capítulos 1 y 2 se trató de explicar el origen de los fluidos hidrotermales de acuerdo con los fenómenos geológicos que los causaban. En el presente capítulo trataré de relacionarlo con algunos fenómenos termodinámicos.

La actividad hidrotermal puede ser dividida en actividad primaria y secundaria. Cuando el fluido es de origen magmático, se considera que hay actividad hidrotermal primaria. Cuando el fluido, sea de origen terrestre o marino, absorbe calor de cualquier fuente, directa o indirectamente, se llama actividad hidrotermal secundaria. Estos casos ya fueron descritos en los primeros capítulos.

II

Actividad hidrotermal primaria. Cuando hay actividad primaria, el vapor segregado del magma en fase de enfriamiento, asciende a través de las fracturas del terreno hacia los estratos superiores o hasta la superficie. En su camino se expande disminuyendo su temperatura y pierde calor. En la superficie se puede mani

festar aún como vapor sobrecalentado si inicialmente tenía un buen grado de sobrecalentamiento, y si las pérdidas de calor y el agua subterránea encontrada es poca. A medida que las pérdidas aumentan, el grado de sobrecalentamiento disminuye hasta llegar al punto del vapor saturado seco, y luego, pasando a través de los estados intermedios, al de vapor saturado húmedo y a la completa condensación, dando lugar a manifestaciones de la misma manera que la actividad hidrotermal secundaria.

Aunque el vapor tenga su origen en el magma mismo, las teorías sobre la formación de los yacimientos de origen magmático nos inducen a buscarlo a una discreta distancia. En efecto, como ya se dijo, cuando el agua se halla a la temperatura supercrítica, la tensión del vapor es proporcional a su temperatura. Esto tiene por consecuencia que cuando el magma se halla en las primeras fases de enfriamiento, el vapor se halla a una presión tal, que lo hace escapar hacia la superficie siguiendo las líneas de menor resistencia.

Cuando la intrusión magmática se halla cubierta por un estrato impermeable no fracturado, el vapor, al buscar una línea de salida, puede aún desplazarse sobre el plano horizontal para luego manifestarse a alguna distancia del foco.

Aún no se han podido establecer las relaciones temperatura- presión para los fluidos magmáticos. Esto se debe a que los gases y sustancias disueltas en el fluido alteran el calor específico del mismo en una

magnitud desconocida. De una manera general puede decirse que los gases en disolución, para una misma temperatura, aumentan la presión total del fluido.

Esto es aplicable cuando se trata con temperaturas bajo la temperatura crítica. En este caso el cálculo se simplifica.

De acuerdo con la ley de las fases la presión total será igual a la suma de las presiones parciales del vapor y del gas (tratamos con vapor sobrecalentado). En consecuencia, si conocemos la relación gas- vapor de una mezcla cualquiera, para calcular su presión se calcula la presión para cada uno de los componentes por separado, en la concentración a que se halla en la mezcla. Luego se suman, con lo que se obtiene la presión total.

III

Presión que ejerce el terreno sobre el fluido. De acuerdo con la mecánica de suelos, la presión en un punto situado en el interior de la Tierra es igual a la presión causada a esa profundidad por un fluido de densidad igual a la de la roca que está sobre el punto considerado.

Esta relación es válida solamente para grandes profundidades, a las cuales la roca tiende a comportarse como una materia plástica. A medida que nos acercamos a la superficie, la roca comienza a comportarse como un material rígido, y la presión que ejercerá será menor que la indicada por la relación anterior.

En consecuencia: cuando un fluido de procedencia magmática se halla en la profundidad, necesita adquirir una presión superior a la presión que sobre él ejerce la roca; esta condición se produce solamente a las temperaturas supercríticas a que se halla el magma en estado de enfriamiento. Si se abriese una vía de salida al fluido en estas condiciones, saldría al exterior con una presión de fondo igual a la presión que ejerce el terreno sobre él.

Al ascender el magma de esta zona de comportamiento plástico hasta un estrato superior, el fluido no soportará ya la presión de la roca sino parte de ella o ninguna presión. En este caso, su presión ya no será la presión del terreno, sino la presión que de acuerdo con su temperatura le corresponde.

En casos como el de Larderello, en que el vapor presumiblemente primario al ascender de los estratos inferiores se acumula en un estrato permeable, esto es particularmente válido. Debe tenerse en cuenta que el concepto de permeabilidad lleva envuelto el de rigidez de la roca.

Al realizar una perforación en esta zona, el vapor sobrecalentado hará erupción espontáneamente, siempre que logre superar la presión de la columna de agua o fango que se halla en el pozo; si no lo hace en el momento, puede hacerlo al entrar en ebullición dicha columna, o al ser extraída por medio del pistón de hule, de acuerdo con lo descrito en el capítulo sexto.

IV

Actividad hidrotermal secundaria. Comprende todos los demás casos en que el vapor obtenido no sea de origen magmático. Gran número de manifestaciones recaen en esta categoría, y aún no se puede afirmar que todas las manifestaciones que se conocen no pertenecen a esta categoría.

Comúnmente el fluido que se obtiene, es vapor de agua, que varía desde el vapor saturado seco hasta el vapor saturado húmedo, y agua caliente. Excepcionalmente puede obtenerse vapor sobrecalentado, si la termalidad de la roca es tal de sobrecalentar el vapor saturado; esta condición, sin embargo, es difícil de producir debido a la baja conductividad térmica de la roca y al aumento de la circulación subterránea de los fluidos más fríos.

El rendimiento de un fluido de esta naturaleza es bajo; mientras que el vapor sobrecalentado puede ser pasado directamente a la turbina, en el caso del vapor secundario saturado, es necesario primero separar la fase líquida antes de pasar el vapor a las turbinas, o en caso contrario, utilizar un fluido intermedio, que circule a presión reducida, de manera que se vaporice totalmente a la temperatura del fluido. En países ricos de combustibles puede pensarse a un ulterior sobrecalentamiento antes de conducir el vapor a las turbinas.

Por estas consideraciones, no es necesario recalcar la superioridad del vapor de agua sobrecalentado sobre el vapor saturado, ni la conveniencia de proseguir

las investigaciones hasta dar por terminada la búsqueda del vapor primario.

Debemos observar asimismo que un vapor primario puede condensarse y dar origen a manifestaciones de carácter secundario; de la misma manera, como ya se dijo, puede un vapor secundario sobrecalentarse al pasar por estratos de elevada termalidad y dar origen a manifestaciones similares a las que da un vapor primario.

V

Para facilitar el estudio del comportamiento del magma a diversas profundidades y en diversas condiciones, J. HEALY ha preparado un diagrama que reproduzco en la siguiente página. Puede ser de utilidad durante la perforación para estudiar el equilibrio presión del vapor en el subsuelo- presión de la columna líquida de agua o fango sobre el fondo del pozo, a manera de prever posibles erupciones del vapor. De la misma manera pueden servir para explicar el mecanismo de los fenómenos hidrotermales.

Sobre la abcisa del diagrama están colocados los valores de la temperatura de ebullición del agua. Sobre la ordenada están indicados los valores de la profundidad en metros.

La curva N° 1 indica el punto de ebullición del agua cuando se halla sometida a una presión igual a la que ejerce sobre ella una columna de agua a 15° C. y de una altura que está indicada por la ordenada en ese punto.

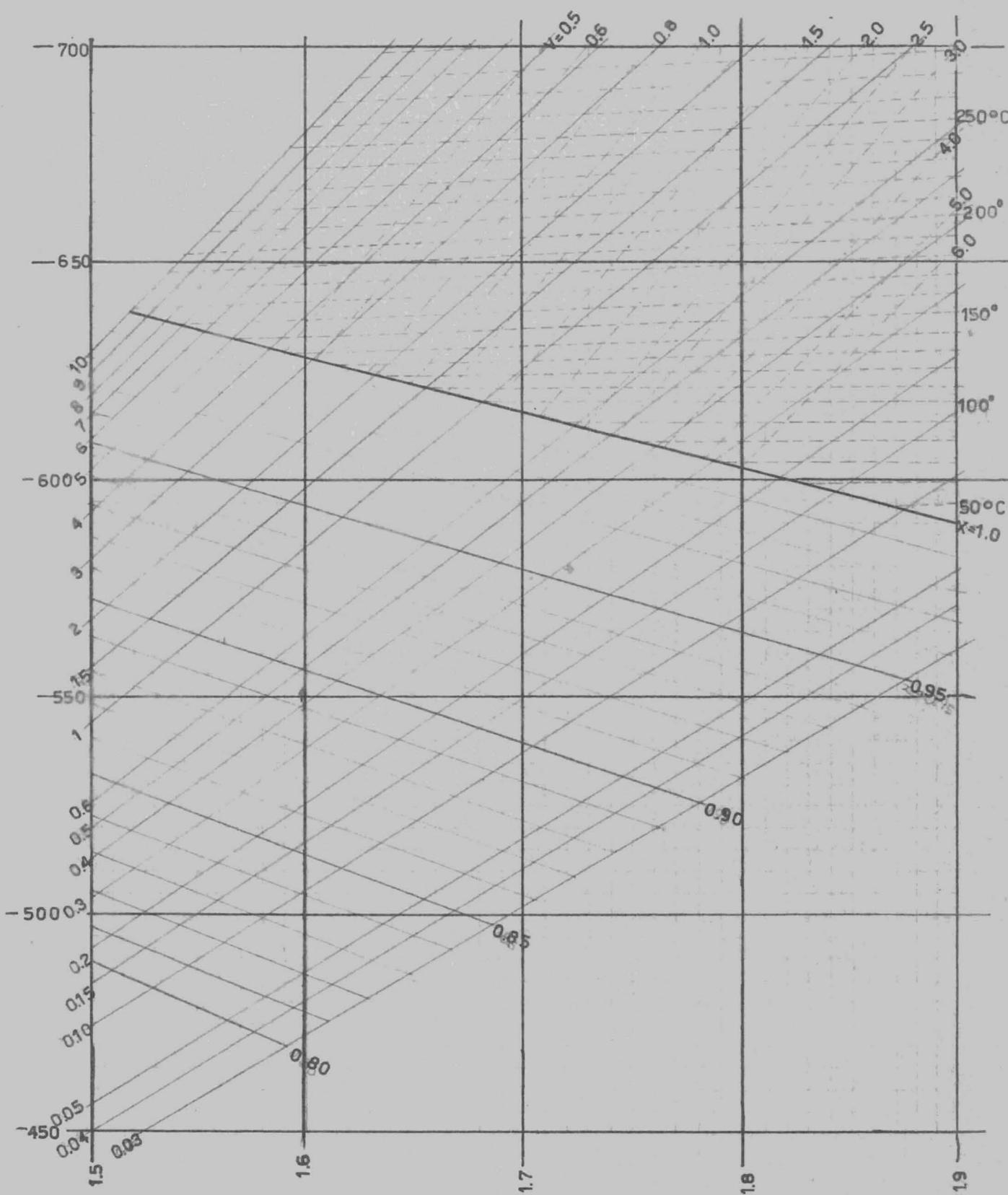
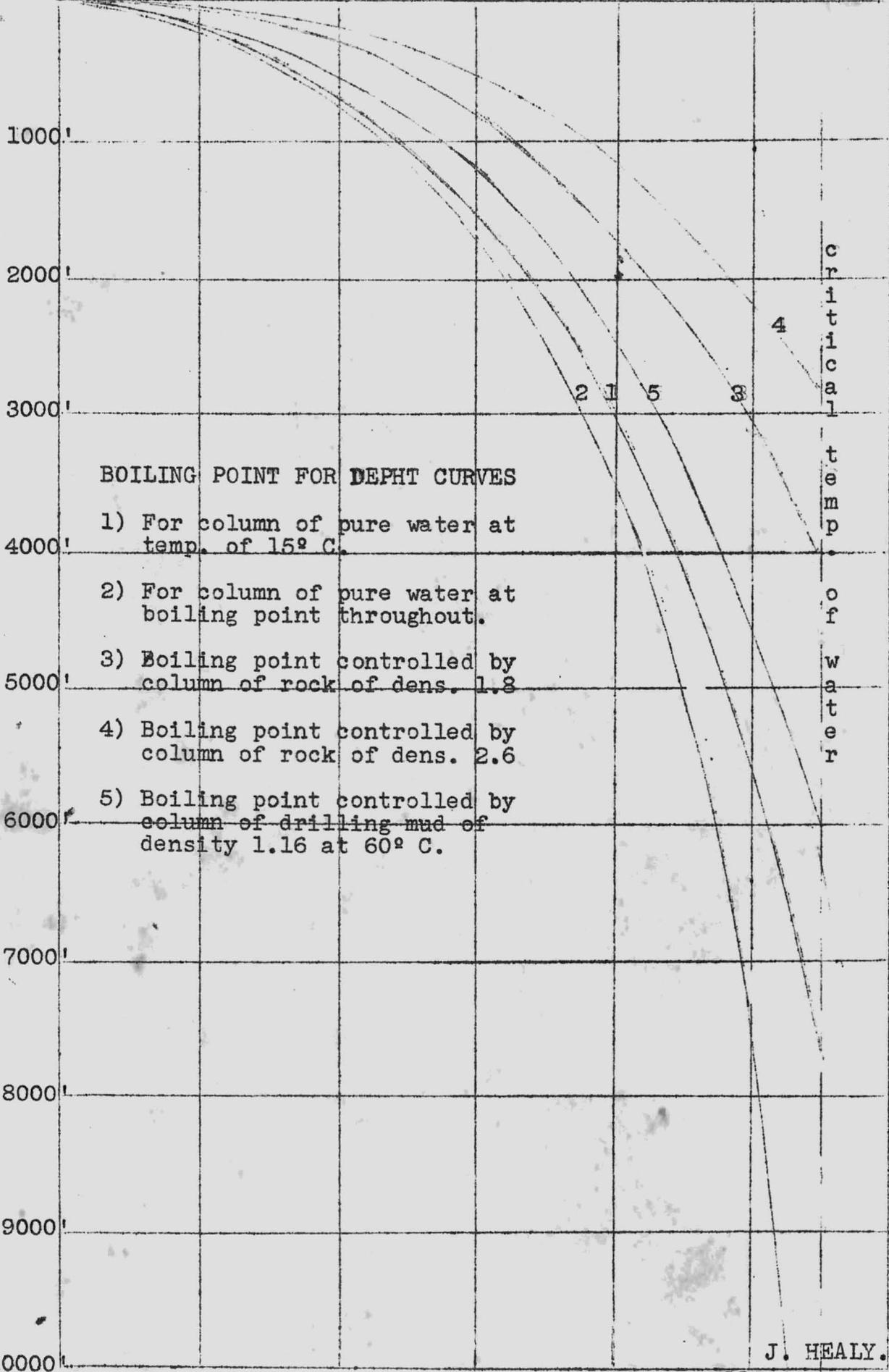


DIAGRAMA DE MOLIERÉ 96 % H₂O + 4 % CO₂

100°C. 150 200 250 300 350 400



La curva N° 2 es similar a la anterior, solamente que está calculada para una columna de agua que se halle a una temperatura de ebullición a través de toda su longitud.

La curva N° 3 indica el punto de ebullición del agua, correspondiente a la presión que ejerce sobre ella una columna de roca de densidad 1.8, de n metros de altura.

La curva N° 4 es igual a la N° 3, solamente que para una roca de densidad 2.6

Dichas curvas fueron calculadas solamente hasta la temperatura crítica por carecerse de datos para las temperaturas superiores.

En el caso de los fluidos endógenos, de origen magmático, hay dos factores cuya influencia no se ha tenido en cuenta:

El efecto de los gases, ya discutido en el punto II de éste capítulo.

El efecto de las altas temperaturas, comunes en estas zonas, sobre la plasticidad de las rocas; probablemente la presión de las rocas cuando se hallan a alta temperatura son mayores que en el caso de rocas a temperaturas normales.

Para calcular el efecto de la composición del fluido, es necesario calcular la proporción de sus componentes. En seguida se calcula la presión ejercida por cada uno de éstos, por medio de la ley de Charles, la cual se expresa así:

En la cual: P es la presión absoluta del gas.

V es el volumen del peso N.

R es una constante que depende de la naturaleza del gas y del sistema de unidades empleado.

M es el peso del volumen dado de gas.

T es la temperatura absoluta del gas.

Sumando las presiones parciales se obtiene la presión total de la mezcla gas- vapor. La curva que indique la presión para cada temperatura se alejará de la curva correspondiente al agua pura, tanto más cuanto mayor es la relación gas- vapor.

Por medio de la curva 1 podemos saber si un pozo lleno de agua entrará en erupción espontáneamente. Esto puede aplicarse al caso en que la temperatura de los estratos superiores es baja y en consecuencia la columna de agua permanecerá fría. Por medio de la curva 2 puede hacerse el mismo cálculo cuando el pozo ha sido perforado en una zona de elevada termalidad capaz de mantener elevada la temperatura del agua que llene el pozo.

Las curvas 3 y 4 nos indican cuál será la presión que podemos esperar al realizar una perforación a elevada profundidad, cuando debido a ésto, la presión del fluido será la presión ejercida sobre él por las rocas circundantes.

Las presiones en algunas unidades tectónicas pueden en algunos casos ser superiores a las hidrostáticas; esto puede suceder, por ejemplo cuando una masa se halla comprimida lateralmente y sus deformaciones son

contenidas verticalmente por una potente serie de estratos rígidos.

VI

En el diagrama construido por Mr. Healy, he incluido una nueva curva, y es la que indica el punto de ebullición del agua, correspondiente a la presión ejercida por un fango de perforación de densidad 1.16 y 60° C. de temperatura.

En vez de considerar el punto de ebullición del agua pura, he tomado el de una mezcla de 96% H₂O y 4% CO₂. Los puntos de ebullición los he tomado del diagrama de Moliere para esta mezcla.

En seguida he calculado el peso de la columna líquida que equilibre la presión del fluido para cada temperatura, considerando que el fango tendrá una densidad de $1.16 \times 0.974 = 1.13$ (0.974 es la densidad del agua a 60° C.) Calculando la altura de la columna de fango para varias temperaturas, he podido trazar la curva 5. Esta curva indicará, conocidas la temperatura de una falda hidrotermal, con un contenido de 4% CO₂, si ésta entrará o no en erupción durante la perforación.

VII

Disminución de producción en los pozos. Las medidas hechas en Italia han demostrado que el decremento en la producción en los pozos (para su caso) puede ser dividido en dos partes: la primera de tendencia constan

te, y la segunda de tendencia fuertemente asintótica.

La primera puede ser interpretada como una disminución del nivel freático del agua, sea una disminución del nivel local, cuando se trate con rocas de pequeña permeabilidad, o con una disminución del nivel de toda la falda cuando se trate con rocas de permeabilidad en grande.

La segunda puede ser interpretada solamente como un efecto de las incrustaciones. Estas son debidas principalmente a los carbonatos de calcio, aunque contribuyen otras sustancias incrustantes. Sobre la velocidad de incrustación influye grandemente el régimen de descarga del pozo. En algunos casos puede obstruirse el pozo en pocas semanas, como ha sucedido en la región napolitana. Esto tiene una influencia decisiva bajo el punto de vista de la utilización; pero no la tiene menor bajo el punto de vista investigativo ya que impide el estudio de las características del fluido a través del tiempo, y por otra parte impide el ver si con la descarga continua se puede obtener un mejoramiento de la calidad del fluido, o si eliminando el agua freática puede obtenerse el vapor primario directamente.

VIII

Influencia recíproca de los pozos. Debe ser estudiada, tanto en pozos ubicados sobre una misma falda, como en pozos ubicados en faldas distintas. Varía según la permeabilidad del terreno. Aún no existe un

estudio adecuado del fenómeno. En el caso de pozos perforados en faldas freáticas a temperatura ordinaria, hay interacción cuando la distancia entre ellos es menor que el doble de la carga hidrostática de los pozos.

Basándose en esto puede tratarse de resolver el problema de las incrustaciones perforando pozos gemelos que funcionen alternativamente, de manera que el flujo hacia un pozo contribuya a desincrustar el otro.

CONCLUSION

I

La existencia de manifestaciones de los tipos descritos anteriormente, sugiere la posibilidad de su explotación intensiva con fines industriales.

La experiencia hecha por Italia, ha puesto en evidencia la imposibilidad de establecer un criterio definido de trabajo. En nuestro país y en cualquier otro lugar es necesario iniciar la investigación partiendo de las manifestaciones superficiales.

Los ausoles más importantes de El Salvador, son los siguientes (Dr. H. MEYER ABICH):

Depto. de Ahuachapán: Ausoles del Playón de Ahuachapán, Agua huca, El Sauce, San José, San Carlos, Cerro Blanco, La Labor, el Playón de Salitro, Cuyanausul, Amaya.

Departamento de Usulután: Ausol El Tronador, Ausol del Volcancito, Ausoles de la laguna de Alegría.

Depto. de San Vicente: Los Infiernillos.

Departamento de San Miguel: Los Infiernillos de Chinameca, fumarolas "Los Perolitos", el Borbollón.

Para un detalle y descripción más completa, puede consultarse la publicación del Dr. MEYER-ABICH en la re-

vista Comunicaciones del Instituto Tropical de Investigaciones Científicas, del mes de Mayo de 1953.

De todas estas manifestaciones se han considerado como más prometedoras las de Ahuachapán, tanto por la cantidad de calor irradiado, como por la extensión de la zona que permite un mayor número de sondeos. A medida que la investigación progresa, puede formarse un nuevo criterio de trabajo.

El primer paso a realizar será el levantamiento de un plano topográfico (La dirección de Cartografía ha publicado las hojas de dicho mapa para nuestro país, en escala 1: 50,000 teniendo los originales en escala 1: 20,000) y del mapa geológico del lugar, en una escala que permita apreciar los diversos detalles.

En seguida es preciso establecer las condiciones de equilibrio termodinámico de la zona y la cantidad de calor irradiado. Algunos sostienen que la cantidad de calor irradiado representa la cantidad mínima de calor que puede ser obtenida por medio de sondeos. No creo que ésto sea exacto en un 100% de los casos, ya que, parte del calor irradiado podría provenir directamente del calor del subsuelo y no ser utilizable. Por otra parte, si existen estratos impermeables entre la fuente de calor y la superficie, a ésta saldrá solamente parte de la misma, como sucedía en Larderello.

En Italia se han mostrado como favorables a la existencia del vapor, las fracturas de los substratos y entre éstas, las fracturas recientes que no están en

compresión. Dichas fracturas pueden ser localizadas por la Geología o la geofísica. Entre los métodos geofísicos se ha demostrado como más eficiente el método eléctrico cuando se trata de terrenos muy fracturados y dislocados por los movimientos tectónicos.

Los primeros sondeos podrán ser ubicados en el centro de las manifestaciones, o sobre una falla en la cual se alineen éstas. Según los resultados obtenidos, las siguientes perforaciones pueden ser hechas a alguna distancia de la primera.

El problema puede ser dividido en dos partes: la búsqueda del vapor secundario, y la búsqueda del vapor primario, donde existan indicios de su existencia.

El vapor secundario existe a poca profundidad generalmente, y siempre a una profundidad menor de aquella a la cual se iguala la presión de la roca a la máxima carga hidrostática. Esto indica que los primeros sondeos podrán ser llevados a una relativamente baja profundidad.

Si se halla el vapor, deberán realizarse varias medidas dentro del pozo: presión en el fondo, presión en la boca; relación presión- descarga; temperatura máxima relación agua- vapor y relación gas- vapor; contenido de sales disueltas en el agua. Todas éstas medidas deberán ser realizadas durante un largo tiempo, para estudiar los posibles decrementos en la descarga, y los cambios físico- químicos del fluido.

Una vez localizado el vapor secundario, los esfuer-

zos deben ser encaminados a hallar el vapor primario, mientras no se demuestre su inexistencia, o lo antieconómico de su explotación. El vapor primario, al ser sobrecalentado, es de más fácil utilización y de mayor rendimiento por unidad de peso que el vapor saturado o las aguas calientes.

En consecuencia, la segunda etapa de nuestra investigación será la realización de sondeos a gran profundidad.

En todo el curso de mi trabajo no he mencionado el factor económico, el cual por sí solo debe ser objeto de un detenido estudio, sea por lo concerniente a la adquisición de equipo, como por la posible celebración de contratos con empresas extranjeras para llevar a cabo parte o todo el trabajo. Por otra parte, nuestra investigación debe ser considerada siempre bajo el punto de vista minero, en el cual el factor aleatorio es mayor que en los trabajos comunes de ingeniería.

Para la utilización del vapor, puede consultarse la obra de A. MAZZONI: "I soffioni Boraciferi della Toscana e gli stabilimenti della "Larderello"; publicado por la misma Sociedad "Larderello".

FIN.

BIBLIOGRAFIA.

- ALLEN E.T.- Chemical aspects of Volcanism with a collection of the analysis of volcanic gases (from the Geophysical Laboratory Carnegie Institution of Washington) 1922.
- CAIOLI A. La tecnica delle perforazioni.- Milano.
- CASO E.- Le ricerche del vapor endogeno e la "Lardere-
llo".- Ingegneria Ferroviaria n.2, Feb. 1953.
- CLARKE F.- The data of Geochemistry.- U.S. Geological
Survey.- Washington, 1916.
- COLCRADO SCHOOL OF MINES, the.- Subsurface Geological
Methods.-Denver, 1945.
- COLORADO SCHOOL OF MINES, the.- Drilling Mud Control.
- CONTINI R.- Problemi della perforazione in presenza di
elevata temperatura.- Atti VII Conv. Naz. del Metano
e del Petrolio, 1952.
- DALY R.A.- Igneous Rocks and the Depths of the Earth.-
New York y Londres, 1933.
- FALINI F.- Sui criteri di ricerca per energia geotermi-
ca.-Roma, 1947.
- FOA E.- Fondamenti di Termodinamica.- Bologna 1951
- FROLICH K.,TAUCH E.J.,HOGAN J.J. y PEER A.A..- Solubili-
ty of gases in liquide at high pressure.- Ind.a engin.
chemistry; 23 n°5, 1931.
- GERBELLA S.- Arte Mineraria.- Milano, 1942.
- GENNAI N.- Le risorse geotermiche della Toscana e la
loro applicazione.- Conf. al A.E.I., sez. di Roma;
24 Enero de 1942.
- GINORI CONTI.- Ricerche per l'ottenimento dell'elio e
per l'utilizzazione integrale dei gas di Larderello.
- GINORI CONTI.- Lo sfruttamento dei soffioni boraciferi
XXVIII riun. Societa Ital. Progresso Scienze.- Pisa,
1939.
- HAGER D.- Practical oil Field Geology.- New York, 1926.
- HEALY J. y FOSTER R.W.- Utilization of natural thermal
resources at Retorua.- N° 5, Auckland Industrial De-
velopment Laboratories.- Dep. of Scientific and In-
dustrial Research.- New Zealand, Junio 1947.
- HOLMES A.- Origin and physical Constitution of the
earth.- London and New York, 1913.
- KUHN W. y RITTMANN.- Sulla Costituzione dell'interno
della Terra e la sua formazione de uno strato primiti-
vo omogeneo.- Geol. Rundschau XXXII, 1941.
- LENZI D.- Analisi del vapore dei soffioni boraciferi.-

- Boll. Soc. Geol. Ital. XLVII, Roma 1929.
- MAZZONI A.- I soffioni boraciferi della Toscana e gli impianti della Larderello.- Firenze, 1951.
- MEYER-ABICH H.- Los Ausoles de El Salvador, con un sumario geológico- tectónico de la zona volcánica occidental.- Comunicaciones del Instituto Tropical de Investigaciones Científicas.- San Salvador, Mayo 1953.
- NIGGLI P.- Erzlagerstätten magmatische Aktivität und Grosstektonik.- Halle.
- NIGGLI P.- Das Magma und seine Produkte.- Leipzig, 1937.
- PENTA F.- Lezioni di Geologia Applicata.- Roma, 1948.
- PENTA F.- Ricerche e studi sui fenomeni esalativo- idro termali e il problema delle forze Endogene.- Roma, 1954.
- PENTA F.- Sulle possibilità offerte dal territorio della Repubblica di El Salvador nell'America Centrale nel campo delle "Forze Endogene".
- PENTA F.- Studi e ricerche nei Campi Flegrei e Isole Flegrei condotte allo scopo di utilizzare le energie del sottosuolo.- Ind. Minerarie, 1941, V.
- PRINCIPI P.- Trattato di Geologia Applicata.- Milano, 1946.
- RIES H.- Economic Geology.- New York, 1937.
- SBORGI U.- Studi e ricerche sui gas dei soffioni boraciferi con particolare riguardo al loro contenuto in elio e altri gas nobili,- Bulletin Vulcanologic, 1937.
- SBORGI U.- Considerazioni chimiche e chimico- fisiche sui gas vulcanici e magmatici.- Ipotesi di una fase idrotermale intermedia.- Bulletin Vulcanologic, 1939.
- SCHLUMBERGER C.- Etude sur le prospection électrique du sous- sol.- Paris, 1920.
- SCHLUMBERGER C.- L'exploration électrique des sondages.- Paris, 1934.
- THOMPSON A.B.- Oil Field Exploration and Development.
- VAN OSTRAND C.F.- Apparatus for the measurement of temperatures in deep wells by means of maximum thermometers.- Econ. Geol. XIX, Lancaster, 1924.