

15  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

FACTORES GEOCIENTIFICOS QUE INTERVIENEN  
EN LA LOCALIZACION DE UN POZO  
GEOTERMICO

**TESIS PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO PETROLERO**  
**P R E S E N T A :**  
CUTBERTO LOPEZ BECERRA



MEXICO, D. F.,

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

	pag.
INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I	
FASES DE TRABAJO EN GEOTERMIA .....	3
I.1 Estudio de reconocimiento .....	3
I.2 Estudio de prefactibilidad .....	7
I.3 Estudio de factibilidad .....	11
I.4 Desarrollo .....	18
I.5 Explotación .....	23
CAPITULO II	
CARACTERISTICAS DE UN CAMPO GEOTERMICO .....	26
II.1 Hipotesis sobre el vapor endogeno .....	27
II.2 Clasificación de sistemas hidrotérmales.....	28
II.3 Elementos indispensables para la existencia de un campo geotérmico .....	30
CAPITULO III	
CRITERIOS GEOCIENTIFICOS EN LA LOCALIZACION DE UN POZO GEOTERMICO EXPLORATORIO .....	31
III.1 Geología y Vulcanología .....	31
III.2 Estructurales .....	37
III.3 Geoquímica e Hidrogeología .....	38
III.4 Geofísica .....	40
CAPITULO IV	
PERFORACION Y TERMINACION DE UN POZO GEOTERMICO .....	41
IV.1 Introducción .....	41
IV.2 Sistemas principales del equipo de perforación .....	41

IV.3 Programa de perforación .....	42
IV.4 Problemática de la perforación geotérmica .....	44
IV.5 Importancia de los fluidos de control .....	47
IV.6 Principales componentes de los fluidos de control ...	51
IV.7 Consideraciones en la preparación y prueba de las formulaciones de los lodos base-agua a nivel de laboratorio .....	52
IV.8 Principales contaminantes químicos .....	54
IV.9 Terminación del pozo geotérmico .....	56
IV.10 Cuidados en la selección de la tubería para pozos geotérmicos .....	64
CAPITULO V	
DISCUSION Y CONCLUSIONES .....	82
V.1 Fases de trabajo en geotermia .....	82
V.2 Características de un campo geotérmico .....	84
V.3 Criterios geocientíficos .....	85
V.4 Perforación y terminación .....	87
BIBLIOGRAFIA .....	91

## INTRODUCCION.

La geotermia es una energía que ha existido siempre, sin embargo, hasta principios de este siglo se comenzó a explotar en forma comercial haciéndose notoria su existencia hace apenas algunos años. En la actualidad con el incremento del costo de los combustibles fósiles se le ha dado una importancia relevante, representando una solución para diversos países, carentes de dichos combustibles. Actualmente existe un gran interés por desarrollar campos geotérmicos sobre todo en los países que circundan el Océano Pacífico ya que en la mayoría existe una gran actividad volcánica, la cual está íntimamente ligada a la actividad geotérmica. Este trabajo pretende mostrar los pasos para la localización de un pozo geotérmico hasta su explotación.

La energía geotérmica está asociada a los procesos volcánicos y tectónicos terrestres. La teoría más aceptada sobre su ocurrencia establece que masas magmáticas que no afloran a la superficie y que quedan atrapadas a pocos kilómetros de la misma, liberan su energía al medio circundante (roca y agua), en donde a través de miles de años y mediante procesos convectivos se forman grandes reservorios de agua o vapor. Este proceso origina gradientes térmicos de hasta  $200^{\circ}\text{C}$  por Km, siendo el gradiente normal de  $30^{\circ}\text{C}$  por Km de profundidad.

Para que un reservorio geotérmico sea económicamente explotable se requiere de tres características principales: 1) Una fuente de calor, 2) Un acuífero y 3) Una capa sello. También deberá estar situado a una profundidad adecuada, considerándose actualmente como máxima profundidad económica 3000 m.

En general el término geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra, independientemente de los factores que intervengan en sus manifestaciones superficiales. Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por fluidos que ascienden por las fracturas hasta zonas porosas y permeables más o menos profundas para constituir los yacimientos geotérmicos.

Sin embargo es de uso común, que al hablarse de geotermia se refiera a la utilización de dicho calor interno, principalmente en forma de potencia y energía térmica, con el fin de satisfacer diversas necesidades del hombre, aunque a la fecha su principal utilización se

encuentra en la producción de energía eléctrica.

Más específicamente, el término geotermia se aplica a la energía del agua caliente o vapor del subsuelo, y a los procesos que deben realizarse para su obtención, conducción y utilización en la generación de la electricidad.

La energía geotérmica presenta buenas perspectivas para el futuro ya que es económicamente competitiva, comparativamente con otras fuentes energéticas presenta menos riesgos estratégicos, presenta pocos problemas de contaminación, tiene una gran cantidad de usos no eléctricos y se encuentra ampliamente distribuida en el mundo.

Esta es en síntesis la energía geotérmica que actualmente se explota, la que está al alcance del desarrollo tecnológico logrado hasta el presente. En el futuro se está pensando en utilizar la lava de los volcanes y el calor natural de la tierra a gran profundidad, para lo cual se efectúan trabajos de investigación en diversos países del mundo, entre ellos México.

CAPITULO I  
FASES DE TRABAJO EN GEOTERMIA

I.1. -Estudio de reconocimiento.

En esta etapa se valora la información disponible con fines geotérmicos; esta va acompañada de una serie de investigaciones preliminares a escala regional. Con esto se podrán fijar las primeras hipótesis de trabajo, seleccionar las zonas preferenciales y plantear en forma concreta las líneas de acción de las fases sucesivas del proyecto (prefactibilidad y factibilidad).

Objetivos.

- Realizar las primeras evaluaciones de las posibilidades geotérmicas a nivel regional o nacional.
- Seleccionar áreas de interés.
- Realizar un esquema geotérmico preliminar y después, hacer un programa de explotación detallado en cada área.

Lo anterior son antecedentes técnicos que aunados a consideraciones socio-económicas y políticas, forman las bases para tomar las decisiones siguientes:

- a) Importancia que se dará a la Geotermia (nivel nacional o regional) con relación a otras fuentes de energía (hidroelectricidad, combustibles fósiles, etc).
- b) Identificación de las áreas de mayor importancia en la planeación de explotaciones futuras, tomando en cuenta los factores técnicos, (indicaciones del potencial geotérmico que se obtuvo del estudio de reconocimiento), económico y social. En esta etapa pueden ser muy importantes los factores locales; se podría utilizar la energía geotérmica en algún lugar donde no hubiera forma de generar energía de otra forma, o donde se necesite generar energía a bajo costo. (minería, o cierto tipo de industrias).
- c) Definición de la cantidad de inversiones y la estructura técnica que se necesite para evaluar el potencial geotérmico que se ha considerado como más importante.

Metodología.

El estudio de reconocimiento a nivel regional o nacional, se puede

resumir como sigue:

Fase I.- Evaluación de la información relativa existente.

Recopilación de documentación básica. Esta se refiere a:

- Mapas geológicos, a escala regional y detallados.
- Síntesis geológica regional, incluyendo estratigrafía, geología estructural, historia volcánica, etc.
- Imágenes desde satélite y/o aerofotografía.
- Mapas topográficos, detallados y regionales.
- Información obtenida de pozos que hayan sido perforados con otros fines (petróleo, agua, etc).
- Todos los datos geofísicos disponibles.
- Información hidrológica y meteorológica.

En esta fase se podrán esquematizar las provincias geotérmicas (áreas geológicamente homogéneas) y se conocerá el área donde realizará la siguiente fase (investigación de campo).

Fase II.- Investigación de campo y análisis de laboratorio.

A partir de los resultados de la fase anterior, se programará una investigación de reconocimiento de campo.

Esta investigación tendrá como objetivo obtener información específica relacionada con:

- 1.-La posible presencia de una anomalía térmica a niveles superficiales de la corteza terrestre;
- 2.-Las condiciones hidrogeológicas regionales; y.
- 3.-La naturaleza de las manifestaciones termales.

En regiones volcánicas se debe poner mayor atención a los siguientes aspectos.

- Identificar áreas donde exista una concentración de episodios volcánicos recientes. Esta concentración es indicador de que puede ser una anomalía térmica importante en el subsuelo.
- Evaluar la cantidad relativa de productos volcánicos ácidos que sean producidos por diferenciación de magmas básicos.
- Definir, a nivel regional, las relaciones existentes entre las estructuras volcánicas y la tectónica regional.
- Investigar la posible presencia de cráteres de explosión freática.
- Recolectar muestras, la mayor cantidad que sea posible, de tipos

litológicos para trabajos analíticos futuros. El trabajo petrográfico estará limitado, al análisis de láminas delgadas, en la mayor parte de las muestras.

-Recolectar muestras de los xenolitos de los piroclásticos para estudios en láminas delgadas.

-Determinar la edad absoluta en muestras seleccionadas.

-Estudiar en forma preliminar todas las posibles formaciones, cobertura y yacimiento.

Es muy importante realizar un muestreo de las aguas de la zona en reconocimiento (manantiales fríos o termales, aguas superficiales o de pozos); esto es en cuanto al trabajo geoquímico e hidrológico.

Para elegir el programa se debe conocer la disponibilidad de:

1) Personal.

2) Financiamiento.

3) Equipo.

4) Tiempo.

A partir de esta disponibilidad se definen los programas óptimos y mínimos, los cuales buscan cumplir los objetivos del estudio de reconocimiento.

Análisis químicos:

-A partir de éstos se calculan temperaturas del subsuelo utilizando geotermómetro (Si, O<sub>2</sub>, K/Na/Ca, etc). Se determina el posible grado de la mezcla (fluidos termales y otras aguas del subsuelo y del suelo) a partir de las estimaciones de flujo (l/seg o l/min).

Resultados.

Una vez concluidas las fases I y II, combinándolas con la evaluación subsecuente de la información obtenida, se llegará a lo siguiente:

-Definir las principales zonas geotérmicas.

-Seleccionar las áreas de interés, además indicar la posible existencia de fluidos con alta entalpía, ya que podría ser factible la explotación de esas áreas con la tecnología actual.

Es necesario señalar las áreas de baja entalpía ya que esa energía podría ser utilizada en otras actividades.

Las zonas seleccionadas deberán de contar con una área de 500 a 2000 Km<sup>2</sup>.

-Definir la importancia de cada zona seleccionada. En primer lugar las que cuentan con condiciones geológicas más favorables para la existencia de un campo geotérmico y que sea económicamente explotable a esa profundidad de las zonas. Se debe también tomar en cuenta consideraciones técnicas.

-Realizar un esquema geotérmico preliminar de cada zona. Para esto se deben tomar en cuenta los aspectos relativos a la existencia de una anomalía térmica ó superficial, y a las condiciones geológicas de la zona.

-Definir un programa detallado de explotación (etapa de prefactibilidad).

Se realizará un programa de las investigaciones detalladas necesarias para una mejor definición del modelo geotérmico de cada área: éste tiene por objeto localizar los lugares en donde se perforarán pozos de exploración profundos. Deberán ser de diámetros adecuados para realizar las pruebas de producción.

Requerimientos de personal, tiempo y costo.

El personal deberá ser experimentado porque es en esta etapa donde se fijan los lineamientos de la exploración futura.

La recolección de información (fase I) la puede hacer personal técnico sin importar que tenga amplio conocimiento de la Geotermia. Sin embargo, en la fase II se empleará sólo personal altamente calificado y experimentado en exploración geotérmica, para evaluar la información recopilada por los anteriores (un geólogo estructural, un vulcanólogo, un geoquímico, y un geohidrólogo).

El tiempo empleado varía en función del tamaño de la región, y la cantidad de información disponible.

En un área de 10000-100000 Km<sup>2</sup>, el tiempo varía normalmente de 9-16 meses, si se emplean 2-4 meses para recolectar la información, 2-3 meses en el reconocimiento de campo; 1 a 3 meses para los análisis de laboratorio y 4-6 meses en la evaluación de resultados y preparación de informe final de reconocimiento.

Un estudio de este tipo con las características de extensión

mencionados antes, pueden llegar a costar de 100.000,00 a 250.000,00 dólares.

#### 1.2.-Estudio de prefactibilidad.

En esta fase se persigue principalmente identificar las áreas más prometedoras, estas deben ser lo más confiable posible. Se puede recomendar pasar de la explotación de superficie a lo profundo. Aquí se contempla la evaluación preliminar de los recursos posibles.

#### Objetivos.

-Definir el modelo geotérmico preliminar del área seleccionada. Se definirá el modelo geotérmico preliminar de un área cuando se cuente con información detallada de:

- 1.-Existencia y origen de las anomalías térmicas.
- 2.-Características de las formaciones de cobertura o roca sello.
- 3.-El modelo de circulación general de agua.
- 4.-Tipo y características del yacimiento.

-Localizar sitios para realizar una perforación exploratoria profunda de diámetros adecuados para pruebas de producción.

#### Metodología.

El programa detallado de exploración sólo consistirá de investigaciones de costo variable. El interés puesto en la exploración de bajo costo desea obtener la mayor efectividad de las investigaciones donde la inversión fue costosa; éstas contemplan las disciplinas de:

- A. Geología-Hidrogeología-Geoquímica.
- A1-Geología y Vulcanología.
- A2-Geoquímica e Hidrogeología.
- B.Geofísica y pozos someros.

Los criterios anteriores son explicados en el capítulo III.

#### Requerimientos de personal, tiempos y costos.

El personal necesario para llevar a cabo esta fase de trabajo está en función de la situación local, pero se puede hacer una generalización si se considera un intervalo de área de  $500-2000 \text{ km}^2$  y tomando en

cuenta que se dispone de información básica (mapas topográficos detallados, mapas geológicos y fotografías aéreas).

#### Personal

Se debe contar con personal adecuado para realizar el trabajo, con el objeto de tener los mejores resultados.

#### Costos

Factores que hacen variar los costos de un programa exploratorio:

- Cantidad de información geológica e hidrológica con que se cuenta.
- Experiencia y entrenamiento del personal local con que se cuenta.
- Estado geográfico y geológico de la región donde deberá investigarse.
- Si se cuenta con instalaciones de laboratorio y computación en forma local.

#### Principales métodos de exploración:

- Exploración geológica en áreas volcánicas.

Características que deben cumplir para que un yacimiento sea explotable:

- Una anomalía térmica.
- Un yacimiento formado por rocas permeables en el cual habrá circulación de fluido térmico.
- La profundidad deberá ser económicamente explotable (no mayor a 3000m).
- Las condiciones de cobertura deberán impedir la pérdida de calor por la convección de los fluidos a la superficie.

#### Fuentes de calor de mayor interés:

- Áreas en las cuales el magma ascendió directa y rápidamente desde el manto a través de fisuras (basaltos).
- Áreas con grandes volcanes centrales relacionados con cámaras magmáticas o donde se encuentran grandes volúmenes de magma dentro de la parte superior de la corteza continental (magmas ácidos generados dentro de la misma corteza) o regiones que cuenten con volcanes centrales relacionados con cámaras magmáticas.

#### Características del yacimiento.

Este debe contar con rocas muy permeables y su volumen debe ser lo

suficientemente grande, que asegure un largo tiempo (mas de 20 años) de explotacion; tambien debera estar contenido en un sistema hidrológico favorable.

Su delimitacion no es una tarea facil, esto es por la presencia de grandes coberturas volcanicas superficiales que muchas veces impiden que se realice un estudio directo sobre el estrato mas profundo.

Para esto es necesario tener conocimiento del marco geológico general; particularmente, los espesores, profundidad, litología y la permeabilidad de las capas estratigráficas localizadas por abajo de la cobertura volcanica superficial. Es de gran importancia tener conocimiento de las areas de mayor permeabilidad debido a fracturas ocasionadas por el tectonismo y por su modelo de distribucion.

Es muy importante la observacion de la textura de los minerales hidrotermales (en venas o distribucion al azar) y, a los cambios para magnéticos que ocurren en forma eventual; estos daran origen a la identificacion de los cambios en las condiciones fisico-químicas de flujo de los fluidos.

#### Cobertura

Esta roca debe ser impermeable. Pueden ser rocas sedimentarias (arcilla, limo, depósitos lacustres) en las cuales la baja permeabilidad es primaria, o roca impermeable por auto-sellamiento. Para definir la cobertura debe conocerse la estratigrafía y la litología de los horizontes subsuperficiales.

#### Manifestaciones superficiales.

En algunas regiones, en caso de que la cobertura este fracturada por fallas, el ascenso de los fluidos del yacimiento se manifiesta en forma de manantiales calientes o fumarolas, pero pueden existir campos geotermicos que no se manifiestan de esta manera. El hecho de que exista alguna emanacion no indica necesariamente que sea un campo de alta entalpia, ya que puede estar relacionado con un ascenso rápido a través de las fallas y el fluido debe provenir de la profundidad de áreas con gradiente geotermico normal.

#### -Cráteres de explosion freática (hidrotermal).

Estas estructuras se generan a partir de una explosion de bolsas de

vapor calentado y mantenido a baja presión, con una cobertura impermeable. La presencia de estas, muestra que se cuenta con los elementos básicos para la existencia de un campo geotérmico.

#### Estudios de Geoquímica.

Estos estudios son empleados para:

- a) Clasificar los diferentes tipos de agua dependiendo de su composición química y de los posibles yacimientos, según el tipo de aguas que contenga (aguas superficiales, aguas subterráneas y manantiales termales).
- b) Conocer el origen de los fluidos y localizar las áreas de recarga.
- c) Reconocer los patrones de distribución de ciertos elementos particulares.
- d) Determinar la temperatura mínima del yacimiento.
- e) Definir los problemas químicos asociados a la producción y eliminación de fluidos de desperdicio, incluyendo aguas y gases.

#### Estudios de Geología.

Estas técnicas tienen como objetivo:

- a) Determinar las condiciones geológico-estructurales regionales.
- b) Localizar y delimitar anomalías térmicas en el área.
- c) Definir condiciones estructurales particulares.

Estos métodos están basados en la medición de la variación en el tiempo y el espacio de las propiedades físicas de la roca.

#### -Métodos de exploración geofísica.

- a) Determinaciones estructurales regionales.

Los estudios gravimétrico, magnetométrico o aeromagnetométrico proveen de información muy valiosa a costos muy bajos.

- b) Delineación de anomalías térmicas en el área.

Los métodos eléctricos y electromagnéticos son los de mayor uso. Para una buena interpretación se deben tomar en cuenta los factores de salinidad, porosidad, presión, alteración mineral; porque influyen en la resistividad eléctrica.

- c) Determinaciones particulares.

Las técnicas de gravimetría y magnetometría son las que han permitido encontrar información muy particular (existencia de cuerpos o fluidos

calientes en el subsuelo).

Con estos datos gravimétricos también se puede obtener información que ayudará a:

- Localizar fallas.
- Zonas de fracturas o alteración.
- Anomalías de masa relacionadas con temperaturas.
- Detectar variaciones de densidad de un campo geotérmico causada por la transferencia de masa durante la explotación del mismo.

Con los métodos sísmicos podemos obtener información acerca de la posición de los intereses geológicos.

Estos son poco usados por sus costos tan altos.

### I.3. - ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.

Consideraciones técnicas.

Alcances y Objetivos.

Su objetivo principal es evaluar el potencial geotérmico del área estudiada y el diseño preliminar de los sistemas de la posible utilización de estos recursos. Mediante perforaciones exploratorias profundas, estudios geocientíficos, estudios de ingeniería de yacimientos y realizando un análisis técnico-económico de los esquemas candidatos a ser utilizados, se podrán alcanzar los objetivos fijados en esta etapa.

Además de lo anterior es necesario conocer: sistema de yacimiento Roca-Sello, circulación de los fluidos y sus características físico-químicas, distribución de la termalidad y las características físicas de las zonas productoras para que el estudio de factibilidad sea un estudio completo. De lo anterior se puede obtener una información acerca del yacimiento que es: Potencial energético, posibles esquemas de utilización y el programa de operaciones que se ejecutará en la siguiente fase de trabajo.

Este escrito tiene como fin mostrar un método para realizar un estudio de factibilidad de un proyecto geotérmico enfocado a la generación de electricidad.

Estudios técnicos.

Estudios geocientíficos.

a) Investigaciones superficiales.

Estas investigaciones tienen como principales objetivos:

Completar, detallar y verificar el modelo geológico e hidrogeológico de la zona de interés;

Delimitar la extensión del posible campo descubierto.

En esta etapa se realizarán las investigaciones similarmente a las que se efectuaron en la etapa de prefactibilidad, pero se tendrán algunas variables que consistirían en el tamaño del área y el nivel de detalle.

b) Geología subterránea.

Con los recortes, núcleos, medidas de temperaturas, registrar, obtenidos de los pozos perforados se realizará un análisis a cada uno de estos datos, lo cual nos ayudará a la determinación de la ubicación, la profundidad, número de pozos exploratorios a perforarse y el programa de investigaciones de superficie.

Esta etapa terminará cuando se considere que el modelo geotérmico del área se conoce con el detalle requerido.

A continuación enunciaremos algunos tipos de investigación en esta fase.

-Geología.

-Geoquímica e Hidrogeología.

-Geofísica.

c) (Asistencia Geológica y Geoquímica a la perforación de pozos exploratorios profundos).

Perforación Profunda Exploratoria.

Se puede considerar que es éste el momento de la terminación de los trabajos exploratorios previos porque ya se tienen los puntos para la perforación de pozos profundos.

Los estudios geocientíficos juegan un papel muy importante en esta etapa porque no pierden de vista los datos obtenidos durante la perforación, y ayudarán a confirmar o reinterpretar las curvas de temperaturas o las predicciones que se hubiesen hecho.

Con la evaluación de los datos obtenidos en la etapa de

prefactibilidad, se deberá contar con por lo menos tres pozos localizados en los puntos con mejores posibilidades dentro de un área de antemano seleccionada. La cantidad y separación de los pozos dependerá del área (extensión), características especiales de la misma y de los resultados obtenidos.

#### Alcances del programa.

Se deberán construir caminos de acceso por donde transitarán vehículos de carga, los caminos deberán contemplar las características de éstos, se debe seleccionar un lugar estratégico para almacenar los materiales de consumo para la perforación.

Es muy importante tomar en cuenta la presencia de agua de escurrimiento superficial, esta presencia deberá ser todo el año y muy abundante ya que esta se empleará en la perforación del pozo, y esto ayuda a que disminuya el costo en la perforación del pozo.

#### Ingeniería de yacimientos de producción.

##### A. Objetivos.

- 1.-Evaluación del potencial del pozo (a) exploratorio (b) perforado bajado en la información obtenida anteriormente.
- 2.-Evaluación del potencial del yacimiento disponible para generar electricidad.

##### B. Metodología para lograr los objetivos antes mencionados.

Se requiere contar con ciertos datos para una buena evaluación del potencial, estos son obtenidos durante la perforación, a estas muestras y a los pozos se les somete a:

- 1.-Análisis petrográficos de recortes de la roca y núcleos cortados.
- 2.-Registros de temperatura y presión vs. profundidad.
- 3.-Registros geofísicos de pozos.
- 4.-Pruebas de presión en pozos.
- 5.-Pruebas de productividad del pozo.
- 6.-Muestreo y análisis de los fluidos.

#### Temas Especiales.

##### a) Aspectos ambientales.

En la etapa de prefactibilidad de un proyecto geotérmico se deben analizar los problemas ambientales que pueden originarse a causa del trabajo geotérmico que se desea desarrollar. Lo más importante en este análisis es conocer la magnitud de estos problemas para dar una solución y evitar que se den problemas severos a raíz de estos.

Algunos de estos problemas son:

-Efluentes químicos.

.Sulfuro de Hidrogeno ( $H_2S$ ) (Corrosión)

.Dioxido de Carbono  $CO_2$  (no causa problemas severos al ambiente).

-Ruido.

Debido a la expansión de los fluidos geopresurizados a la atmosfera (se soluciona empleando equipo apropiado).

-Calor.

Debido a la eliminación de aguas residuales calientes puede provocar problemas considerables a la vida acuática, se debe eliminar el calor al máximo, disminuir los problemas ocasionados a estos ecosistemas.

-Asentamientos.

Debido a la extracción de grandes volúmenes de fluido del subsuelo se producen en ocasiones asentamientos verticales u horizontales, estos efectos se deben tomar en cuenta en el diseño, construcción y ubicación de obras civiles relacionados con el campo geotérmico.

b) Corrosión e incrustaciones.

Corrosión.

El grado de corrosión de los fluidos depende de la composición química, temperatura, tipo de fase y velocidad de fluido; la corrosión puede presentarse en las instalaciones superficiales, en los pozos, y equipo de la planta.

Componentes químicos que pueden provocar:

corrosión H. Cl.  $H_2S$ .  $NH_3$ .  $NH_4$ .  $SO_4$ .

Se debe realizar una evaluación de corrosividad para poder seleccionar los materiales óptimos.

Tipos de pruebas de corrosión con testigos.

- 1.-Vapor separado.
- 2.-Vapor separado ó creado.
- 3.-Vapor condensado.
- 4.-Condiciones atmosféricas.
- 5.-Agua separada.
- 6.-Agua separada en condición atmosférica.
- 7.-Mezcla de agua-vapor.

Incrustaciones.

Las incrustaciones son originadas debido a el calcio y los carbonatos (principales componentes de las incrustaciones producidos por los fluidos geotérmicos) están presentes en condiciones límites de solubilidad, y con las caídas de presión por mínima que sea producirá dióxido de carbono, con esto aumentará el pH del fluido y la concentración de carbonatos (la solubilidad del carbonato de calcio es inversa con respecto a la temperatura.

La temperatura de la solución es un factor que rige sobre la velocidad de la formación de incrustaciones así como condiciones locales (velocidad de los efluentes, contacto con el aire, etc).

Se deben realizar estudios sobre la tendencia incrustante de los fluidos principalmente los que contengan carbonatos de calcio y silicio, los resultados obtenidos se pueden emplear en:

- Un establecimiento de criterios para evitar la incrustación y fracturas del reservorio.
- Diseñar los equipos de transmisión y conversión de energía.
- Establecer la factibilidad de la reinyección de fluidos sin problemas de depósitos.

c) Eliminación de residuos.

Dependiendo del sistema geotérmico será el grado de dificultad para eliminar los residuos de este.

Sistemas de eliminación propuestos:

a) Gases.

La utilización de chimeneas suficientemente altas asegura una buena dispersión de algunos gases (sulfuro de Hidrógeno) . Su utilización es en zonas altamente ventiladas y la concentración de gases debe ser baja, en caso contrario se utilizan otros métodos de eliminación (síntesis de azufre) la cual debe contar con una evaluación atmosférica inicial para conocer si se provoca alguna alteración en el ambiente.

#### b) Líquido.

El mayor problema de eliminación residual es la de los líquidos principalmente en áreas pobladas y donde el agua es utilizada con fines agrícolas. se deben dar soluciones específicas para cada caso.

#### Alternativas de solución:

- Eliminación a la superficie por medio de cuerpos de agua naturales.
- Eliminación por medio de las lagunas de evaporación.
- Reinyección al subsuelo.
- Procesamiento industrial de los residuos.

Para obtener una buena solución se debe realizar antes que nada análisis ambientales, geográficos, económicos y de ingeniería de yacimientos.

La reinyección es una alternativa prioritaria y se debe tomar en cuenta.

#### d) Reinyección.

La reinyección de los fluidos residuales a la formación se considera ser una buena solución para eliminar los mismos debido a que se devuelve al subsuelo parte considerable de la masa extraída y con esto evitar en gran medida un posible asentamiento, otro aspecto por el que se considera como buena solución es que disminuye la contaminación ambiental que se pudo haber generado debido al procesamiento de los fluidos residuales.

Se debe considerar lo siguiente para tener buenos resultados de la inyección.

- Posibilidad técnico-económica para efectuar un pretratamiento.
- Características químicas y termodinámicas de los fluidos residuales.
- Características del yacimiento (porosidad, permeabilidad,

condiciones estructurales, condiciones termodinámicas, etc).

-Factores geográficos.

Lo anterior nos sirve para aclarar.

-Efectos de la reinyección en el campo geotérmico.

-Efectos de la reinyección en los acuíferos superficiales.

-Selección de puntos óptimos para la reinyección.

-Posible formación de incrustaciones y depositaciones, en instalaciones superficiales, pozo y formaciones permeables.

-Diseño del sistema de control.

-Costos de inversión y operación.

Antes de realizar un proyecto de reinyección debe realizarse un estudio de los diferentes aspectos que pueden ser críticos para el éxito del proyecto, este estudio se realiza en esta etapa (factibilidad).

El transporte de los fluidos.

Es muy importante conocer las características de los flujos para el diseño del sistema de transporte.

-Presiones estáticas.

-Presiones dinámicas.

-Temperatura.

-Relación vapor-liquido.

-Identificar los sólidos transportados.

-Constituyentes químicos de las corrientes de flujo.

Es más costoso diseñar un sistema que transportará las fases que si transportara solo una.

Antes de realizar el diseño es recomendable probar varios diámetros de tubería y determinar el grado de incrustación provocado por el flasho debido a las caídas de presión.

El diseño de las tuberías tiene como finalidad:

-Reducir las pérdidas de presión.

-Reducir las pérdidas de calor.

-Minimizar el costo del capital.

-Minimizar el costo de operación del sistema.

Se debe realizar un levantamiento topográfico de las rutas para las tuberías, para realizar el diseño preliminar.

#### I.4. - DESARROLLO.

##### 1. - Ubicación de los pozos de producción y reinyección.

Para la ubicación se deben tomar en cuenta los siguientes criterios los cuales serán tratados con detalle en el capítulo III:

##### a) Criterios geocientíficos.

- Geológicos-vulcanológicos.

- Estructurales.

- Estratigráficos.

- Geohidrológicos.

- Geoquímicos.

- Geofísicos.

##### b) Criterios termodinámicos.

Con la ayuda de los parámetros termodinámicos se podrán ubicar los siguientes pozos a perforar, haciendo una interpretación de:

- Distribución de temperatura en el campo.

- Correlaciones entálpicas de los pozos.

- Variaciones de las características termodinámicas.

##### c) Otros criterios.

- Topografía del terreno: seleccionar los lugares que presenten una buena topografía, con el fin de que no resulten tan costosas las instalaciones por construir.

- Para selección del terreno donde se perforará se deben tomar en cuenta las características mecánicas del suelo para evitar problemas cuando se realice la perforación (hundimientos, deslaves, etc).

- Los pozos no deben estar localizados cerca de manifestaciones geotérmicas.

##### 2. - Perforación y terminación de pozos.

La perforación de un pozo tiene por objeto un gasto con el costo mínimo pero en este costo se debe incluir los gastos que se hicieron en el estudio exploratorio y en el mantenimiento, será al final de la explotación cuando se sabrá si se hizo un diseño óptimo.

Para suministrar a la central el vapor necesario se debe contar con cierto número de pozos, sumados a ellos se deben tener pozos cerrados

que irán sustituyendo a los pozos que ya no produzcan el gasto necesario para que se consideren óptimos.

Es de vital importancia tomar en cuenta los siguientes parámetros en la perforación.

-Fluido de perforación: El adecuado y más económico para las condiciones del pozo.

-Muestreo: Los necesarios para reconstruir la columna geológica.

-Núcleos : La recuperación debe ser la máxima para las profundidades programadas.

-Registros eléctricos: Se deberán programar los más útiles de acuerdo a las características de la formación.

-Registros de temperatura: En zonas de alta temperatura es importante tomarlos porque con la ayuda de los eléctricos servirán de apoyo para la terminación del pozo.

-Zonas de pérdida: Se debe conocer con precisión el intervalo de pérdidas de circulación.

-Colocación de la tubería de revestimiento: Debe ser de fácil colocación en las zonas preestablecidas y cumplir con sus objetivos.

-Cementos y cementaciones: Dependen de las características litológicas, durante la cementación deberán evitarse presiones altas.

-Limpieza del cemento, para la limpieza de tubería se utilizan barrenas y molinos.

Es necesario conocer los principales problemas y como corregirlos o evitarlos cuando se está perforando.

-Pegaduras diferenciales.

-Pérdida de circulación.

-Derrumbes y atrapamientos.

Para la terminación de un pozo es importante tomar en cuenta los siguientes criterios:

-Columna litológica.

-Registros eléctricos.

-Temperaturas del lodo de perforación y a la entrada y a la salida del pozo.

-Registros de temperatura.

-Análisis mineralógico de los muestras de canal.

Con lo anterior podemos correlacionar y conocer las zonas más

confiables para obtener resultados positivos.

Si se trata de rocas ígneas, se podrán efectuar pruebas de permeabilidad y/o producción.

### 3.- Instalaciones superficiales en plataforma.

De acuerdo a la importancia de estas instalaciones se hizo una división en dos grupos.

#### a) Instalaciones de obra civil:

- Caminos de acceso.
- Plataformas.
- Contrapozo.
- Bases de soporteria y del separador.

#### b) Instalaciones de obra mecánica:

- Arbol de válvulas.
- Soporte del árbol de válvulas.
- Instrumentación.
- Separador y valvula esférica e instalaciones complementarias.

### 4.- Desarrollo y evaluación de pozos.

Para poder evaluar un pozo deben cumplir las siguientes etapas:

#### a.- Observación:

En esta etapa, mediante la toma de registros (de presión, de calibración, de diámetro, etc) y la colocación de manómetros; se podrán conocer las zonas anómalas y la duración depende de cada caso específico.

#### b.- Inducción:

Se emplean métodos de inducción cuando el pozo no fluye por si mismo. El método y la velocidad de inducción dependerán principalmente de:

- Perfil de temperatura.
- Terminación de pozos.
- Características del yacimiento.

Los métodos de inducción sólo los enunciaremos sin describirlos.

- Presurización por gases.
- Pistoneo.
- Cubeteo.

- Bombeo.
- Inyección de fluidos geotérmicos.
- Inyección de aire con tubería.

c-Calentamiento:

Esta etapa tiene como objetivo calentar las tuberías y la formación aleada a las tuberías, el periodo termina cuando de calentamiento finaliza cuando la columna del pozo se aproxima a la de las formaciones productoras; se deberá continuar con la forma de registros.

d-Desarrollo:

Esta etapa consiste en abrir el pozo gradualmente hasta lograr el gasto máximo de esta manera se logra limpiar el pozo de residuos derivados de la perforación y los provenientes de la formación.

e-Evaluación:

Su objeto es cuantificar la descarga de fluido proveniente del pozo, de esta información se obtienen curvas características de producción del pozo.

El método de evaluación depende de el tipo de campo.

Agua caliente:

- Medición de fases separadas.
- Medición de mezcla a partir de presión crítica del labio.

Vapor dominante:

- Medición utilizando orificios.
- Medición utilizando conos.
- Medición con equipo electrónico.

5. -Sistema de transporte de fluidos Geotérmicos.

Un buen diseño debe tomar en cuenta los siguientes factores:

- Trazo de la línea.
- Diseño técnico y fluido-dinámico de los conductos.
- Selección de materiales para minimizar la corrosión o erosión.
- Diseño mecánico de las tuberías.
- Diseño mecánico y civil del cimiento, soportes y puntas fijas.
- Dispositivos de seguridad y control.

Es importante poner atención en los parámetros siguientes para asegurar el mejor diseño:

-El tipo de fluido a conducir.

-La curva de declinación de presión y temperatura del yacimiento con el tiempo, para estimar la curva de declinación de la producción en el cabezal y seleccionar la presión y el gasto más recomendable.

-Las características químicas del fluido y sus características incrustantes y corrosivas a diferentes condiciones de presión, temperatura, calidad y velocidad del fluido.

-La presión o presiones seleccionadas para el proceso.

-Los costos estimados de inversión, operación y mantenimiento.

-La influencia de la incrustación en la reducción de la sección transversal del ducto y el aumento de su rugosidad.

#### 6.-Proyecto de Centrales Geotérmicas.

Al proyectar una central geotérmica se divide el trabajo en dos grandes etapas.

##### Ingeniería básica:

En esta etapa se plantean los criterios de diseño, se realizan programas (inversiones de personal para el diseño), se preparan dibujos (planos) acerca de la localización de los pozos, trazos preliminares de la tubería, etc; también debe plantear algunas especificaciones de todo el equipo y especificaciones técnicas.

##### Ingeniería de detalle:

Da inicio al terminar la ingeniería básica y debe contar con toda la información necesaria para realizar el proyecto.

#### 7.-Construcción de Centrales Geotermoeléctricas.

Mediante este programa se contará con información necesaria para la planeación y coordinación de las actividades de construcción.

#### 8.-Plantas a Boca de Pozo.

Estas plantas son de suma importancia dado que después de terminar un pozo y construir una central se lleva de 3-10 años y como la inversión en la perforación es grande no se puede dar el lujo de

tener los pozos cerrados durante ese tiempo, y mediante estas plantas se amortizan las inversiones necesarias para el desarrollo del campo geotermico.

#### 9.-Evacuación de Fluidos y Control Ambiental.

El programa de control depende del método de evacuación de los fluidos de desecho.

Descargas de agua residuales:

- Reinyección.
- Corrientes superficiales a través de canales o cuerpos receptores.
- Lagunas de evaporación.
- Controles en causas naturales por descargas superficiales.

Descargas de gases no condensables.

Es recomendable implementar un programa de medición de niveles de sulfuro de hidrógeno en el medio ambiente, con el fin de que en etapas de expansión, se disponga de información para pronosticar el impacto.

Asentamiento del terreno y sismicidad.

Debido a la reducción de presión y temperatura por la explotación del yacimiento, existe la posibilidad de que se produzcan asentamientos del terreno y varíe la sismicidad del área. Por esto se deben realizar estudios de los movimientos del suelo y de su topografía instalando redes sísmicas y haciendo levantamientos topográficos del terreno para determinar estos cambios si los hay.

#### I.5. - EXPLOTACION.

Antes de integrar un pozo al sistema, deberá tenerse la precaución de soplar el tramo de tubería correspondiente.

Durante la etapa de explotación se debe llevar un historial de cada pozo con la siguiente información:

- Presión en la cabeza.
- Grado de apertura.
- Gastos de vapor y agua.
- Características termodinámicas y químicas del fluido.
- Contenido de sólidos arrastrados.

- Perfiles de temperatura, presión y calibración.
  - Informes detallados de intervenciones y maniobras diversas.
  - Comportamiento de elementos mecánicos instalados.
- Para los pozos de reinyección se necesita la misma información.

#### Mantenimiento de pozos.

Esta actividad está destinada a mantener los pozos en las mejores condiciones de trabajo posibles durante su vida útil y comprende desde la válvula maestra hasta el fondo del pozo, incluyendo carrete de expansión, tubería de anclaje, tubería de producción y tuberías cortas.

#### Mantenimiento del campo.

El mantenimiento del campo geotérmico en explotación comprende básicamente aquellos trabajos tendientes a conservar en buen estado el funcionamiento de los elementos mecánicos y obras civiles de superficie.

El sistema permite manejar el fluido geotérmico conducido hasta su destino final, que repercuten en el deterioro de la función para la que han sido diseñados. Los principales son causados por:

- Incrustaciones.
- Corrosión.
- Erosión.
- Medio ambiente húmedo y salino.
- Temperatura.
- Presión.
- Esfuerzos.
- Reacciones.
- Asentamientos diferenciales del terreno.
- Drenaje y filtraciones.

Elementos superficiales que deben estar en buen estado.

- Arbol de válvulas.
- Interconexiones pozo-separador.
- Sistema de protección del equipo.
- Separador.
- Válvulas de corte.
- Tuberías conductoras de mezcla, vapor y agua.

- Aislamiento térmico de tuberías conductoras.
- Soportería y estructuras metálicas.
- Sistema de drenaje.
- Silenciador y canal vertedor.
- Contrapozo.

Los criterios básicos para un análisis, evaluación y pronóstico de comportamiento de yacimientos son:

a) Análisis estadístico de la información.

Se toma en cuenta solo información considerada importante para conocer el comportamiento del yacimiento. Estos parámetros deberán ser indicadores de la evolución del campo en explotación.

b) Interpretación de los cambios de los parámetros con el tiempo.

Se crea un modelo conceptual del sistema geotérmico que tome en cuenta los principales fenómenos que ocurren en el yacimiento antes de ser explotado. Será cuantificado mediante modelos matemáticos. Los datos obtenidos del modelo se comparan con datos reales medidos en el campo.

Mediante una simulación y la corrección de los valores obtenidos se puede estimar el comportamiento futuro del sistema.

En lo referente a las políticas de explotación solo se mencionará que son recomendaciones basadas en el conocimiento del campo y son:

- Acciones en cuanto a la forma de explotación del yacimiento.
- Acciones en cuanto a las condiciones de operación de los pozos.
- Acciones en cuanto al manejo de fluidos de desecho.

## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS DE UN CAMPO GEOTERMICO

Al hablar de geotermia se refiere al calor que existe naturalmente en el interior de la tierra, no importando la forma en que se manifiesta. El calor puede fluir por conduccion directa a través de las rocas, también por medio de fluidos que se desplazan por las fracturas buscando zonas permeables y porosas más o menos profundas para dar origen a un yacimiento geotermio.

Frecuentemente el hablar de geotermia se refiere al uso de ese calor interno; los usos más comunes de ese calor es en forma de potencia y energia térmica para satisfacer algunas necesidades del ser humano, en la actualidad su principal uso es para generar energia eléctrica. El término Geotermia es más utilizado cuando se hace referencia a la energia que posee el agua caliente o el vapor del subsuelo y a los procesos de obtencion, conduccion y utilizacion para generar la electricidad.

El flujo térmico se encarga de distribuir en la tierra la temperatura, este flujo es producido por la energia calorifica almacenada en el interior de la tierra y se desplaza hacia la superficie.

Los depositos hidrotérmicos se generan debido a la circulacion hidrotérmica dentro de la corteza y las corrientes de convección en el manto aunado a la actividad volcánica, estos depositos se encuentran a pequeñas profundidades.

En la astenosfera existen movimientos convectivos que provocan que la zona cortical se mueva en varias direcciones.

Las etapas por las cuales atraviesa la energia geotermica son las siguientes:

El calor que procede de la camara magmatica se desplaza en forma ascendente por las fracturas de la zona impermeable a una zona permeable, es aqui donde se le aumenta la temperatura de los fluidos presentes, estos fluyen a través de las fracturas hasta la superficie y su manifestacion sera como sigue: fumarolas, manantiales hidrotérmicos, geysers, etc.

Es necesario perforar en esas zonas para obtener la información más precisa porque mediante las manifestaciones no se tendrá información muy confiable.

La temperatura de las manifestaciones dependerá básicamente de las siguientes condiciones:

- Temperatura interna del yacimiento.
- Mezclas que tengan las mismas con las aguas superficiales.
- Estructura geológica del yacimiento.
- Particularmente del grado de fracturamiento.

La presión y la temperatura del yacimiento influyen en la proporción de agua y vapor de la mezcla que se tendrá en la superficie, cuando se tenga perforado un pozo entonces esta proporción dependerá de la profundidad de este.

La temperatura dependerá de la profundidad y de que tan cerca se encuentre de la fuente calorífica.

La energía geotérmica es considerada como una fuente de energía renovable (calor) debido a que es generada en forma continua, esto se da por el flujo térmico procedente del interior de la tierra que es inmensamente grande y está repartido en una área también muy grande.

Hay quienes no aceptan que la energía geotérmica sea un recurso renovable por las siguientes razones:

-Reabastecer el depósito que contiene los fluidos geotérmicos, se necesitan decenas o centenares de años y comparándolo con la longevidad humana no se puede considerar como recurso renovable.

-Para que sea costable este recurso, deben ser a ritmos de extracción altos y con esto el recurso se agotará rápidamente.

## II.1. - Hipotesis sobre el vapor endógeno

1. - Liberación de vapor, grandes depósitos sometidos a altas temperaturas, que se encuentran a grandes profundidades. Se supone también que existen acuíferos calientes cubiertos por capas impermeables.

ii.- El magma fluido libera el agua contenida en él. La base de esta hipótesis es la abundancia de gases que contienen diversas aguas termales y explotaciones geotérmicas. en base a esto se supone que el vapor tiene origen en el magma al cristalizarse las rocas por el enfriamiento.

Los gases contenidos en las zonas geotérmicas son muy variables. La hipótesis también se basa en los resultados obtenidos de muchos experimentos sobre la solubilidad del agua en los magmas graníticos y en observaciones directas hechas en algunos volcanes del mundo.

iii.- La más aceptada hasta la fecha es la que contempla vapor producido por infiltración de agua meteórica al ponerse en contacto con rocas porosas a altas temperaturas.

La mayoría de los especialistas coinciden en que la mayor parte del vapor geotérmico es originado como consecuencia de la tercer hipótesis que aquí se mencionó, complementándose con pequeñas cantidades de vapor producidas como consecuencia de la segunda hipótesis.

Lo anterior es consecuencia de que la composición típica de los fluidos obtenidos en los pozos implica que se trata de agua meteórica, principalmente, de agua meteorica antigua que ha tenido diversos grados de mezcla con fluidos (gases principalmente) que son sin duda de origen magmático, aseguran los especialistas.

Para realizar la explotación de la energía geotérmica es necesario transportar el calor a la superficie, en cantidades suficientes y en forma controlada, por lo tanto se deben hacer las siguientes consideraciones:

- La energía geotérmica debe ser obtenida por medio de la perforación.
- Su transporte sera por medio de un fluido que realice la transferencia de calor.

## II.2.- Clasificación de Sistemas Hidrotérmales.

Sistemas convectivos hidrotérmales.

-Alta entalpia.

Estos se pueden a su vez clasificar en sistemas de liquido dominante

donde las entalpias varían de 1400 a 1800 KJ/Kg y las temperaturas son mayores de 180°C. Los sistemas de vapor dominante con entalpias que van de 2200 KJ/Kg aproximadamente y temperaturas de 230 a 240°C, la utilización de los sistemas de alta entalpia principalmente son para generar energía eléctrica.

-Baja entalpia.

Su entalpia varia de 300 a 1400KJ/Kg y sus temperaturas estan en un rango de 15°C a 180°C., sólo se utiliza para proporcionar calor. Cuando la entalpia varia de 900 KJ/Kg a 140 KJ/Kg y la temperatura de 80 a 180°C se podia producir energia electrica por medio de un ciclo binario.

Sistemas Igneos Calientes.

En estos sistemas se presentan dos casos.

-Rocas secas y calientes.

Su entalpia está entre 3000 y 5500KJ/Kg y su temperatura varia de 370 a 650°C.

-Rocas parcialmente fundidas o masa de magmas.

En este caso la entalpia varia de 5500 y 7700 KJ/Kg y las temperaturas son mayores de 650 °C

Sistemas Convectivos.

Sus entalpias están entre 900 y 1400KJ/Kg y temperaturas entre 100 y 300°C, principalmente consisten en los yacimientos geopresurizados. Hasta el momento estos sistemas no se explotan comercialmente.

El campo geotérmico hidrotermal es una área de dimensiones variables, bajo esta se encuentra un fluido a altas temperaturas, este fluido será utilizado para generar energía eléctrica (temperatura mayor de 180°C.), también se puede utilizar como fuente de calor si las temperaturas son bajas (temperatura menor de 180°C).

Para mantener la acumulación térmica alta es necesario que la circulación hidráulica en el acuífero sea lenta y se deba contar también con un espesor adecuado de las rocas a altas temperaturas.

En las formaciones con bajas permeabilidades comunmente, la circulación es lenta. Las estructuras geológicas (elevaciones o depresiones corticales, fallas y fracturas), si existen podrán actuar

como rampas y evitar la dispersión de las temperaturas a profundidad. Las condiciones anteriores ayudan a evitar la difusión de la energía térmica en forma horizontal y así mantener su valor económico.

### II.3.-Elementos Indispensables Para la Existencia de un Campo Geotérmico

- Una fuente calorífica.
- El almacenamiento de un fluido bajo ciertas condiciones de presión y temperatura (180°C y 350°C es el rango de temperaturas normalmente y el caso de temperaturas varis entre 50 y 250 bars).
- Buena permeabilidad de las rocas.
- Existencia de fallas y/o fracturas.
- Una zona impermeable superficial o subsuperficial (ésta impedirá la pérdida de energía almacenada y permitira la presurización del acuífero).
- Una recarga hidrológica que alimente al yacimiento (éste es necesario para que se considere a la geotermia como una fuente de energía renovable).

Es muy importante que la profundidad del pozo no sea mayor de 3 km para que se pueda explotar económicamente con la tecnología y costos actuales. Si aumentan los costos de los combustibles será costeable perforar a mayores profundidades, lo será también si se negaran las tecnologías.

Hay otros sistemas geotérmicas que no cumplen con las características anteriormente enunciadas, pero debido a que cuentan con características muy importantes como la de mayor potencial que los sistemas hidrotermales, ya que son más abundantes, su importancia crecerá en un futuro y por eso las analizaremos.

Actualmente su explotación no se realiza en forma económica porque no se cuenta con la tecnología y sus costos son muy altos.

Se cuenta con poca información acerca de lo que pasa en el interior de la tierra y estos sistemas tienen que ver con esta información, entonces para poder hacer una explotación de estos campos se debe ampliar la información de la corteza terrestre.

Ninguno de los sistemas que se mencionaron son rentables para su explotación si los comparamos con las fuentes de energía tradicionales.

a) Energía geotérmica de rocas secas y calientes.

Estas rocas calientes pero secas cuentan con una gran cantidad de calor, pero es difícil de explotar porque su porosidad natural es baja y por lo tanto contiene bajas cantidades de agua, la cual es el fluido transmisor de calor.

Además no existen causas que pudieran fluir a través de la roca para transmitir ese calor.

Las rocas tienen baja conductividad térmica y por lo tanto como se cuenta con grandes volúmenes de estas, esto nos ayudaría a obtener grandes cantidades de energía.

No obstante, el problema más grande tal vez es que estos yacimientos se encuentran a grandes profundidades.

Existen métodos para explotar este tipo de yacimientos:

Uno de ellos es por medio de una explosión pero está resulta demasiado costosa por el precio de los explosivos, otro método que se basa en la conductividad térmica natural de la roca para lograr la transferencia de calor a la zona de captación podría ser produciendo una fisura realizando una fractura hidráulica o térmica.

Debemos recalcar que estos métodos no son económica ni técnicamente aplicados.

Estos sistemas tienen ciertas ventajas:

-Abundancia en la naturaleza.

-Las pérdidas de agua son pequeñas durante el periodo de explotación.

-Mínima contaminación (el agua extraída no se desecha debido a que se recircula).

-Energía de zonas de alta presión, también se les denomina como zonas geopresurizadas, de geopresión o yacimientos geopresurizados en un futuro será otra fuente de energía geotérmica.

Estas zonas se encuentran regularmente en formaciones sedimentarias porosas y permeables, los fluidos contenidos están a altas presiones y temperaturas.

Aun no se puede explicar el por que de estas altas presiones y

temperaturas ya que no coinciden con el gradiente de temperatura de la región.

A pesar de que estos yacimientos contienen energía térmica, hidráulica y gas en solución natural, no es rentable producir electricidad por medio de esta ya que se comprobó que estos yacimientos a pesar de encontrarse a mayor profundidad están sometidos a temperaturas relativamente bajas.

Por lo anterior se cree que sería más rentable de acuerdo a los estudios realizados explotar el gas metano disuelto en el agua.

La cantidad de gas recuperable dependerá de la calidad y cantidad de las arenas del medio ambiente de los depósitos geopresurizados, presión y salinidad del agua en el yacimiento.

Se debe determinar el contenido y duración de estos yacimientos, también establecer los aspectos técnicos y económicos para eliminar la salmuera y determinar si existe alguna posibilidad de hundimiento de la superficie de la tierra o que ocurran otros efectos ambientales debido a la explotación de este recurso.

-Energía geotérmica de masas de magma.

Muy cerca de las cámaras magmáticas ocurren flujos con un contenido calorífico muy alto, por eso no se descarta que en el futuro estas masas sean una fuente de energía; tomando en cuenta que estas cámaras magmáticas se encuentran localizadas a varios kilómetros por debajo de los volcanes y que aun no se cuenta con una tecnología económicamente factible.

Concluimos que resulta ser un gran problema intentar explotar este recurso.

Aunado a este problema se ignoran las repercusiones sobre el medio ambiente al explotar esta energía ya que es muy grande su potencial.

Para explotar este recurso sería necesario hacer un estudio minucioso que permita determinar las posibles consecuencias y así saber que tan grande y perjudicial sería para la humanidad el desequilibrio en el planeta por la extracción de grandes volúmenes de magma.

La energía de los volcanes es de la misma magnitud que el total de las reservas mundiales conocidas de combustibles fósiles, estos cálculos fueron realizados por la conferencia de las naciones unidas. No se podrá contar con este recurso por lo menos en este siglo.

debido a que no se tiene un buen conocimiento sobre este tema y no se cuenta con la tecnología adecuada.

El mayor problema que se presentará en la explotación de estas masas de magma es debido a la corrosión y no a las altas temperaturas.

-Energía Geotérmica Marina.

Estos yacimientos son depósitos de agua caliente que se encuentran bajo la superficie del fondo marino.

Estos yacimientos geotérmicos submarinos se manifiestan de diferentes maneras en el fondo marino.

Estas formas son a través de:

-Fuentes termales (ventilas hidrotérmicas submarinas).

-Chimeneas hidrotermales.

-Chimeneas negras.

Estas manifestaciones normalmente ocurren en el fondo oceánico a lo largo de los dorsales submarinos donde ocurre la creación de corteza oceánica.

El modelo predictivo de ventilas hidrotérmicas de Ballard y Francheau, la circulación del fluido hidrotermal en los sitios donde se forma piso oceánico es el gradiente térmico que se produce entre la cámara de magma (tiene una variación de temperatura de 1200 a 1400°C) y las bajas temperaturas que existen en el fondo del océano (cerca de 2°C).

La circulación ocurre por la disminución de la densidad del agua (fría) en el momento en que el agua entra en las fisuras o fracturas del fondo oceánico en donde se encuentra acumulada una gran cantidad de energía calorífica, debido a esto el agua asciende en forma de chorros de agua negra la cual llega a alcanzar temperaturas de 300 a 350°C y alcanza alturas hasta de 15m. Si el agua se sometiera a estas temperaturas en la superficie, ésta ebullición en forma explosiva como es el caso de los geysers. lo cual no ocurre en las profundidades oceánicas por la presión a que se encuentra y esto permite que el agua permanezca en fase líquida.

En estas zonas existen organismos vivientes y se acumulan en mayor cantidad en las partes donde hay mayor temperatura, también las soluciones que surgen de esas fracturas son ricas en altas concentraciones minerales.

Estas fuentes son productoras de los llamados sulfuros marinos que son valiosos recursos estratégicos que representan un reto para la ciencia y la tecnología moderna ya que son aun difíciles de explotar. Se ha llegado a la conclusión de que no es factible explotar estos depósitos geotérmicos para que en un futuro fueran rentables, deberá contar con altas temperaturas, que sean porosos, permeables, grandes, superficiales y cercano a las zonas terrestres de alta densidad poblacional con deficiencias en su suministro de energía.

Aunque por el momento no sea rentable explotar esta energía geotérmica no se deben abandonar los estudios sobre ella, ya que se caería en un atraso tecnológico acerca de ellas y cuando sea conveniente explotarlos se tendrá que comprar la tecnología.

CAPITULO III  
CRITERIOS GEOCIENTIFICOS EN LA LOCALIZACION DE UN POZO  
GEOTERMICO EXPLORATORIO.

III.1.- Geología y Vulcanología

El trabajo generalmente comenzara con interpretación aerofotogeológica, tendiente a la definición de fallas, mapeo de estructuras volcánicas, definición de relaciones vulcano-tectónicas y sistemas de fallas relacionadas con posibles cámaras magmáticas, y a la integración de mapas geológicos existente.

El segundo paso sera un levantamiento geológico y vulcanológico. Sus objetivos principales serán:

a) Investigar la presencia de una anomalía térmica o niveles superficiales de la corteza terrestre. Para este propósito, se tomarán muestras representativas de las secuencias volcánicas recientes, para así obtener información sobre la presencia a niveles superficiales, de una anomalía térmica (naturaleza de las rocas volcánicas, presencia de series de diferenciación, etc.) y de esta manera contaremos con los datos necesarios para poder determinar las edades absolutas. Se analizarán tanto las áreas fósiles como activas.

Se hará un mapeo detallado de todas las estructuras volcánicas (volcanos centrales, domos, cráteres de explosión, cráteres de explosión freáticos, extensiones de lavas fisulares y piroclásticos.) También se debe realizar un análisis sobre las características morfológicas.

b) Identificación de las formaciones de cobertura (roca sello) y evaluación de su efectividad. Se debe realizar el mapeo y la toma de muestras de todas las formaciones que presenten características adecuadas de cobertura, ya sea de origen primario (arcillas, etc.), como también debido al autosellamiento por procesos de alteración hidrotermal. En las zonas volcánicas se pondrá mayor interés en la búsqueda de cráteres de explosión freática. Su presencia muestra la existencia de una cobertura efectiva.

c) Recabar información sobre la existencia de posibles yacimientos geotérmicos.

Se estudiarán todas las evidencias existentes de la presencia de un yacimiento a profundidad rentable.

En las zonas volcánicas el muestreo y estudio de los xenolitos producidos por erupciones explosivas, podrían proveer información sobre la naturaleza de las rocas localizadas debajo de la superficie de la cobertura volcánica.

Si es posible realizar esta investigación se obtendrían datos sobre la litología del yacimiento y temperatura de los fluidos circulantes. En todos los casos los datos anteriores proporcionan información sobre la litología del suelo que son muy útiles en otras investigaciones: hidrogeología, geoquímica, etc.

Las fallas activas representan buenos objetivos de exploración esto es debido a su permeabilidad por fracturas, por lo tanto es importante una identificación y mapeo de éstas. En cambio, las fallas antiguas pueden estar selladas por procesos hidrotérmicos en su totalidad.

En las zonas tropicales, en donde el intemperismo actúa sobre las rocas en forma fuerte y rápida y además existe una espesa capa de vegetación, a veces es difícil obtener datos geológicos con la sola investigación superficial tampoco podemos limitarnos a estudios sobre zonas reducidas porque éstas no son fáciles de correlacionar.

Si ocurre lo anterior, se debe poner mayor interés en los siguientes tipos de investigación:

1. Observaciones morfológicas realizadas con ayuda de aerofotografía y análisis de imágenes de satélites. Muchas veces, con la simple observación morfológica se obtienen datos útiles sobre la tectónica

del area, estructuras volcanicas , edad del vulcanismo, etc.

ii. Es importante identificar las fallas recientes en estas zonas, debido a que se da una rápida intemperización de los productos volcánicos y esto podría reducir en forma sustancial su permeabilidad primaria. Por lo tanto, en estas regiones las zonas fracturadas serán el objetivo de exploración geotérmica.

iii. Resultaría muy útil aplicar en estas zonas la geofísica aérea con sensores remotos (SLAP); El grado de utilización está en función de consideraciones económicas y situaciones locales.

Estos criterios se deben basar en un conocimiento amplio y adecuado al modelo geológico del campo, incluyendo la siguiente información:

- Correlaciones estratigráficas de los pozos perforados
- Identificación de los minerales de alteración hidrotermal
- Formulación de una hipótesis sobre la ubicación de la fuente calorífica
- Definición preliminar de los límites del campo
- Conocimiento de los eventos volcánicos ocurridos
- Datación de las diversas formaciones litoestratigráficas

### III.2.-Estructurales

Si se tienen datos confiables de las condiciones estructurales de un campo, esto permitirá disminuir las probabilidades de cometer algún error en la localización de los pozos productores.

Los elementos más importantes de este criterio se enuncian a continuación:

- Definición de la estructura regional
- Definición de la estructura local
- Definición de los sistemas de fracturamiento
- Definición de los sistemas de fallas

Al contar con la información de las condiciones estratigráficas del campo se tendrán criterios adicionales para una buena ubicación de los pozos.

Los elementos primordiales para este criterio son los siguientes:

- Secuencia litológica de los pozos perforados.
- Definición preliminar de los componentes litológicos del campo (cubierta, capa sello, yacimiento y basamento).
- De ser posible, correlaciones en base a estudios petrográficos especiales de los minerales de alteración.

### III.3.-Geoquímica e Hidrogeología

En seguida se enuncian los objetivos de mayor importancia del programa hidrogeológico-geoquímico durante los estudios de prefactibilidad.

i. Definir los datos geoquímicos de la región, para de esa forma tener un buen entendimiento sobre los patrones de circulación de agua.

ii. Con la ayuda de geotermómetros químicos e isotópicos tratar de definir la presencia de un sistema geotérmico en el subsuelo, esto se puede realizar también detectando anomalías en las manifestaciones de fugas existentes.

El programa hidrogeológico-geoquímico consta de tres actividades interdependientes entre sí, estas son descritas a continuación en el orden en que se deben realizar.

#### a) Operaciones de campo

- Visita a todos los puntos de descarga de agua:

Vertientes frías o calientes.

Pozos.

Drenajes.

- Describir con todo detalle cada punto, se debe incluir el cálculo exacto del flujo de agua y una descripción de la zona alterada

adyacente al punto de origen de la descarga.

- Muestreo de agua, si fuese necesario del gas, esto debe realizarse siempre en envases adecuados.
- Determinación de campo de: T°C, pH, Cl<sup>-</sup>, Conductividad y posiblemente acondicionar adecuadamente la muestra para en un futuro realizar el análisis, ésto es necesario porque pueden ocurrir cambios químicos de importancia en los componentes de la muestra. El análisis de campo debe hacerse con el nivel de calidad del análisis del laboratorio.
- Muestreo de los sublimados en las vertientes termales.
- Dependiendo del medio ambiente geológico, realizando un análisis de gases (He, Hg, CO<sub>2</sub>) se puede saber directamente si existe una anomalía térmica en el subsuelo.

#### b) Análisis de laboratorio

- La naturaleza del medio ambiente geológico nos indicará que tipo de trabajo de análisis de laboratorio se utilizara, regularmente requiere la determinación de 12 a 18 componentes. Los sublimados se pueden determinar en forma química o con la ayuda de rayos X.

#### c) Interpretación

- Mediante el procesamiento de datos analíticos podremos definir los principales tipos químicos de agua y las diferentes mezclas contenidas; una interpretación del origen de las aguas termales, el levantamiento de mapas de anomalías de fugas y el cálculo de la temperatura del yacimiento. Una forma de facilitar el procesamiento de datos podría ser el empleo de una computadora de esta manera se podría ahorrar un tiempo valioso que se emplearía en analizar con mayor detalle los resultados obtenidos.

#### III.4.-Geofísica

Las técnicas de prospección geofísica deben orientarse a tres objetivos principales:

i. Determinar las condiciones geológico-estructurales regionales de la zona donde están situados los recursos geotérmicos.

De acuerdo a lo anterior la herramienta más adecuada para conocer las mayores estructuras geológicas es un estudio gravimétrico y en ocasiones uno de magnetometría o aeromagnetometría. Mientras se desarrollan los estudios de Geología, Hidrología y Geoquímica se pueden realizar estas técnicas de prospección geofísica. Se debe tener cuidado de comenzar cuando la situación geológica más importante se conozca.

ii. Localización y demarcación de anomalías térmicas.

Con respecto a esto los contrastes de resistividad asociados a posibles zonas de temperaturas anómalas se pueden analizar mediante métodos eléctricos tradicionales, mapas y/o perfiles geoelectrónicos de resistividad. Cuando se cuenta con el conocimiento adecuado de la situación geológica de la zona se puede programar un estudio de semidetalle, regional o parcialmente regional y en base a éste se programará un levantamiento más detallado.

iii. Determinar condiciones estructurales particulares.

Las técnicas geoelectrónicas (sondeos eléctricos verticales), sísmica activa (reflexión o refracción, sísmica pasiva (microtemblores) etc. pueden ser útiles en la determinación de situaciones geológicas particulares:

- espesor de cobertura.
- profundidad de capas geológicas particulares.
- determinación de fallas activas, etc.

La programación para utilizar cualesquiera de estas técnicas debe tener una relación con el problema específico por resolver y a la relación costo-precisión que se persiga.

## CAPITULO IV

### PERFORACION Y TERMINACION DE UN POZO GEOTERMICO

#### IV.1.-Introducción:

La perforación de pozos geotermicos esta basada en la tecnología de perforación de pozos petroleros, pero debido a los altos gradientes de temperatura y alto indice de fracturamiento de los campos se tienen algunas innovaciones en la tecnología de la perforación ver fig.IV.1, estas son:

- a) Torre de enfriamiento para el lodo
- b) Los fluidos de perforación y los cementos deben ser apropiados para operar correctamente a altas temperaturas.
- c) Las tuberías de revestimiento deben soportar altas temperaturas.
- d) Los registros de temperatura son de gran ayuda en la correcta localización del intervalo productor para cada pozo.

La perforación de un pozo geotermico es mas costosa debido a lo mencionado en los incisos anteriores, por esta razon es muy importante una buena planeación en los programas de perforación y terminación, para que el pozo tenga una vida productiva de por lo menos 10 años.

#### IV.2.- Sistemas Principales del Equipo de Perforación.

##### - Sistema de soporte o levante.

Base estructural y mastil o torre.  
Dispositivos mecánicos o de levante.

##### -Sistema rotatorio.

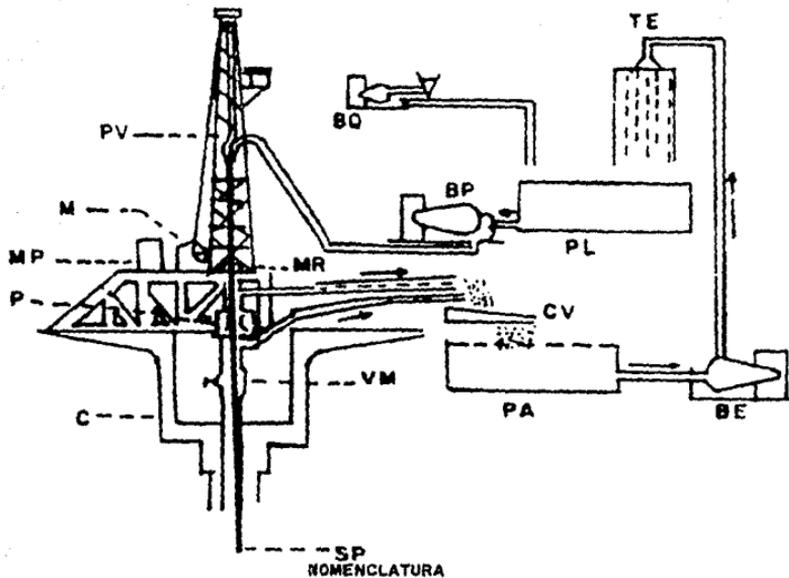
Mesa rotatoria.  
Sarta de perforación.  
Barrena.

##### -Sistema de circulación.

Fluido de perforación.  
Area de preparación del fluido.  
Equipo de circulación.  
Area de acondicionamiento del fluido.

##### -Sistema de potencia.

Grandes maquinas de combustión interna.  
Generadores de corriente eléctrica.



- PV POLEA VIAJERA
- M MALACATE
- MP MOTOR
- C CONTRAPOZO
- VM VALVULA DE COMPUERTA
- P PREVENTOR
- MR MESA ROTARIA
- CV CRIVA VIBRATORIA
- TE TORRE DE ENFRIAMIENTO
- PL PRESA LLOOS
- PA PRESA ACENTAMIENTO
- BO BOMBA PRODUCTOS QUIMICOS
- BP BOMBA PRINCIPAL
- BE BOMBA CIRCUITO ENFRIAMIENTO
- SP SARTA DE PERFORACION

EQUIPO DE PERFORACION ROTARIA DE UN POZO  
GEOTERMICO

FIG. IV.1

## Sistemas de transmisión de energía mecánica y eléctrica.

### -Sistemas de prevención.

- Preventores con dispositivos de cierre.
- Bombas con acumuladores para operación automática.
- Líneas de control.
- Líneas de inyección.

### IV.3.-Programa de Perforación.

La tubería de revestimiento representa la tercera parte o más del costo de perforación del pozo y la selección adecuada de la misma permite obtener importantes ahorros.

#### - Fase conductora.

Se le llama así al primer tramo de tubería (30 pg. de diámetro) que se coloca, ésta se cementa desde el fondo (aprox. 4 m.) hasta la superficie del agujero (40 pg. de diámetro), la perforación en esta fase se realiza en seco. A esta tubería se le instala lateralmente una línea de flujo, de esta forma se crea un sistema de circulación cerrado, el cual funciona como un difusor de flujo de lodo. Después de esto se perfora a través de la tubería conductora con un sistema simple de lodos. Normalmente se perfora un pozo de 26 pg. y se cementa una tubería de revestimiento de 20 pg. grado H 40 de 94 lb/pg. hasta una profundidad de 100-150 m. la cementación de la tubería es hasta la profundidad total perforada. La perforación de este agujero debe ser lo más recto posible. La desviación debe ser menor a  $3^{\circ}$ , tomando en cuenta que la máxima velocidad de cambio debe ser menor de 1.5 / 100 m. Con esto se disminuye la posibilidad de futuros esfuerzos provocados por la flexión en algún punto, principalmente al bajar las tuberías de revestimiento. La buena distribución de los collares de perforación 1100 o 1100 es el elemento utilizado para obtener una desviación pequeña, el rango en el peso de la carga será de 40000 a 70000 lb. y el peso aplicado sobre la barrera depende de la dureza de la formación y de la desviación del pozo. Para una buena estabilización se instala un dispositivo para amortiguar los golpes de la carga

debidos a la barrena durante la perforación, con ésto se disminuyen los riesgos de daño a la sarta de perforación y a la barrena, este dispositivo está constituido de un elemento integral de hule que transmite el peso y el torque a la barrena (ver Fig. IV.2 y IV.3).

- Fase superficial.

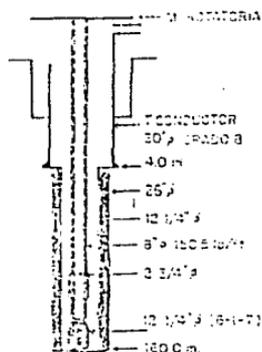
Después de haber cementado la tubería de 20 pg se corta el tubo conductor y se instala el sistema de preventores de brotes. En seguida se perfora un agujero de 17 1/2 pg. en el cual se cementa una tubería de ademe de 13 3/8 pg L-55, de 54.5 lb/pie que se cementa en su totalidad hasta una profundidad de 600m. en la perforación se emplea un sistema de lodos modificado a base agua de CLS. Se debe vigilar la desviación del pozo. La velocidad de la rotaria varía desde 55 a 75 rpm dependiendo de las características físicas de la formación, el peso de la sarta debe estar entre 40000 y 70000 lb. el peso sobre la barrena depende de la dureza de la formación y de sus condiciones. Se debe mantener la estabilización de la sarta para evitar sobrepasar el grado de desviación tolerado.

- Fase intermedia.

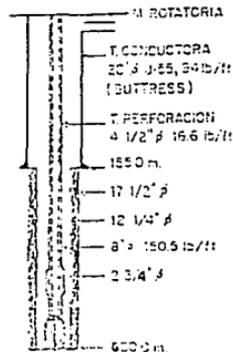
En esta fase ya se cuenta con la tubería de revestimiento de 13 3/8 pg. cementada entonces se corta la de 20 pg y se instala un sistema de brotes sobre la de 13 3/8 pg y se perfora un agujero de 12 1/4 pg. Hasta una profundidad programada de 1500 m (depende de la consolidación de la formación), se introduce y se cementa una tubería de ademe de 9 5/8 pg hasta la profundidad perforada. la cementación se realiza en etapas, dependiendo de las condiciones de la formación. Como esta tubería en su mayor parte conduce fluido geotérmico deberá estar cementada hasta la superficie, donde se coloque un carrete que permite la expansión térmica de la tubería ya que estará sometida a grandes esfuerzos térmicos.

- Fase de producción.

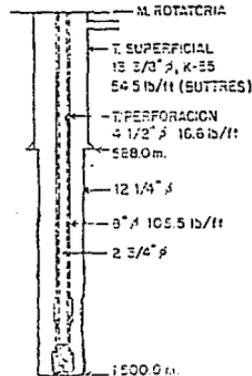
Esta etapa presenta un alto grado de dificultad pues las formaciones atravesadas con la barrena son zonas de alta temperatura, lo que se desea es encontrar un intervalo que presente una permeabilidad adecuada para que la explotación del yacimiento sea rentable. En el momento en que se cumple este objetivo se inicia la terminación del pozo esto es colocando un liner



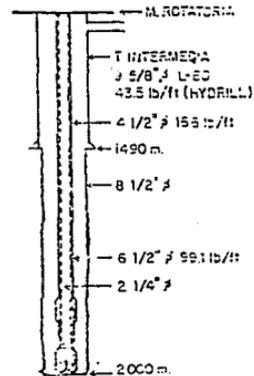
FASE CONDUCTORA



FASE SUPERFICIAL



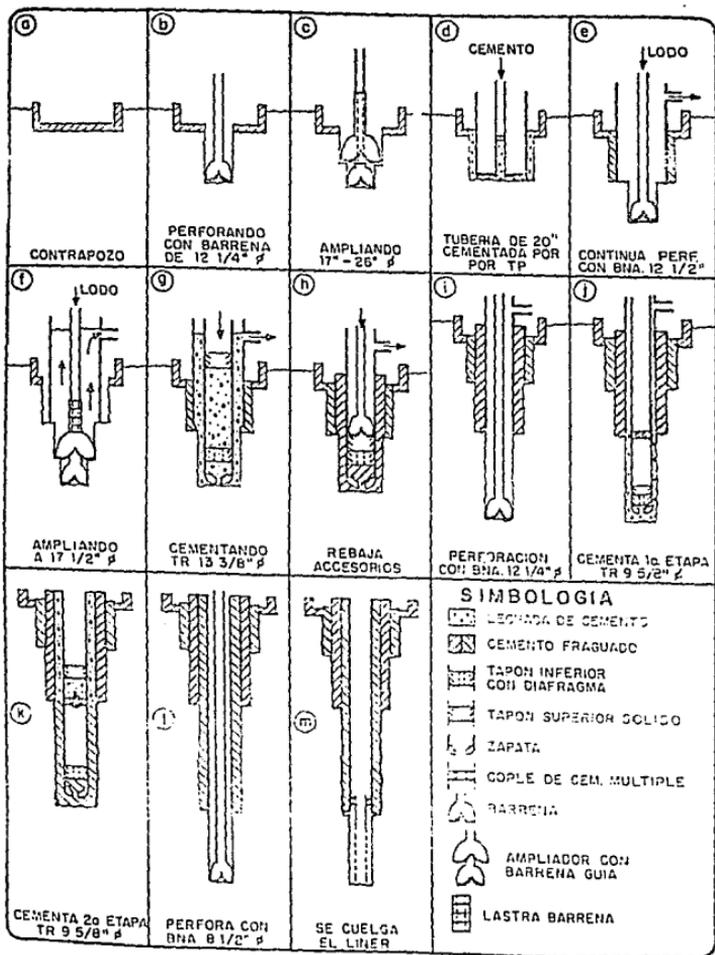
FASE INTERMEDIA



FASE PRODUCCION

FASES DE DESARROLLO DE LA PERFORACION DE UN POZO EXPLORATORIO DEL CAMPO GEOTERMICO DE LA PRIMAVERA.

FIG. IV. 2



PROCESO DE CONSTRUCCION DE UN POZO GEOTERMICO

FIG. IV. 3

ranurado apropiado para formaciones poco consolidadas por períodos largos de producción para el diseño del liner se tomarán en cuenta los registros de presión-temperatura.

#### IV.4.- Problemática de la perforación geotérmica.

Es importante hacer notar que durante la exploración y desarrollo de un campo geotérmico los problemas relacionados con los fluidos de perforación son más severos y por lo tanto provocan pérdidas de tiempo y en algunos casos de fluido de perforación, esto a su vez provoca que el costo en la perforación sea mayor.

Por esta razón para evitar los incrementos del costo de un pozo geotérmico es de gran importancia conocer los problemas más comunes y saber como evitarlos y si se llegan a presentar saber como controlarlos. En seguida se enuncian los problemas más comunes:

##### Pérdida de circulación .

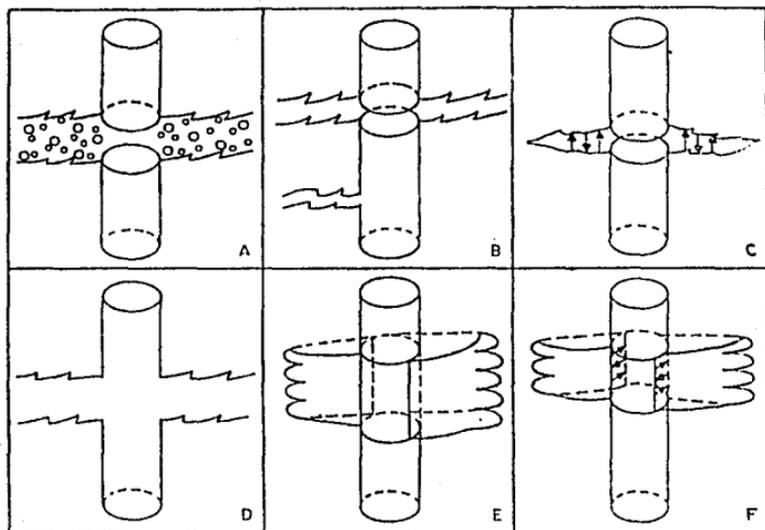
Este problema resulta ser el más costoso porque se están perdiendo el fluido de control el cual tiene un costo muy elevado. Aunado al tiempo que permanece el equipo parado y algunos pozos se encuentran abandonados. Una forma de identificar que se está presentando este problema es una disminución en el nivel de las presas de lodo, esto se presenta principalmente en zonas altamente fracturadas y/o falladas.

Por lo general ocurre en formaciones poco consolidadas fracturadas o cavernosas (ver fig. IV.4).

##### Inestabilidad de los Lodos por Altas Temperaturas.

Los lodos comunmente empleados en la perforación de pozos geotérmicos son base agua, la estabilidad térmica de éstos en condiciones de circulación disminuye cuando se presentan temperaturas menores de 180°C. en condiciones estáticas aumenta su degradación, esto sucede porque se alcanza un equilibrio con las temperaturas de la formación atravesada.

El problema es provocado por la floculación de las arcillas coloidales que producen alta resistencia al corte y al gel. Esto hace que el control de la pérdida de agua o filtrado hacia la formación sea más difícil. Se presenta un enjarre excesivo debido a la degradación de los agentes de control y esto perjudica a la cementación ver (fig. IV.5).



A) ZONA DE PERDIDA HORIZONTAL: ARENAS POROSAS Y GRAVAS

B) ZONA DE PERDIDA HORIZONTAL: FRACTURA NATURAL

C) FRACTURA HORIZONTAL INDUCIDA

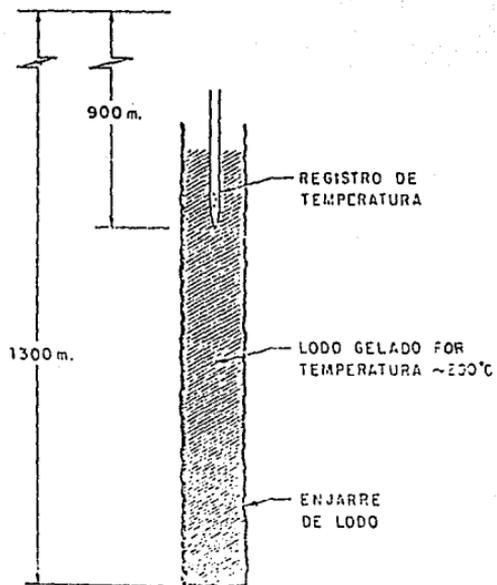
D) FORMACIONES CAVERNOSAS

E) FRACTURA VERTICAL NATURAL

F) FRACTURA VERTICAL INDUCIDA

ZONAS DE PERDIDAS DE CIRCULACION

FIG. IV. 4



GELACION DEL LODO POR ALTAS TEMPERATURAS

FIG. IV. C

Los lodos base aceite son más estables pero no son utilizados porque pueden disminuir la productividad por su costo elevado en zonas de pérdida de circulación y también por su tratamiento químico.

En condiciones estáticas y con tiempos largos de exposición los lodos tienden a desarrollar una gelatinosidad excesiva provocando:

- Dificultad de circulación.
- Canalización de cemento.
- Daño a la formación.

Derrumbes de las paredes del pozo.

Los derrumbes de las paredes del pozo se presentan durante las operaciones de perforación y/o acondicionamiento del pozo para la introducción y cementación de las tuberías de adorno.

Su origen es provocado por:

- Presencia de arcillas deleznales, las que se deslavan por una mala selección del tipo de lodo.
- Falta de un buen acondicionamiento químico a base de reductores de filtrado.
- El grado de compactación de la formación.
- La alta humedad de las rocas en contacto con el fluido de perforación.
- La caída de presión en secciones reducidas (collares de perforación), lavando y estratos poco consolidados. Esto se da por un mal diseño hidráulico de la perforación.

Atrapamiento de tuberías.

Al presentarse los derrumbes debido a lo antes mencionado, el material que va al fondo acuña a la tubería por el movimiento rotatorio de la perforación y puede llegar a romperse la sarta de perforación.

Si llegara a romperse la tubería se deberá recurrir a una operación llamada de pesca, para recuperar las tuberías rotas, estas operaciones son difíciles y muy riesgosas, sino es satisfactoria esta operación se puede llegar a perder el pozo o a desviarlo.

Otra causa de atrapamiento de tubería puede ser ocasionada por una formación de enjarre con un alto coeficiente de fricción, esto provoca un pegamiento de tuberías por presión diferencial de perforación, principalmente, en las secciones donde tienen contacto los collares de perforación.

#### Fallas del equipo.

Las bombas de lodo son las que comúnmente fallan debido al desgaste de sus partes (cañisas, embolos, empaques...) ocasionado por la erosión que causan los sólidos contenidos en el lodo. Estos sólidos deben ser removidos para que el desgaste sea mínimo.

Las barrenas se descalibran por las altas temperaturas en que están trabajando. Ésta es también una falla del equipo.

#### Pegaduras de Tuberías.

Las arcillas limpias en ocasiones son hidratables por que se ha observado que después de haber perforado y acondicionado el agujero para correr la tubería de revestimiento, ésta a veces no baja libremente y no se toma la decisión de sacar la tubería a tiempo, sino que se sigue forzando a bajar, llegando el momento en que no baja a la profundidad programada y al momento de sacarla, está pegada por la arcilla hidratable, debido a que ésta provocó una disminución del diámetro en una zona o en todo lo largo del agujero.

A veces para iniciar el movimiento de la sarta a fin de sacarla a la superficie hay que aplicar un esfuerzo semejante al esfuerzo límite admitido por la resistencia de los tubos, o incluso en el intento de eliminar la pegadura, se aplica un esfuerzo alto y la sarta se rompe, cuando ésto llega a suceder se debe proceder a recuperar la fracción de tubería atrapada en el fondo por medio de una pesca.

Una causa del problema anterior puede ser la excesiva presión de la columna del fluido de perforación y a la desviación misma del pozo pues casi siempre están fuera del límite permisible. Si la sarta de perforación permanece en reposo en el pozo, ésta descansará contra la pared del bajo la acción del componente de la fuerza de gravedad, al mismo tiempo los engranes filtrantes en los intervalos formados por rocas permeables, se compactarán, bajo el peso de la sarta pues la permeabilidad y humedad de éstos disminuye por el efecto de la temperatura.

A consecuencia de la fuerte compactación del engrane en la zona de contacto, se dificulta la penetración del filtrado del fluido de perforación en esa zona. Por eso, la presión que ejerce la columna de líquido sobre la sarta, resulta mucho mayor que la presión de capa que es transmitida a esta última, a través de la zona compacta del engrane. De este modo, surge una fuerza que oprime aun más la sarta

contra las paredes del pozo y que depende de la magnitud del aumento de presiones y el área de contacto de los tubos con el enjarre filtrante y compacto, así como el tiempo que la sarta permanece en reposo.

#### Pérdidas del Diámetro de la Barrena.

En formaciones abrasivas las barrenas sufren un desgaste lateral más rápido que en el frente, causando así que los agujeros que son perforados tomen una forma cónica obligando a repasar el agujero con una barrena nueva y con la consiguiente pérdida de tiempo. El desgaste mencionado origina que la arena se meta por la unión, en la zona de baleros, ocasionando el desgaste de los mismos.

Por otra parte, las altas temperaturas en el fondo y el aumento de la fricción provocan que los cojinetes experimenten temperaturas mucho más alta que la del cuerpo de la barrena. Se ha observado que cuando las temperaturas de la formación están cerca de  $240^{\circ}\text{C}$ , el cuerpo del rol de fricción experimenta temperaturas hasta de  $540^{\circ}\text{C}$ , ésta excede el rango de  $260 - 316^{\circ}\text{C}$ , en el cual se presenta un ablandamiento importante en el acero. Normalmente, este fenómeno resultante de las superficies de los cojinetes, reduce la vida útil de la barrena en 20 y 25%. De este modo, los costos del pozo son aumentados sensiblemente por la necesidad de un número mucho mayor de los viajes requeridos para su cambio y la reducción de la velocidad de penetración al estar perforando. Es importante considerar que la mayoría de los yacimientos existen en formaciones duras y semiduras, en donde la penetración es lenta y el desgaste del equipo es alto.

#### IV.5.- Importancia de los fluidos de control.

Su importancia es tal que sin ellos no sería posible haber alcanzado las profundidades perforadas, debido a las altas temperaturas que prevalecen en estas formaciones (geotérmicas).

Se debe entender como fluido de perforación cualquier mezcla empleada en la producción y acarreo de recortes producidos durante la perforación de un pozo.

#### Funciones.

El fluido debe proporcionar el flujo y la potencia hidráulica para limpiar el agujero, la barrena bajo ciertas condiciones dadas de aplicación de peso y velocidad de rotación, por lo tanto el fluido

debe cumplir con las siguientes funciones para que sea un lodo adecuado.

a) Levantar los recortes y transportarlos a la superficie.

Esta fue la primera función de los fluidos de perforación, en la actualidad sigue siendo la más importante de todas.

Uno de los principales aspectos en la perforación, es la de obtener un valor óptimo en el ritmo de penetración. Para alcanzarlo, es importante el acarreo y transporte adecuado de los recortes, de acuerdo con el tipo de barrena, peso, velocidad de rotación y programa hidráulico.

El fluido de perforación deberá proporcionar un flujo adecuado para crear una turbulencia, a través de la barrena, que levante y transporte instantáneamente los recortes perforados; de otra forma, la velocidad de penetración será reducida, a causa del remolinamiento de estos recortes por la barrena.

El levantamiento de los recortes depende principalmente de las características reológicas del lodo y su velocidad. El valor del punto de cedencia deberá controlarse, para obtener el óptimo desplazamiento de los recortes a la superficie.

b) Enfriar y Lubricar la Barrena.

Durante la perforación se produce considerable calor debido al contacto de la barrena con la formación. El calor producido se transmite al fluido de perforación, el cual por circulación, es llevado a la superficie en donde es disipado. El fluido de perforación también contribuye a lubricar la barrena y reducir la fricción de ésta y de la sarta de perforación con la formación. La mayoría de los fluidos de perforación contienen diferentes aditivos (bentonita, polímeros, etc.) que ayudan a reducir la fricción al enfriar y lubricar la barrena y sarta de perforación.

c) Transmisión de potencia hidráulica a la barrena.

El fluido de perforación es el medio por el cual se transmite la potencia hidráulica a la barrena.

Un fluido cuya viscosidad en la barrena se aproxima a la del agua, disminuirá las pérdidas de presión por fricción y aumentará la potencia hidráulica disponible a la barrena. Esto se debe a que mientras más baja viscosidad tenga un fluido, menos pérdida por

fricción en las paredes del pozo tendrá, ya que le será más fácil el movimiento y, por lo tanto, aumentará el rendimiento de la potencia hidráulica disponible.

d) Controlar las Presiones de la formación.

Durante la construcción del pozo la densidad del fluido de perforación debe adecuarse para controlar cualquier presión de la formación y evitar el flujo de los fluidos de la formación hacia el pozo, además de dar un cierto margen de seguridad mientras se efectúa un viaje de tubería. Sin embargo, la densidad no debe de ser tan alta ya que se pueden crear excesivas presiones diferenciales, las cuales disminuirán la velocidad de penetración y podría cuasar una pérdida de circulación, así como una posible pegadura de tubería.

e) Mantener la Estabilidad en las Paredes del Pozo.

Estabilizar las paredes del pozo mientras se perfora a través de formaciones inestables, es una de gran importancia. Las causas de la inestabilidad en las formaciones pueden ser numerosas y son diferentes en cada Área.

Estas causas deben quedar bien definidas, para así poder formular un fluido de perforación con los requerimientos físicos y químicos que permitan evitar el problema. Para asegurar la estabilidad del agujero, el enjarre, la densidad, el flujo y la actividad química del lodo deberán ser ajustados.

f) Facilitar la Toma de Registros Eléctricos, Presión y Temperatura.

El lodo debe suministrar un medio apropiado para evaluar las formaciones a través de los registros eléctricos.

Para tomar los registros eléctricos se requiere que el fluido de perforación sea un medio conductor eléctrico, que permita obtener las propiedades eléctricas de los diferentes fluidos de la formación.

La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida del fluido de perforación se ha desplazado al interior de la formación, o bien si el flujo altera las propiedades químicas o físicas del agujero.

g) Sustentación de la Sarta de Perforación y de Revestimiento.

A medida que los yacimientos se van buscando cada vez más profundos, el equipo se ve sometido a cargas muy grandes con el fin de llevar a cabo las operaciones; una de las formas de aligerar las cargas en el

equipo de perforación es por medio del efecto de flotación, que experimentan las tuberías cuando se ven sumergidas en el lodo, dicho efecto será mayor cuando sea más elevada la densidad. Esta técnica de reducción de peso se debe aplicar con un criterio muy amplio y teniendo un completo conocimiento de las estructuras geológicas que vamos a perforar. Para evitar pérdidas de lodo, pegaduras de tubería por presión diferencial.

Para la determinación de la sustentación de la sarta de perforación por el fluido, se seguirá la siguiente secuencia, considerando la tensión que obra en una determinada sección de tubería, como base de estudio.

sea:

$h(\text{pie})$  = sección de tubería.

$w(\text{lb/pie})$  = peso unitario de la tubería.

El peso ó fuerza de tensión que obra siempre y cuando la tubería se encuentre libre ó colgada sin fluido de perforación es:

$P(\text{lb})$  = peso ó fuerza de tensión.

$$P = w \times h$$

Cuando la tubería se sumerge en un fluido de perforación, ésta comienza a perder peso debido al empuje ascendente que actúa en ella, por lo cual la fuerza de tensión será:

$$T(\text{lb}) = w(\text{lb/pie}) \times h(\text{pie}) - E$$

$E$  = Empuje ascendente provocado por el lodo bajo la sección considerada.

El valor de ( $P$ ) puede determinarse conociendo el área de la sección de dicha tubería y la densidad relativa del acero (agua=1) que es 7.83(adimensional), del cual se deduce:

$$P(\text{lb}) = A(\text{pie}^2) \times h(\text{pie}) \times 62.4(\text{lb/pie}^3) \times 7.83$$

$A(\text{pie}^2)$  = Área de la sección transversal de la tubería.

$h(\text{pie})$  = altura de la sección de la tubería.

$62.4(\text{lb/pie}^3)$  = densidad del agua.

El valor de ( $E$ ) puede ser determinado de la misma forma, en este caso se considera la densidad relativa del lodo(6m) (agua=1).

$$E = A \times h \times 62.4 \times 6m$$

$$T = P - E$$

$$T = A \times h \times 62.4 \times 7.83 - A \times h \times 62.4 \times 6m$$

$$T = A \times h \times 62.4 (7.83 - 6m)$$

$$T = A \times h \times 62.4 \times 7.83 (1 - 6m/7.83)$$

como  $P = w * h = A * h * 62.4 * 7.83$

Entonces se tiene :

$$F = w * h * (1 - Gm/7.83) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

$(1-Gm/7.83)$  se conoce como factor de flotación, que afecta a la tubería al estar en contacto con el fluido de perforación. La ecuación (1), expresa para determinar la tensión neta que actúa en una sección cualesquiera dentro del pozo, es necesario multiplicar el peso de la tubería por el correspondiente factor de flotación.

En el caso de no tomar en cuenta el medio en que está sumergida la tubería, por considerar que es en el aire en donde se encuentra la tubería, el factor de flotación será igual a 1.

#### h) Suspensión de los Recortes Cuando se Interrumpe la Circulación.

La suspensión de los recortes se efectúa principalmente cuando la circulación del fluido es detenida por un tiempo determinado durante un viaje de tubería, o por cualquier otra causa. Los recortes que no han sido removidos deben quedar suspendidos, ya que de lo contrario, caerán al fondo causando problemas al meter nuevamente la tubería de perforación e intentar reanudar la perforación esto reducirá la velocidad de penetración al producir un atascamiento de la barrena con los recortes asentados.

La velocidad de asentamiento de una partícula a través del fluido de perforación, depende de su densidad, así como de la viscosidad y gelatinosidad o tixotropía del lodo de perforación.

La gelatinosidad previene el asentamiento al reducir el grado de caída de las partículas; sin embargo, altas gelatinosidades requerirán de altas presiones de bombeo para iniciar la circulación. Debido a esto se deberá programar, antes de hacer cualquier operación, las propiedades del lodo que convengan para un cierto objetivo. En algunas ocasiones, se puede dejar de perforar y circular antes de sacar la tubería de perforación, a fin de limpiar el agujero de recortes y presumir el asentamiento de éstas durante el viaje de la tubería.

#### IV.b.- Principales componentes de los fluidos de perforación

Los principales componentes de los fluidos de perforación son agua, aceite y aire, y pueden estar presentes dos o tres de éstos, para dar ciertas características que se requerirán para la perforación.

Se pueden clasificar según sus componentes:

- Lodos base agua.

Se denominan así cuando la fase continua es agua. Son los lodos más comúnmente usados.

Los principales componentes de estos lodos son:

- a) Sólidos activos (arcillas: bentonita y Atapulgita los cuales se hinchan con el agua.
- b) Sólidos inertes (Sulfato de Bario, Arena....) éstos no se hinchan con el agua.
- c) Fase química (Sales de la formación, productos químicos para el tratamiento del lodo y los que se adicionan al agua de repuesto).

Lodos base aceite.

En estos lodos la fase continua es el aceite. Son poco empleados por ser más costosos que los anteriores. Son utilizados cuando se presentan lutitas que se hinchan con el agua.

Fluidos aerreados.

Como fluidos aerreados se emplean aire, gas natural, niebla, vapor o lodos aerreados con ellos se logra una mayor velocidad de penetración y se reducen los problemas por pérdida de circulación.

El equipo de perforación es prácticamente el mismo que el convencional solo que se cambian las bombas por compresoras.

Estos fluidos presentan algunas desventajas:

- Fuerte erosión de la sarta por la alta velocidad de los recortes.
- Se pueden provocar derrumbes por la ausencia de la formación de enjarre y esto a su vez provocar un pescado.
- La corrosión sobre la sarta provocada por los gases es mayor.
- Puede crearse un problema de atascamiento debido a la humectación de los recortes acumulados debido a los fluidos de las formaciones atravesadas.

#### IV.7.-Consideraciones en la preparación y prueba de las formulaciones de los lodos base-agua a nivel de laboratorio

Durante la deformación de las propiedades de los fluidos de perforación el mayor problema ha sido plantear una metodología apropiada para la preparación de éstos. Con esto se persigue obtener resultados reproducibles y congruentes en fluidos de igual

composición. Con la preparación de los fluidos de perforación en el laboratorio se persigue:

- Determinar su comportamiento.
- Reunir ciertas normas específicas.
- Que sirva como fluido base para evaluar adelgazadores, reductores de filtrado u otros aditivos.

Los métodos tradicionales no han sido satisfactorios debido a que:

- Los fluidos son muy sensibles al tiempo y violencia de la agitación durante la rutina de mezclado (normal).
- La gelación de éstos se presenta cuando las propiedades de los fluidos no alcanzan hasta ese momento un valor constante.

Es de gran importancia conocer los porcentajes de agua y bentonita para la preparación y evaluación de los fluidos de perforación. Con ésto se realizarán pruebas piloto variando los porcentajes de concentración para encontrar las proporciones adecuadas de estos componentes y de esta manera obtener buenos resultados.

Mezclado.

Esta es una parte esencial durante la preparación del fluido de perforación.

Tipos de mezcladores.

Estos se seleccionan dependiendo del volumen de fluido que se va a preparar.

- Hamilton Beach: Maneja un volumen menor de 450 ml.
- Mezclador Multimixer: Prepara 5 lodos diferentes al mismo tiempo los cuales son de un volumen menor de 450ml cada uno.
- Mezclador Premier: Maneja un volumen máximo de 40 litros.

Reología.

Esta propiedad nos muestra el comportamiento de flujo del fluido al adicionarle un aditivo y someterse a condiciones simuladas de pozo. La medición de esta propiedad se puede realizar por medio de los viscosímetros de cilindros concéntricos rotacionales tipo Fann, Reómetro Baroid, Reómetro Fann 39B para temperaturas.

Balanza de lodos.

Mediante estas balanzas se mide la densidad del fluido de perforación.

Filtro Prensa API.

Es utilizada para determinar la filtración o pérdida de agua del fluido hacia la formación pero a temperaturas altas (750°C).

Determinación del Coeficiente de Lubricidad.

El fluido de perforación proporciona lubricación a la sarta de perforación. Es importante verificar que exista esta lubricación porque durante la etapa de sacar o meter la sarta la fricción es alta. El coeficiente de lubricidad nos indicará la calidad del lubricante. Este se describe como el coeficiente de fricción de un anillo de prueba rotando en el lodo a 50 rpm contra una superficie metálica (anillo) a 760 lb/pq<sup>2</sup>.

Contaminación en los sistemas de lodos base agua.

La contaminación de los lodos provoca el aumento en las propiedades fisicoquímicas de éstos como son el punto de cedencia, goles, viscosidad plástica, y pérdidas de filtración del fluido.

Los efectos de la contaminación se comienzan a notar con el paso del tiempo.

Para tener un buen control sobre los contaminantes se deben realizar pruebas de las propiedades de los fluidos, los resultados de estas pruebas servirán para realizar un trato con ellas y saber su comportamiento con el tiempo desde que comienza la contaminación.

Es importante realizar mediciones químicas o cuantitativas para la determinación del tipo de contaminación y de esta forma poder decidir cual será su tratamiento para corregirla.

IV.8.-Principales contaminantes químicos.

La contaminación puede incrementarse lentamente tal vez por una pequeña y continua alimentación o posiblemente, como un aditivo contaminante del lodo durante cierto tiempo. Eventualmente, el efecto se observa por floculación del lodo dispersado en el pozó. A menudo el efecto del contaminante se nota con el tiempo cuando el lodo es más susceptible a cambios, como por ejemplo al perder su efectividad los adelgazadores o después de permanecer en reposo por tiempos demasiado

largos bajo condiciones del fondo del pozo o quizá una adición ligera semejante a un flujo de agua salada, el cual provoca que se corrobore como un problema del lodo. Por ésto se considera indispensable conservar bien registradas las pruebas de las propiedades del lodo desde el inicio gradual de la contaminación. La mejor manera de identificar rápidamente es observando tales síntomas y tratando diariamente las propiedades del lodo cuando se considere importante para el pozo. También las pruebas piloto a temperatura pueden señalar cuando un contaminante está causando problema.

- Contaminación por Calcio.
  - Sulfato de Calcio y Anhídrita.
  - Cemento y/o Cal.
  - Agua Dura, Agua Salobre y Agua de mar.
  
- Contaminación por Cloruro de Sodio.
  - Flujo de Agua Salada.
  - Agua de Mar.
  - Damos de Sal.
  
- Contaminantes por alteración Alcalina.
  - Carbonatos Solubles.
  - Bicarbonatos Solubles.
  - Sulfuros Solubles.
  - Hidrosulfuros Solubles.
  
- Contaminantes peligrosos.
  - Sulfuros Solubles.
  - Hidrosulfuros Solubles.
  - Gas sulfídrico.

Éstos contaminantes actúan sobre la arcilla en agua y algunos de ellos caen en dos de los casos anteriores y aumenta la dificultad de tratamiento, en algunos de los lodos no será por esto posible remover los contaminantes.

El medio ambiente en el fondo del pozo provoca que el lodo se comporte de una manera rara en sus propiedades fisicoquímicas y es por ésto que se complica la detección del tipo de contaminante que está actuando.

#### IV.9.-Terminación del pozo geotérmico.

Principales factores para diseño de la T.R.

El diámetro de la T.R. esta sujeto a:

- Costo.
- Problemas durante la perforación y la cementación de pozos de gran diámetro
- Límites por colapso
- Problemas durante la producción.

Una vez seleccionado el diámetro de la T.R. se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a) Se debe usar un acero que oponga una gran resistencia a la corrosión, trabajo extremo y posibles fisuras por corrosión-esfuerzo causado por el  $H_2S$ .
- b) Seleccionar el peso y grado de tubería utilizando cálculos de tensión, estallamiento y colapso.
- c) Emplear copios API del tipo Buttress o Premium para prevenir la fatiga o fallas inducidas térmicamente y en último caso se deberán eliminar los huecos de acoplamiento para proteger el metal de la corrosión.

#### Temperatura.

Consideraciones en el diseño derivadas de la temperatura.

- Temperatura máxima desde la superficie hasta el fondo del pozo.
- El perfil geotérmico de temperatura estática.
- La variación máxima de temperatura a la cual estará sujeta la sarta.

En este trabajo solo se referirá a los yacimientos que caigan en el rango de temperaturas de  $90^{\circ}C$  a  $427^{\circ}C$ .

La consideración de temperatura máxima a lo largo del pozo hará variar algunos parámetros como son: Tipo de acero, resistencia, diseño de la lechada y mecanismo de cementación.

Es muy importante conocer el gradiente de temperaturas del pozo en el diseño de la T.R. porque estas temperaturas son empleadas para cálculos del diseño de ésta.

Los límites inferior y superior de la temperatura influyen principalmente en la resistencia del acero y en el diseño del modelo de esfuerzos.

Como el operador tiene control sobre la temperatura mínima entonces se tiene control sobre el modelo de esfuerzos.

Forma de identificar las tuberías de revestimiento.

Cuando las tuberías han perdido las marcas de colores de fabrica se pueden identificar mediante un troquel que tienen en el extremo de cada tubo donde va la caja.

El troquel y los colores indican las siguientes características de los tubos:

Diametro.- Exterior o interior (el diámetro exterior no cambia aunque la tubería sea de diferentes pesos)

Grado.- Es la composición del acero o el material conque está fabricado el tubo.

Rango.- es la longitud del tubo.

Peso.- Es el correspondiente a la unidad de longitud, ya sea en kg/m o lb/pie.

Junta.- Es la unión o caja integral o con cople que tiene el tubo en cada extremo (con cople o sin cople e integral).

Drift.- Es la medida que el fabricante recomienda como diámetro interior garantizado o como diámetro de trabajo.

Rosca.- Es el maquinado que se le hace a cada tubo en los extremos, los hay de diferentes tipos:

Redonda.

Buttress.

Armco.

Hydryl.

Mannesman.

Dependiendo del tipo de ángulo en las roscas.

Los tipos Buttress, Armco, Hydryl y Mannesman tienen ventaja sobre la redonda, porque resisten mayor tensión que la que resiste el propio cuerpo de la tubería. La rosca del depende de la resistencia y el grado del mismo.

A mayor diámetro de tubería menor resistencia a todos los esfuerzos.

Diseño de Tuberías de Revestimiento (Youngtown).

El diseño de tuberías de revestimiento es un problema netamente de ingeniería, que requiere un análisis cuidadoso para lograr resultados satisfactorios en los aspectos técnico y económico. De no cumplirse lo anterior, el diseño puede ser inadecuado para el pozo de referencia y consecuentemente pueden tenerse problemas en el futuro. Por esta razón al elaborar el diseño deben tomarse en cuenta los

trabajos a que va a estar sometida la tubería durante la perforación y la terminación del pozo. Se sabe que cuando se termina un pozo la tubería de revestimiento de explotación está sujeta a los máximos esfuerzos, ya sea por las operaciones que se efectúan o bien por las temperaturas y presiones generadas por los fluidos aportados por el yacimiento, además es necesario que el par de apriete de las tuberías al introducirse al pozo, sea el adecuado para el grado, diámetro y tipo de rosca de que se trate, va que esto es propiamente el complemento del diseño. El diseño se basa comúnmente en la profundidad, pero en algunas ocasiones existen zonas geopresurizadas o de presión anormal que deben tomarse en cuenta.

#### Descripción de las Gráficas.

Las gráficas de este método constan de partes, una al lado derecho denominada I y la del lado izquierdo denominada II. (Se incluyen gráficas para diferentes diámetros de T.R. al final del capítulo).

La gráfica I contiene una serie de curvas compuestas por dos ramas, una inferior con pendiente menor y otra superior con pendiente mayor, la rama inferior representa el esfuerzo al colapso efectuado por las cargas longitudinales debido a la tensión de acuerdo a la teoría de la elasticidad y los esfuerzos biaxiales. La rama superior de la misma gráfica representa el esfuerzo a la tensión y no es continuación una de otra, porque el punto superior de ésta corresponde a una presión cero; En esta curva se encuentran marcados los diversos puntos que corresponden a los tipos de juntas y roscas que más se usan en la industria mismas que están afectadas por el factor de seguridad de 1.8 para las T.R. de 7 5/8pg. se tienen L. J. B. BE.

La gráfica II contiene una serie de curvas que representan la densidad de los fluidos de control que varía de 0.8 a 0.25 gr/cc así como profundidades de 0 a 7000 m. Para diseñar una tubería de revestimiento se deben vigilar dos conceptos muy importantes o sea si la tubería no se va a introducir flotando, esto es que la flotación no se toma en cuenta, y cuando se diseña tomando en cuenta la flotación debida únicamente a la tubería, en el fluido de que se trate sin tomar en cuenta el equipo de flotación con que se ha equipado.

Para el primer caso considérese que la tubería está flotando en el aire, o sea, en un pozo vacío, y en el segundo que está flotando parcialmente, debido al empuje del fluido de control en que se ha

introducido.

#### Uso de las Gráficas.

Con la gráfica II se inicia el diseño de la tubería, basta para ello conocer la densidad del fluido de control en el pozo y la profundidad a que se va a introducir la T.R.. Una vez conocidos estos datos, se multiplica la densidad en el fluido por el factor de seguridad al colapso (1.125), el valor que se obtenga se fija en la gráfica. En este punto se levanta la línea que se denomina Línea Programa, y es paralela a las demás que indican densidades, con la línea anterior trazada y a la profundidad a que se va a introducir la tubería de revestimiento, se tiene un punto de intersección entre ambas líneas, se proyecta horizontalmente hasta el margen izquierdo de la gráfica I. Este punto indica la primera tubería que se introduce al pozo 'A'. A continuación se busca el punto de intersección de la línea punteada con la Línea Programa (si no se considera el efecto de flotación). El punto de referencia se proyecta horizontalmente hasta el eje central de ambas gráficas (I y II). Este punto propiamente es la base del diseño, y se conoce como punto pivote 'P'.

Si se desea considerar el efecto de flotación, el punto anterior 'P' se obtiene con la intersección de la línea de flotación y la Línea Programa.

La determinación de la Línea Programa se obtiene por medio de la ecuación siguiente para una tubería de 10000 pies.

$$L = 3048.78 \frac{9 + p_{vs}}{p_{vs} - p_{wa}}$$

donde:

L: Longitud de la tubería suspendida en el fluido con densidad  $w_a$ .

$p_{vs}$ : Densidad del acero (7.853 gr/cc).

$p_{wa}$ : Densidad del fluido de control (gr/cc).

Ahora bien, como ya se tienen determinados los puntos básicos 'A' y 'P' para iniciar el diseño, a continuación se procede a su desarrollo.

#### Desarrollo del Método.

En la gráfica I se trazan tantas rectas como pesos de tubería de revestimiento se requieran, éstas parten del punto pivote 'P' y se termina en la parte superior de la misma gráfica, donde están indicados los pesos de las tuberías (39.0, 33.7, 28.7, 26.4) en el

caso de la gráfica para T.R. 7 5/8pg.

Enseguida se trazan rectas paralelas a las anteriores, el origen de la primera paralela es el punto 'A' y termina su trazo al cruzar la curva más cercana que representa gradopeso de la misma gráfica. El origen de la línea es el cruce de la anterior, y así sucesivamente se van trazando líneas hasta que la última de ellas intercepte el margen superior de la gráfica.

Una vez determinados estos puntos, se proyectan horizontalmente hasta la Línea Programa de la gráfica II, donde posteriormente son proyectados paralelamente a las líneas de profundidades hasta el margen de la gráfica II donde se leen las cantidades de tubería que se requieren de cada grado.

En realidad aquí termina la elaboración del diseño, pero hay que hacer la revisión por el esfuerzo a la tensión, colapso y presión interna, y si es necesario hacer los cambios a las tuberías que se requieran.

#### Revisión a la Tensión.

La revisión a la tensión de la tubería de revestimiento es muy importante, para esto es necesario determinar el peso total de ésta. La forma práctica y rápida de hacerlo, es proyectar verticalmente el punto de intersección de la última paralela, hasta la parte inferior de la misma gráfica I.

Ahora bien, si el peso de la tubería que resulta de esa proyección es mayor que el valor que indica las tablas del manual (para la tensión afectada por su factor 1.2), se debe cambiar la tubería por otra de mayor resistencia, hasta que el valor de dicha tabla sea mayor que el determinado por la gráfica.

El procedimiento anterior se repite hasta que los valores registrados en la tabla del manual, para la tubería que se está revisando, sea mayor que el peso de ésta.

#### Revisión por Colapso.

Como el colapso es otro de los esfuerzos a que está sometida la tubería de revestimiento, por tanto debe hacerse una revisión.

Para esto se determina la presión hidrostática máxima en el espacio anular.

Este dato se obtiene proyectando horizontalmente el punto 'A' previamente determinado, hasta el margen derecho de la gráfica I, que

representa la escala de presiones al colapso.

Si el valor determinado es mayor que el que resiste la tubería de revestimiento en el fondo del pozo, afectado por el factor (1.00 a 1.12) se procede a su cambio, por otra de mayor resistencia a este esfuerzo.

Por lo general esto no sucede, ya que siempre su factor es mayor de 1.00.

#### Revisión por Presión Interna.

La tubería de revestimiento también estará sometida con frecuencia a esfuerzos por presión interna, ya sea durante la perforación o terminación del pozo, por tal motivo es importante conocer estos esfuerzos antes de elaborar el diseño.

De no saberse, cuando menos es conveniente indicar cual es la presión interna de trabajo que pueden soportar las tuberías de diferentes grados y pesos que se han diseñado, para no correr el riesgo de dañarla (reventarla) cuando se hagan trabajos con presión interna en ella.

Para obtener lo anterior, consúltense los manuales que existen para estos casos, y al valor obtenido de esas tablas aféctese por el factor de seguridad (1.25 - 1.1).

#### Comprobación del Diseño de la Tubería de Revestimiento.

1.- En una hoja de papel milimétrico elíjase las escalas, una vertical para las profundidades y dos horizontales una en la parte superior para la tensión y otra en la parte inferior para el colapso.

2.- Una vez seleccionadas las escalas, determine el valor del punto que representa la tensión máxima en el eje vertical (profundidad) el cual corresponderá al último tramo de tubería que se ha introducido al pozo, es decir la sección de tubería que está a menor profundidad. En la escala horizontal superior que corresponde a los valores de tensión, determine el valor del punto que corresponde a la tensión del último tramo de tubería que se introdujo.

3.- Dicho punto determinado únase con el punto de la profundidad en el que se ha quedado la zapata que se lleva la tubería. Esta línea recta representa la variación del esfuerzo a la tensión respecto a la profundidad.

4.- Ahora en el eje horizontal inferior, que corresponde a los valores del colapso, búsquese el punto que corresponde al valor máximo

al colapso, el cual corresponde al primer tramo de tubería introducido porque como ya lo mencionamos anteriormente el esfuerzo al colapso es máximo en el fondo del pozo.

5.- Ya determinado este punto de máximo esfuerzo al colapso, se une con el punto que tenga menor valor al colapso en el eje vertical de profundidades que corresponde al último tramo de tubería introducido, esta línea recta nos representa la variación del esfuerzo al colapso respecto a la profundidad.

Una vez que se tienen trazados los ejes a escala se procede a efectuar la comprobación gráfica de la siguiente manera:

a) Revisión a la tensión.

Del valor indicado por el diseño real, determínese el que corresponde al de la tubería superficial, bájase una vertical hasta interceptar la proyección de la siguiente horizontal, y únase por medio de rectas como se muestra en la figura 17.6.

Si estas líneas no se interceptan en ninguna parte de la línea que representa a las tensiones, esto indicará que el diseño es correcto, pero si existiera alguna alguna intersección deberá de cambiarse el tramo de tubería por otro que tenga mayor resistencia a este esfuerzo.

b) Revisión al Colapso.

El procedimiento para revisar por colapso es similar al anterior, la única diferencia es que en el eje horizontal de los valores del colapso está en la parte inferior. Si al trazar estas líneas se intercepta a la línea que representa al colapso, deberá cambiarse este tramo de tubería por ser incorrecto su diseño por otra de mayor resistencia al colapso.

Para que el diseño de la tubería sea correcto, para el caso del esfuerzo a la tensión, todas las intersecciones deberán quedar abajo de la líneas que representa a este esfuerzo (tensión).

Para el caso del esfuerzo al colapso, todas las intersecciones de las líneas deberán quedar arriba de la línea que representa al esfuerzo al colapso.

Diseño de T.R para Pozos Geotérmicos (altas temperaturas).

Con anterioridad se mencionó que la temperatura afecta el diseño de las T.R., esto afectará directamente el tipo de material de la

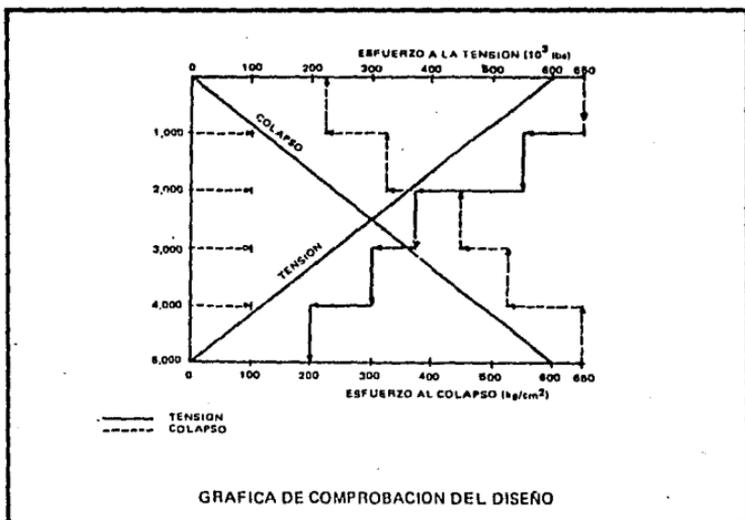


FIG. IV. 6

tubería, los procedimientos de instalación y las condiciones de operación dentro del pozo, a continuación se incluyen ecuaciones que se deberán emplear para calcular algunos aspectos en el diseño de la T.R.

#### Tensión Axial.

La tensión axial en la T.R. variará notablemente al cambiar la temperatura, del pozo desde la perforación, producción hasta la inyección. Las ecuaciones para determinar la variación en el esfuerzo de tuberías confinadas debido a los cambios en la temperatura se incluyen a continuación. La tabla 4.1, por ejemplo el gradiente geotérmico durante la producción para el pozo HGPA, la temperatura cerca de la superficie varía desde 26°C (50°F) durante la producción hasta los 38°C (100°F) cuando está cerrado, esto puede ocasionar un cambio en los esfuerzos por compresión de 82800 psi en tubería confinada. La pre-tensión de la T.R. durante la instalación puede reducir este cambio máximo hasta cerca de 4500 psi en tensión (pozo frío) o compresión (pozo productor con diámetro 9 5/8 pg., 43.5 lb/pie N-80 pre-tensionado a 565000 psi.). La reducción en el nivel de esfuerzo también es benéfico para reducir los problemas de corrosión.

#### Pre-tensión.

Se deben tomar dos precauciones cuando se considera la pretensión.

- 1.- La inyección del fluido al pozo puede causar que la tubería sea sobretensionada y falle.
- 2.- La carga en el cabezal del pozo debe ser la adecuada para deslizamiento, su ecuación es mostrada a continuación.

La pre-tensión requiere que la T.R. sea anclada, esto puede realizarse mecánicamente de otra tubería, sin embargo las condiciones de diseño normalmente requieren anclarla en agujero descubierto, esto puede ser hecho mediante el uso de un cople de cementación múltiple como el mostrado en la figura IV.7

Por ejemplo para pre-tensionar con 565000 lb. tubería de 9 5/8 pg. en el cemento, requieren una longitud bien cementada de solamente 40 pies para un cemento con 1500 psi de resistencia de compresión. En la práctica se necesita tener cuando menos 100 pies de tubería cementada para asegurar 40 pies de cemento bueno (lavar la T.R. para quitar la grasa de fábrica, el centrado de la tubería en el pozo y el uso de raspadores incrementa la adherencia del cemento a la tubería a la

formación).

Otra ventaja utilizando este tipo de técnica en la cementación es que se reducen los esfuerzos compresivos. con una larga columna de cemento denso en el espacio exterior de la tubería se induce una considerable carga de compresión. se debe notar que con respecto a la deformación de la tubería no hay fuerzas compresivas debidas a la presión ocasionada por las diferencias en la densidad de los fluidos en el exterior y el interior de la T.R., no obstante estamos involucrando cargas compresivas para propósitos de resistencia. En la gráfica podemos notar que para una T.R. de 9 1/2 pg de diámetro y 43.5 lb/pie a 5000 pies cementada convencionalmente tendrá una carga por compresión a los 5000 pies de 14.019 psi (el cemento con densidad de 16.2 lb/gal desplazado genera una fuerza neta hacia arriba de 17600 lb. sobre un área en la pared de la T.R. de 12.56 pg<sup>2</sup>). por lo tanto la T.R. n-80 podrá permanecer segura solamente hasta cerca de los 121°C (250°F) en el cambio de temperatura (suponiendo una reducción del 85% en la resistencia debido a la temperatura).

IV.10.-Cuidados en la Selección de la Tubería para Pozos Geotérmicos. Actualmente la tubería para pozos geotérmicos normalmente se compra a proveedores de tubería con especificaciones API. El comprador y el instalador deben estar perfectamente familiarizados con las normas API Spec 5A y Spec 5AC. dado que las tuberías en los pozos geotérmicos será fabricadas bajo estas especificaciones. Cuando se adquiere la tubería el fabricante debe proveer las propiedades físicas y químicas necesarias para la tubería. también el método de fabricación debe ser conocido (templado o normalizado). La documentación con las propiedades físicas y químicas puede ser usada para asegurar que la tubería cumple con las especificaciones. Se debe notar que la dureza no es una propiedad física requerida bajo las especificaciones para la fabricación de la tubería 1-55 el que es un material utilizado generalmente en los pozos geotérmicos. Se debe tener cuidado de que los coples sean del mismo material del tubo, especialmente si la tubería se compra de tercera o cuarta mano. Si es posible el cople colocado en la fábrica debe ser instalado con un buen sellador de tipo geotérmico. En el campo obviamente se debe utilizar un sellador tipo geotérmico al armar e introducir la T.R. dentro del pozo. Las marcas deberán cumplir las especificaciones API

TABLA 1

SUMARIO DE ECUACIONES PARA DETERMINAR VARIOS ASPECTOS EN TUBERIAS

DE REVESTIMIENTO PARA POROS GEOTERMICOS.

TEMPERATURA:

ESFUERZO:	$S_t = -209 \Delta t$
TENSION:	$\Delta F = -209 \Delta t \times A_s$
LONGITUD:	$\Delta L = (6.9 \times 10^{-5}) \times \Delta t \times L$
DIAMETRO:	$\Delta D_o = (6.9 \times 10^{-5}) \times D_o \times \Delta t$
"P.P.":	$\Delta T = 2.27 \times w \times M_p \times (T \times D_o^2 / I)^{1/2}$

TEMPERATURA PROMEDIO:

$$\Delta t_{av} = (t_{D_2} + M_2 \times D) - (t_{D_1} + M_1 \times D) \Delta D / \Delta D$$

DESPLAZAMIENTO DE LA TUBERIA:

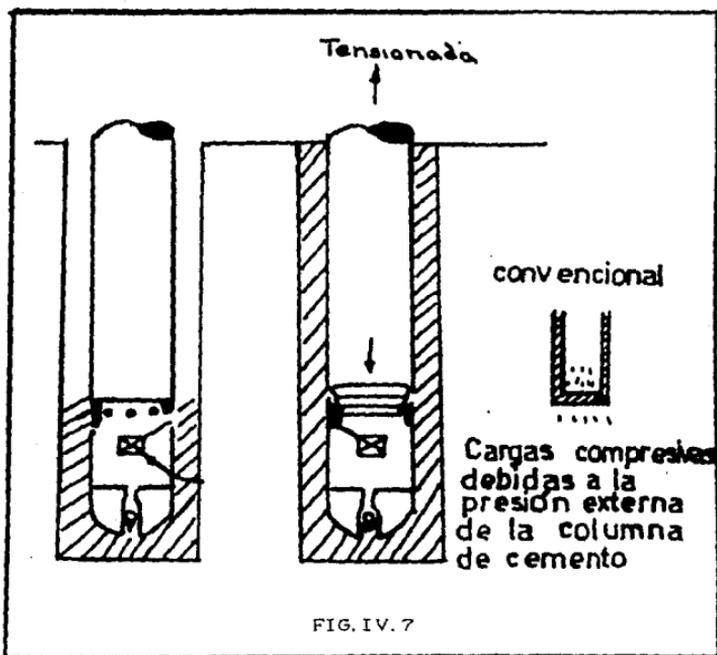
$$F_{CS} = [1 + (R_1 \times 2.3 / L_1) + (R_2 \times 2.3 / L_2)]^{2.1-1/2} \times (1 / A_s \times T_2)$$

CARGA PARA EL CORTE DE ADHESION:

$$F = 0.969 \times S_{CNT} \times D_o \times L_o$$

DONDE:

$A_s$ = AREA DE LA PARED DE LA TUBERIA (Pg <sup>2</sup> )	$M_2$ = PENDIENTE DE LA CURVA DE TEMP. EN 2
$D$ = PROFUNDIDAD (pie)	$M_1$ = RADIO DE LA TUBERIA
$D_o$ = DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA (Pg)	$S_t$ = ESFUERZO DEBIDO AL CAMBIO DE TEMP. Psi
$\Delta D_o$ = CAMBIO EN EL DIAMETRO (Pg)	$S_{CNT}$ = ESFUERZO COMPRESIVO DEL CEMENTO Psi
$D_i$ = DIAMETRO INTERIOR DE LA TUBERIA (Pg)	$\Delta t$ = CAMBIO DE TEMPERATURA
$E$ = MÓDULO DEL ACERO (Psi)	$t_{D_1}$ = TEMPERATURA A LA CONDICION I
$F_{CS}$ = CARGA MAXIMA DE DESPLAZAMIENTO (lb <sub>f</sub> )	$t_{D_2}$ = TEMPERATURA A LA CONDICION 2
$\Delta F_t$ = CAMBIO EN LA CARGA AXIAL (lb <sub>f</sub> )	$\Delta T$ = CAMBIO EN LA TENSION lb <sub>f</sub>
$I$ = MOMENTO (Pg <sup>4</sup> )	$T$ = TENSION lb <sub>f</sub>
$L$ = LONGITUD DE LA TUBERIA (pie)	$M_p$ = PESO DE LA TUBERIA lb/pie
$L_s$ = LONGITUD DEL DESPLAZAMIENTO	$V_s$ = CEBADENCIA MINIMA Psi
$M_1$ = PENDIENTE DE CURVA DE TEMPERATURA A CONDICION I	$w$ = PATA DE FERRO "P.P." (°/100 pies)



o aquellas especificadas por el proveedor y tomarse cuidado en que lleguen al pozo la tubería y los coples apropiados.

Se requiere de personal experimentado en comprar e instalar estas partidas especiales para asegurar que se compra un producto de calidad y se instala apropiadamente. El personal responsable de esto debe estar familiarizado con las normas API Spec 5A, Spec 5AB, las prácticas recomendadas RP 5C1 y los boletines BUL 5A2, BUL 5C1, BUL 5C3, BUL 5T1. Además los fabricantes y proveedores son una buena fuente de información.

**Tipos de Materiales empleados en Cementación de Pozos Geotérmicos.**

Los materiales utilizados para la cementación de tuberías de revestimiento en pozos geotérmicos se clasifican como sigue:

**A) Cemento Base.**

Es un material en forma de polvo sin aditivos comúnmente llamado cemento Portland. El API tiene clasificados 10 tipos de cemento para pozos petroleros (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) mientras la ASTM tiene clasificados 5 tipos de cemento para la construcción (I, II, III, IV, V).

Para pozos geotérmicos se pueden utilizar los tipos G, H, y J.

**Función básica.**- Material que al mezclarse con la cantidad apropiada de agua posee propiedades cementantes. Puede utilizarse sin aditivos en pozos con temperaturas hasta 77°C. Para mayores temperaturas deberán agregarse aditivos retardadores y estabilizadores para temperatura.

**Composición Química.**-El cemento base es el producto del Clinker que está compuesto principalmente por Silicato Tricálcico (C3S), Silicato Dicálcico (C2S), Aluminato Tricálcico (C3A) y Ferroatuminato Tetracálcico (C4FA).

**B) Estabilizadores para Alta Temperatura.**

Compuestos inorgánicos con alto contenido de Silice cristalina.

Se puede utilizar: Arena de Silice y Harina de Silice.

**Función Básica.**- Mantener la resistencia a la compresión y la permeabilidad del cemento fraguado en valores aceptables, evitando así la degradación del mismo.

**Composición Química.**- Silice en forma de Cuarzo.

### C) Aceleradores de Fraguado.

Salas inorgánicas en general.

Se pueden usar los siguientes materiales: Cloruro de Calcio. Cloruro de Sodio. Sulfato de Calcio. Mezcla de Cloruro de Calcio y Clorometano. Silicato de Sodio, HA-5, Diacel A y Yeso.

Función Básica.- Reducción del tiempo de fraguado del cemento (WOC). Se aplican para ahorrar tiempo y dinero.

Composición Química.- Compuestos inorgánicos, principalmente:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaSO}_4$ .

### D) Retardadores de Fraguado.

Derivados de lignina, Sacarosa, Celulosa y sales orgánicas.

Se emplean compuestos como: Supercaltes, Spersene, etc.

Función Básica.- Aumentar el tiempo disponible para bombear la lechada al pozo durante la operación de cementación, además mejora las propiedades de flujo de las lechadas.

Composición Química.- Cromolignosulfonatos de Calcio modificados, Borax, y sales orgánicas.

### E) Reductores de Densidad.

Materiales que requieren grandes cantidades de agua y/o poseen gravedades específicas menores de 1.00.

Se pueden usar: Bentonita, Perlita, Esterolita, Gilsonita etc.

Función Básica.- Reducir el peso de la columna hidrostática y evitar pérdidas de circulación durante la cementación.

Composición Química.- Montmorillonita Cálcica, Silicato de Sodio y derivados del Asfalto.

### F) Reductores de Fricción.

Polímeros orgánicos de cadena larga.

Se pueden emplear bajas concentraciones de Supercaltes, Lignex y Spersene porque estos aditivos son retardadores muy enérgicos.

Función Básica.- Mejora las propiedades de flujo, reduciendo la potencia necesaria en las bombas para inyectar y desplazar la lechada durante la operación de cementación.

Composición Química.- Cromolignosulfonatos de Calcio modificados, Borax y sales orgánicas.

G) Densificantes.

Materiales compatible con las lechadas. Con densidades mayores de 4.0 gr/cc.

Se pueden emplear los siguientes materiales: Barita, Hematita, Ilmenita y reducir la relación agua-cemento.

Función básica.- Incrementar la densidad de la lechada para controlar altas presiones de formación o alcanzar altas resistencias en tapones.

Composición Química.- Sulfatos de Bario, Hierro etc.

H) Controladores de Filtrado.

Polímeros de cadenas largas, derivados de Celulosa.

Se utilizan: CMC, CMHEC, etc.

Función Básica.- Prevenir deshidratación de las lechadas y mejorar la distribución del cemento en el espacio anular.

Composición Química.- Carboxil Metil Celulosa, Carboxil hidroxietil-celulosa.

I) Controladores de Zonas con Pérdida de Circulación.

Materiales fibrosos, granulares o laminillas.

Obturantes: Granulares, sello automático, etc.

Bagazo de: Caña, tequila, etc.

Función Básica.- Sello de zonas con pérdidas de circulación para permitir seguir perforando o realizar una operación de cementación.

Composición Química.- Celulosa, Celofán.

J) Homogenizadores.

Arcillas hidrófilas.

Materiales como: Bentonita.

Función Básica.- Evitar la sedimentación en las lechadas cementantes y reducir el filtrado a bajas presiones.

Composición Química.- Montmorillonita de Calcio.

Pruebas de Laboratorio

1.- Preparación de la lechada .

Aparatos uno de los aparatos utilizados son las balanzas. La carga indicada en las balanzas sera con una tolerancia de 0.1%. El recíproco de la sensibilidad no será mayor del doble de la tolerancia permisible para la exactitud de la balanza.

Las probetas graduadas deberán ser lo suficientemente grandes para medir y vaciar, en una sola operación el volumen requerido de agua de mezcla de 20°C (68°F); la variación en volumen no excederá de ±0.2%. Las graduaciones estarán subdivididas por lo menos cada 5ml.

El mezclador para la preparación de lechada de cemento será de tipo hélice con dos velocidades, capaz de dar 4000 rpm (66.7 rev/s), sin carga en la velocidad baja, y 12000 rpm (200 rev/s) en alta. los recipientes utilizados y las aspas de las hélices estarán construidas de un metal resistente a la corrosión.

#### Tamizado.

La muestra de cemento que será probada deberá pasar a través de una malla No.20 (850 micrometro), para cumplir los requisitos dados en la norma ASTM E 11.

#### Agua de Mezclado.

Para Pruebas de referencia, se utilizara agua recién destilada libre de dióxido de carbono. Para pruebas de rutina, puede utilizarse agua potable. El porcentaje en peso de agua que debe agregarse para cada tipo de cemento debe ser conforme a los valores dados en la tabla siguiente.

Cemento Clase API	% de Agua en Relación al Cemento	Agua por Saco 50kg.	
		Gal.	Lt.
A,B	46	6.07	23.0
C	56	7.39	28.0
D,E,F,H	38	5.01	19.0
G	44	5.81	22.0
J	‡	‡	‡

‡ Según recomendaciones del fabricante.

#### Mezclado del Cemento y Agua.

La cantidad requerida de agua se colocará en el recipiente del mezclador, éste se accionará a una velocidad baja, la muestra de cemento se adicionará en un tiempo no mayor de 15 segundos, después de que todo el cemento ha sido adicionado al agua, se colocará la tapa en el recipiente y deberá continuar la agitación a velocidad alta durante 35 segundos.

## 2.- Determinación de Consistencia en la Lechada.

### Aparatos.

Consistómetro atmosférico: Este aparato se utilizara también para las determinaciones de contenido de agua libre, agua normal, agua mínima, pérdida de fluido y determinación de propiedades reológicas en la lechada.

### Preparación de los aparatos.

Limpieza y lubricación. Debe tenerse cuidado que todas las partes que están en contacto con la lechada de cemento estén limpias. Después de cada prueba, los cantos exteriores de las paletas deberán ser limpiados y cepillados con un cepillo de bronce. Las superficies que entré en contacto con la lechada deberán tener una capa delgada de grasa repelente al agua o aceite ligero antes de cada prueba.

### Procedimiento.

Llenado del aparato. La lechada se deberá verter rápidamente a la celda hasta el nivel de llenado que está indicado por una ranura al rededor del interior de la celda. Entonces se introducirá la paleta y la tapa colocada en su posición. Después se colocará el conjunto celda-tapa en el baño.

El intervalo entre la preparación de la mezcla y la puesta en marcha del aparato no debe exceder de un minuto. Después de 20 minutos de agitación se registrará la lectura indicada de la celda.

Consistencia de la lechada. La escala de cuadrante en la tapa de la celda está graduada en 10 partes iguales de torsión y las lecturas tomadas en esta escala deberán transformarse a unidades Bearden de consistencia Bc.

## 3.- Determinación del Agua Normal y Agua Mínima de Lechada.

### Procedimiento.

La lechada de cemento, preparada como se mencionó anteriormente se vacía inmediatamente al consistómetro atmosférico y se agita a 27°C (80°F) durante 22 minutos y al final se anota la consistencia. Se llevarán a cabo varias determinaciones variando la relación de agua y se realizar gráfica para establecer la cantidad de agua con las que se obtienen una consistencia de 11 Bc. El contenido de agua en la lechada que presente la consistencia de 11 Bc se designará como el

Contenido de Agua Normal.

El contenido de agua en la lechada que presente consistencia de 30 Bc se designará como Contenido de Agua Mínima.

#### 4.- Determinación de Agua Libre de la Lechada.

Procedimiento.

La lechada de cemento preparada como se mencionó anteriormente se vacía inmediatamente en un consistómetro atmosférico y se agita a 27°C (80°F) durante 20 minutos posteriormente la lechada se volverá a mezclar 35 segundos a alta velocidad en una mezcladora Warig Bledor. Posteriormente la lechada se utiliza para llenar una probeta de 250 ml, se tapa herméticamente para evitar la evaporación posteriormente, la probeta con la lechada se coloca en una placa de acero de 64 mm (1/4 pg) soportada por una placa de hule espuma de 25.4 mm (1 pg).

El agua sobrenadante en la lechada después de permanecer en reposo durante dos horas se extraerá ya sea decantando o pipeteando y se medirá en una probeta graduada de tamaño adecuado, el volumen se expresará en mililitros (ml) y se denominará Contenido de Agua Libre.

#### 5.- Determinación de la Densidad en la Lechada.

Procedimiento.

La densidad de la lechada de cemento se determinará mediante la balanza de lodos.

La copa de muestra se llena inicialmente con la lechada cuya densidad se determinará. La copa debe llenarse hasta un nivel ligeramente debajo del borde superior de la taza aproximadamente 0.64 mm (1/4pg). Colocar la tapa sobre la taza con la válvula checkadora fijada a la misma posición hacia arriba (abierta). Empujar la tapa hacia abajo con la boca de la taza hasta establecer contacto de entre el faldón interior de la tapa y el borde superior de la copa. Todo el exceso de la lechada será expulsado a través de la válvula check, cuando la tapa se ha colocado en la copa, empujar la válvula check hacia arriba en la posición cerrada, limpiar la taza y las cuerdas con agua, y atornillar la tapa roscada en la taza.

Una vez que la muestra de lechada está sometida a presión ahora se determinará su densidad. El exterior de la taza debe lavarse bien.

Entonces el instrumento debe colocarse en el borde de la cuchilla. La pesa deslizante debe moverse de derecha a izquierda hasta equilibrar el brazo. El brazo está equilibrado cuando la burbuja queda centrada

entre las dos marcas negras finalmente, se obtiene la densidad leyendo una de las cuatro escalas en el lado de la flecha que indica la pesa corrediza. La densidad puede leerse directamente en unidades de lb/gal, ps/1000pie, lb/pie, gr/cm.

#### 6.- Resistencia a la Compresión.

##### Procedimiento.

Después de preparar la lechada conforme al procedimiento API se coloca en moldes previamente preparados, se coloca una cantidad igual a la mitad de la profundidad del molde y es apisonada 25 veces por muestra con una varilla sedimentadora. La lechada se coloca en todos los compartimientos de las muestras antes de comenzar la operación. Después de sedimentar la capa, la lechada se agita para eliminar segregación y se coloca la segunda capa en los moldes llenando hasta rebasar, después de la sedimentación, el exceso de la lechada se enrasa con una espátula hasta dejar uniforme la parte superior del molde. Se coloca la tapa en la parte superior del molde y se continúa preparando más moldes.

El período de curación es el tiempo transcurrido desde la introducción de las muestras en la autoclave hasta que se prueba la muestra para determinar su resistencia.

Los cubos son probados inmediatamente después de ser extraídos del baño con agua de enfriamiento. El procedimiento prueba es de acuerdo a la norma ASTM C109: Resistencia compresiva de morteros hidráulicos de cemento.

#### 7.- Propiedades Reológicas.

##### Procedimiento.

La lechada de cemento se prepara conforme al API se vierte inmediatamente dentro de una celda del consistómetro atmosférico el cual ha sido previamente calentado a la temperatura de prueba. La lechada de cemento debe agitarse entonces por un período de 20 minutos a la temperatura de prueba.

Transferir la lechada al vaso de muestra del Fann 35 (vaso y cilindro deben de estar a la temperatura de la prueba) con un mínimo de tiempo. El vaso para la muestra y la lechada son mantenidos a la temperatura final del programa durante la duración de las pruebas, con el motor girando a 600 rpm, levantar el vaso precalentado que contiene la lechada hasta que el nivel del líquido este en la línea

de llenado.

La lectura inicial a 600 rpm se toma 20 segundos después de la rotación continua. Anotar las lecturas del dial para las velocidades de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm (10, 5, 3.3, 1.7, 0.10 y 0.05 rev/seg) en ese orden. Cada velocidad del rotor se cambiará a la velocidad inferior siguiente con intervalos de 20 segundos. Cada lectura del dial es tomada exactamente antes de cambiar a la siguiente velocidad más baja.

#### Tiempo de Espesamiento.

El tiempo de espesamiento sirve para conocer el tiempo que una lechada permanece en estado fluido bajo ciertas condiciones de laboratorio. de esta manera, sirve para comparar varios cementos además se pueden reproducir las condiciones reales en un pozo y determinar el tiempo de bombeo disponible. Con una lechada se simulan las condiciones de calentamiento que tiene el cemento durante la operación de cementación en el pozo para realizar las pruebas de tiempo de espesamiento a la temperatura de circulación en el fondo, prueba de resistencia a la compresión a la temperatura ambiente y presión atmosférica.

#### Procedimiento.

La lechada preparada conforme al API se vierte en la celda invertida. Durante esta operación de llenado la lechada debe agitarse ligeramente para evitar que ocurra una segregación. Cuando la celda está llena completamente, se atornilla el fondo, debiendo asegurarse de que la celda quede completamente sin aire.

El tiempo transcurrido entre la aplicación inicial de presión y temperatura con el aparato hasta cuando la lechada alcanza una consistencia de 100 Ec, se reporta como el tiempo de espesamiento para el lodo en el programa de prueba o en la simulación de pozos. Para los programas que implican temperaturas de 93°C (200°F) o mayores, se permite detener la prueba a una consistencia aproximada de 70 Ec y extrapolarla para obtener un valor de 100 Ec, mediante la graficación de los resultados.

Los resultados de las pruebas de espesamiento se registran en formas de reporte de laboratorio, graficando las unidades Ec correspondientes cada intervalo de tiempo

#### Prueba de Permeabilidad.

La prueba de permeabilidad se realiza con los siguientes pasos:

- 1.- Se aplica una presión diferencial de 1.4 a 14 kg/cm. (20 a 200 lb/pg) para inyectar agua a través de la muestra.
- 2.- El agua es circulada por la muestra por un tiempo máximo de 15 minutos o hasta cerca de 15 ml.
- 3.- El gasto de flujo se mide por lo menos dos veces.

La permeabilidad al agua de la muestra de cemento fraguado se calcula con la ecuación de Darcy:

$$k = Q * \mu * L / A * \Delta p$$

donde:

k = Permeabilidad en D.

Q = Gasto en cm/seg.

$\mu$  = Viscosidad del agua en cp.

L = Longitud de la muestra en cm.

A = Área transversal de la muestra en cm.

$\Delta p$  = Caída de presión en atm.

Se hace entonces el rebote de la permeabilidad al agua en darcys.

#### IV.11.- Tipos de Cementación

##### Cementación primaria.

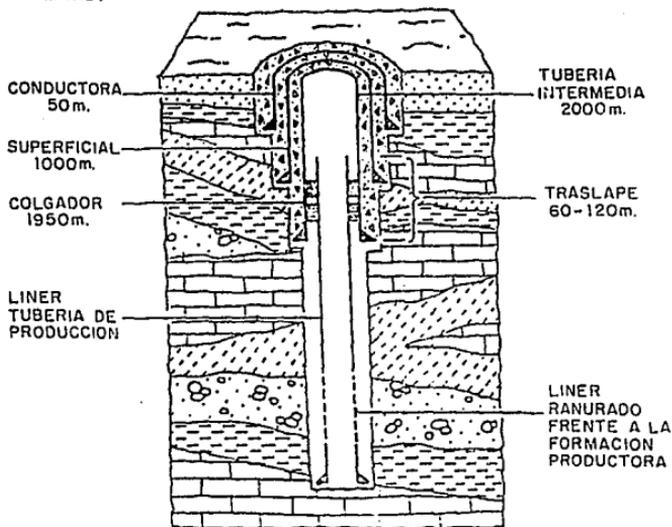
La cementación de tuberías realizadas normalmente durante la perforación de los pozos geotérmicos es llamada cementación primaria, esta ocupa un lugar muy importante. Una buena cementación de la I.R intermedia es necesaria para todos los trabajos subsecuentes (operaciones que se efectúen en el pozo) Cuando dicha cementación es deficiente todas las operaciones que se realicen son seriamente afectadas, por tal motivo deberá corregirse antes de programar cualquier trabajo relacionado con la terminación del pozo.

Estas cementaciones tienen el objetivo de llenar el espacio entre y el agujero, dicho espacio se conoce como espacio anular, ver fig. IV.8.

La lechada de cemento una vez transcurrido su tiempo de fraguado puede atrapar herramientas. En algunos casos ha originado la pérdida total del pozo o bien operaciones costosas para recuperar alguna herramienta atrapada.

Por ésto antes de iniciar cualquier operación, el ingeniero responsable de la cementación, debe corroborar que el cemento por

TUBERIAS :



TUBERIAS DE REVESTIMIENTO EN UN POZO GEOTERMICO

FIG. IV. 8

utilizar reúna las características necesarias para efectuar la operación con éxito de no cumplirse esto, es preferible que la cementación no se realice, para no tener problemas posteriores.

Las funciones principales de este tipo de cementaciones son:

1.- Soprtar la T.R.

El cemento utilizado para llenar el espacio anular, debe tener buena adherencia a la tubería que es completamente lisa. Si se utilizara un cemento inadecuado seguramente no se adherirá a la tubería y causará que se despegue pudiendo caer o dilatarse excesivamente en la superficie.

2.-Aumentar la Resistencia de la T.R.

Las presiones que se manejan en un pozo geotérmico son muy altas, superando en ocasiones las 7000 lb·pg<sup>2</sup>, por lo que si no se contara con la columna de cemento en el espacio anular la tubería de revestimiento se rompería escapando el vapor por el espacio anular hacia la superficie.

3.- Evitar Contaminación de Acuíferos con Fluidos Geotérmicos.

A distintas profundidades de un pozo se encuentran acuíferos de distintas clases, es indispensable que estos acuíferos se mantengan aislados del fluido geotérmico para no restarle calidad. Además es importante no alterar las propiedades de los acuíferos pues los fluidos de perforación y los geotérmicos los contaminarían.

4.- Minimizar la Corrosión de la T.R. Reduciendo el contacto con los Fluidos de las Formaciones.

La pared del cemento que cubre la tubería de revestimiento reduce el contacto entre los fluidos de los acuíferos y la tubería, evitando de esa manera corrosión electroquímica. Los cementos utilizados deben mantener valores de permeabilidad bajos durante su vida productiva por este problema.

Una vez perforado hasta la profundidad deseada se extrae la tubería de perforación, y se corre una serie de registros (temperatura, presión, calibración, etc.). Posteriormente se introduce la tubería de revestimiento haciendo escalas cada 50 metros para circular lodo y se realiza la cementación mediante los siguientes métodos de cementación primaria:

Cementación de una Etapa .

Las tuberías generalmente se cementan en una etapa por el método de dos tapones en el cual la lechada se bombea por el interior de la

T.R. hasta el fondo del pozo, de ahí empieza a subir por el espacio anular desplazando al fluido de perforación y eliminando el enjarre de las paredes del pozo. En la fig. IV.9a se presenta este método y se describirá más ampliamente más adelante.

#### Cementación por Etapas.

Es aquella que se realiza en dos o tres partes, se utiliza en pozos que requieren columnas de cemento muy largas y se tienen formaciones débiles o zonas con pérdida de circulación durante la perforación, esto indica que las formaciones no soportarán la carga hidrostática de la lechada durante la cementación. Una desventaja de este método es que no se puede mover la tubería después de la primera etapa; esto incrementa la posibilidad de canalización y disminuye la remoción de enjarre de logo en las paredes. Ver fig IV.9b.

#### Cementación con tubería interna.

Cuando se cementa una tubería con diámetro grande se puede utilizar la tubería de perforación como medio de colocación de la lechada de cemento para reducir el tiempo de operación y con ello el tiempo de espera del cemento (tiempo que se deja fraguar 'WOC'), también reduce el intervalo de cemento por atravesar al continuar la perforación. Este método permite utilizar equipos de flotación y accesorios de cementación con diámetro pequeño. (ver fig. IV.9c).

#### Cementación Inversa.

Esta técnica se utiliza cuando no es posible bombear la lechada sin romper las formaciones débiles, provocando pérdidas de circulación durante la perforación. En esta método se bombea la lechada con alta densidad en el fondo del pozo y lechadas ligeras en la superficie. Ver fig IV.9d.

#### Cementación con Fraguado Retrasado.

En teoría este método permite mayor uniformidad de cemento sano en el espacio anular, ya que se coloca una lechada con tiempo de espesamiento muy grande y aditivos para controlar el filtrado en el pozo, mediante la tubería de perforación. Posteriormente se introduce la tubería de revestimiento forzando el cemento hacia el espacio anular. La desventaja de este método es que se requieren periodos largos de espesamiento, entre (18 y 30 hrs.) y en consecuencia

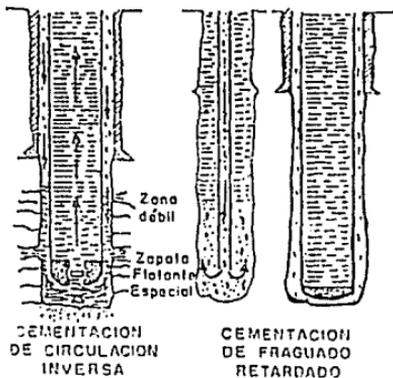
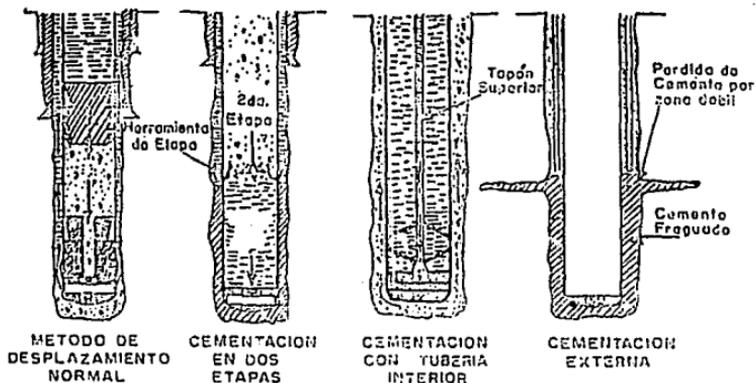


FIG. IV. 9

tiempo de espera muy grandes. Ver fig. IV.9e.

#### Secuencia de Cementación.

El primer tramo de tubería que se introduce al pozo lleva una zapata guía. (tapa de protección) para evitar dañar la T.R. al ser introducida en el pozo. Ver fig. IV.10(a).

Para que la tubería quede bien colocada en el agujero, se colocan centradores alternados (en un tubo sí y en el siguiente no). Al alcanzar el fondo con la tubería de revestimiento, se levanta la T.R. y se hacen las conexiones a la línea de cementación que comunica el cabezal con el equipo que bombea la lechada. (ver fig. IV.10(b,c)). El equipo de cementación (alta presión) consiste de un vehículo equipado con bombas y un tablero de control (consola) donde se registran los datos de presión, de bombeo, gasto y la densidad de la lechada.

Además de este equipo se utilizan silos o carros tanque con el cemento ya dosificado y con el agua de la mezcla, el número de éstos varía con la cantidad de cemento que se utiliza en la operación.

De los silos de cemento se envía al embudo (equipo de mezcla que en su parte inferior tiene suministro de agua a presión), en esta parte se forma la lechada que se envía a un tanque donde se homogeniza mediante agitación constante, de ahí la lechada se succiona con la bomba y es enviada al pozo. (ver fig. IV.10(h)).

Antes de iniciar el bombeo de la lechada se introduce en la tubería un tapón limpiador entre el cemento y el fluido de perforación para evitar que se contamine la lechada de cemento. El cemento se bombea a la presión necesaria para que sea capaz de desplazar al lodo y lo haga subir por el espacio anular. (ver fig. IV.10(f)).

Cuando se termina de bombear el cemento se mete otro tapón que es empujado por el fluido de desplazamiento hasta un cople que se coloca aproximadamente a 25 metros sobre la zapata. (ver fig. IV.10(g)).

Si en la operación no se presentan pérdidas por fracturas o fallas de calibración, la lechada cementante debe aflorar a la superficie en una cantidad igual al cemento que se metió.

#### Cementación de Tuberías Cortas o Liners.

Son diversas las causas que obligan a cementar una tubería corta, entre las más comunes se tienen:

- Problemas durante la perforación del pozo (pérdidas de lodo, intentos de pegadura, etc.).

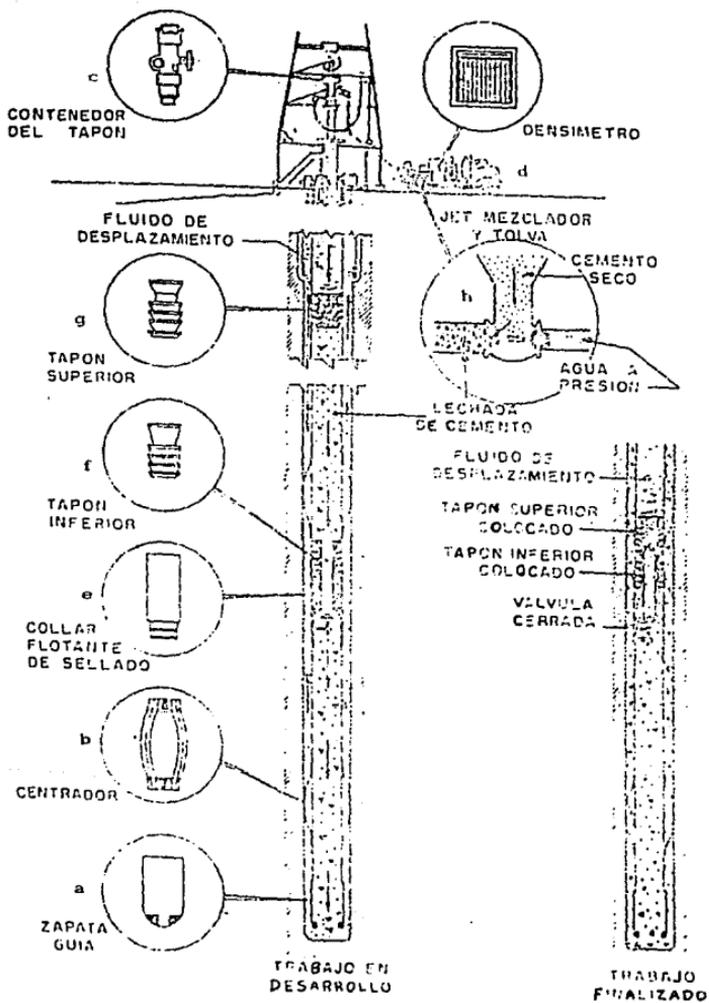


FIG. IV. 10 Diagrama de Cementación Primaria por el Método Convencional de Dos Taponos

- Altas presiones al continuar perforando y tener que incrementar la densidad del fluido de control.
- Límites en la capacidad del equipo de perforación para llegar al objetivo. Entonces se utiliza un diámetro en la barrena, aunque en los pozos geotérmicos no se presenta este problema debido a que las profundidades máximas por alcanzar, son alrededor de los 4000 metros.

Técnica para Cementar una Tubería corta.

Se baja la tubería corta hasta la profundidad programada se ancla y se comprueba el estado mecánico. Se mezcla la lechada, se suelta el tapón de desplazamiento y en seguida se bombea lodo de perforación, al alcanzar un volumen igual a la capacidad de la tubería de perforación, el tapón de desplazamiento llega al tapón limpiador, quedando anclado a él con un candado de bronce especial. Entonces la presión de desplazamiento se incrementa suficientemente para romper el perno de seguridad que detiene al tapón limpiador conectado al mandril inferior de la herramienta cementadora. Se continúa desplazando la lechada de cemento con lodo hasta que el volumen bombeado sea igual a la capacidad de la tubería corta, al llegar el tapón limpiador al cople de retención, se incrementará automáticamente la presión de bombeo, quedando accionado el candado del tapón limpiador al cople, haciendo las veces de la válvula de contra-presión.

Una vez terminado lo anterior se procede a levantar la tubería de perforación a la profundidad programada y se hace circulación inversa para desalojar el exceso de cemento. Por último se saca la tubería de perforación a la superficie con la herramienta cementadora.

Cementaciones Secundarias o Correctivas.

Las cementaciones secundarias son del tipo de cementación correctiva. (ver fig. IV.11)

Recementaciones por el espacio anular.

En algunos casos el volumen utilizado para llenar el espacio anular durante una cementación primaria no es suficiente debido principalmente a pérdidas de circulación la cual absorbió gran parte de la lechada impidiendo que aflore en la superficie. Otro caso por el cual no se llena completamente el espacio anular es que la lechada presenta alta sedimentación y/o se tengan estratos altamente

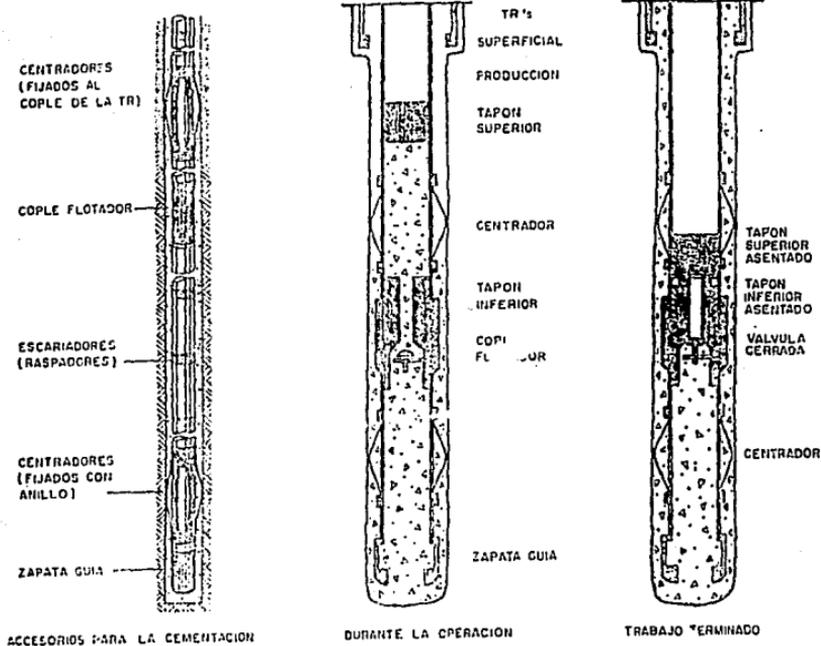


FIG. IV.11

permeables, entonces el cemento aunque durante la operación aflore a la superficie al fraguar se cuelga (baja su nivel en el espacio anular). Las técnicas para resolver estos problemas son:

- Meter un tubing por el espacio anular y se inyecta la lechada a presión, esta es muy difícil debido al espacio anular. (ver fig. IV.12.a).
- Cementación por gravedad empleando alta presión para reducir las bolsas de aire y/o fluido de perforación. (ver fig. IV.12b).
- Aplicar por gravedad arena de sílice que se suministra en forma intermitente para llenar el espacio anular que carece de cemento, como con la vibración de la T.R. al continuar la perforación y por gravedad se vaya acomodando en forma adecuada. Esta ha sido una solución aplicada en muchos pozos del campo Cerro Prieto con excelentes resultados.
- El método de los disparos, consiste en introducir un equipo especial hasta la profundidad indicada y realizar algunos disparos, los cuales hacen agujeros en la tubería. Por medio de estos agujeros se puede reestablecer la circulación para cementar normalmente pero esta técnica es muy poco efectiva ya que se dañan las tuberías y hay mayor posibilidad de colapso.

#### Cementaciones Forzadas.

La cementación forzada es el proceso en donde una lechada de cemento no contaminada se inyecta a una área específica del pozo; consiste en aplicar la lechada de cemento hacia una caverna o contra una formación porosa a través de la tubería de revestimiento, dando como resultado un sello entre la formación y la tubería. (ver fig. IV.12c).

Por lo tanto el objetivo de una cementación, es el aislamiento de una área en el pozo o controlar el flujo de fluidos entre las formaciones. Una cementación forzada se hace específicamente para:

- Separar zonas productoras de aquellas que producen fluidos indeseables.
- Reparar problemas de fugas de fluidos por la tubería de revestimiento.
- Sellar zonas de pérdida (leak).
- Abandono de zonas o de pozos agotados.
- Reparar una cementación primaria defectuosa.

La tecnología de la cementación forzada incluye conocimientos sobre

## ESTA TONDA NO DEBE SALIR DE LA CIRCULACION

el gradiente de fractura en las formaciones y las propiedades de filtración en las lechadas que son inyectadas contra un medio permeable.

### Tapones para Sellar Zonas con Pérdida de Circulación.

Es común encontrar intervalos con pérdida de circulación durante la perforación, para combatirlos, lo primero que se hace es localizar la profundidad de la fractura o zona de pérdida, ya determinada se coloca la tubería de perforación hasta dicha profundidad y se bombea la lechada por el interior de la tubería de perforación, posteriormente se levanta la tubería unos 15 metros del tapón y se circula fluido de perforación durante un cierto tiempo para eliminar los residuos de la lechada en la I.F. y el exceso dentro del pozo. (ver fig. IV.12d).

La composición de la lechada es especial y en su diseño se debe tener en cuenta principalmente la temperatura, el tamaño de la pérdida y el tipo de formación. El volumen de la lechada que se requiere está en función del volumen perdido durante la perforación.

Se espera el tiempo de fraguado en el cemento que puede ser de 30 minutos para realizar una prueba de presión, si ésta se mantiene entonces tuvo éxito la colocación del tapón repitiendo este proceso.

### Tapones para Abandonar Pozos.

Cuando un pozo no tiene una producción adecuada es decir, se tienen gases y/o salmueras altamente corrosivos se puede perder el pozo, entonces es mejor abandonarlo.

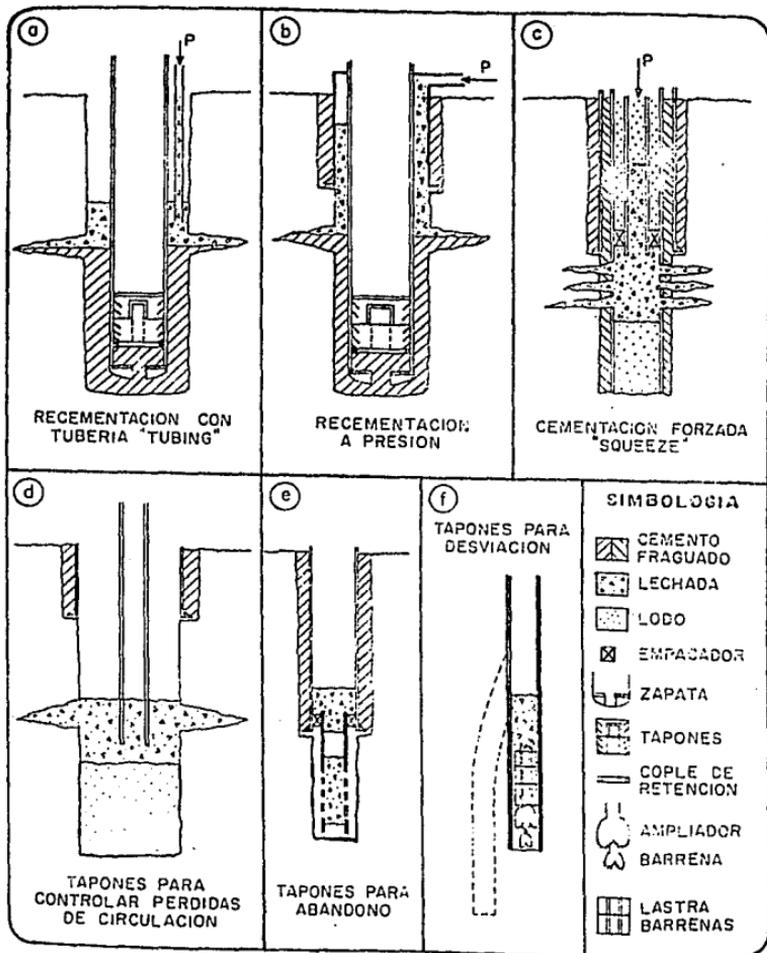
Para esto se cementa un tramo de unos 30 a 40 metros con cemento de rápido fraguado y alta resistencia en tal forma que el pozo no fluya. (ver fig. IV.12e).

### Tapones para Iniciar Perforaciones Direccionales.

En algunos pozos se puede presentar el siguiente problema: Después de haberse caído un tramo de tubería que no se pueda recuperar y tampoco se puede barrenar entonces, la solución más adecuada es desviar el pozo para lo cual es necesario cementar un tramo del pozo para cambiar la dirección que antes se llevaba. (ver fig. IV.12f).

### Problemas Relacionados con la Cementación de Pozos Geotérmicos.

De las observaciones efectuadas durante la perforación, terminación,



CASOS DE CEMENTACIONES SECUNDARIAS

mantenimiento y reparación de los pozos en los campos de Cerro Prieto, La Primavera, se detectaron los siguientes problemas relacionados con el cemento y su colocación:

1.- Mala adherencia del cemento.

La falta de adherencia del cemento a la tubería de revestimiento y/o a las formaciones se debe a la falta de acondicionamiento del lodo en el pozo o a una mala operación de cementación que ocasiona una deficiente remoción del lodo en el espacio anular por lo que el cemento no lo llena uniformemente, dejando bolsas de lodo que ocasionarán colapsos, cuando se inicie la producción además de proporcionar flujo de vapor a través del espacio anular. (ver fig. IV.13.a, e y f).

2.- Pérdida de circulación durante la cementación.

El problema de pérdida de circulación es causado por la presencia de zonas débiles donde la presión de bombeo más la hidrostática ejercida por la columna de cemento sobrepasan el gradiente de fractura de la formación con lo que el cemento se pierde dejando desprotegida a la T.R. (ver fig. IV.13b).

Una solución que se ha implementado a la fecha es el uso de lechadas más ligeras que las convencionales, con una densidad aproximada a la del lodo de perforación, utilizando aditivos como esferulita, perlita expandida, gilsonita etc. y con el empleo de espaciadores a base de silicato de sodio es posible realizar cementaciones con columnas de 2000 metros sin pérdidas de circulación, como ha sucedido en varios pozos en Cerro Prieto.

3.- Determinación de la cima del cemento.

Un problema grave es localizar la cima del cemento en el espacio anular después de que se presentó una pérdida de circulación durante una cementación primaria de T.R., como el cemento no aflora a la superficie, se requiere conocer donde quedó la cima de cemento en el espacio anular. (ver fig. IV.13.b y c).

Para resolver este problema se corren registros de adherencia y temperatura en las 8 horas posteriores a la cementación, por medio de éstos se logra determinar aproximadamente la profundidad hasta donde quedó el cemento. Posteriormente se utiliza alguna técnica de recementación.

4.- Excesivo tiempo de fraguado en los cementos utilizados.

El excesivo tiempo de fraquado en el cemento ocasiona un excesivo filtrado, asentamiento de la lechada y en ocasiones corrimiento del cemento, dejando la parte superior de la T.R desprotegida de los pozos. (ver fig. IV.13c).

#### 5.- Retrogresión de resistencia en pozos productores.

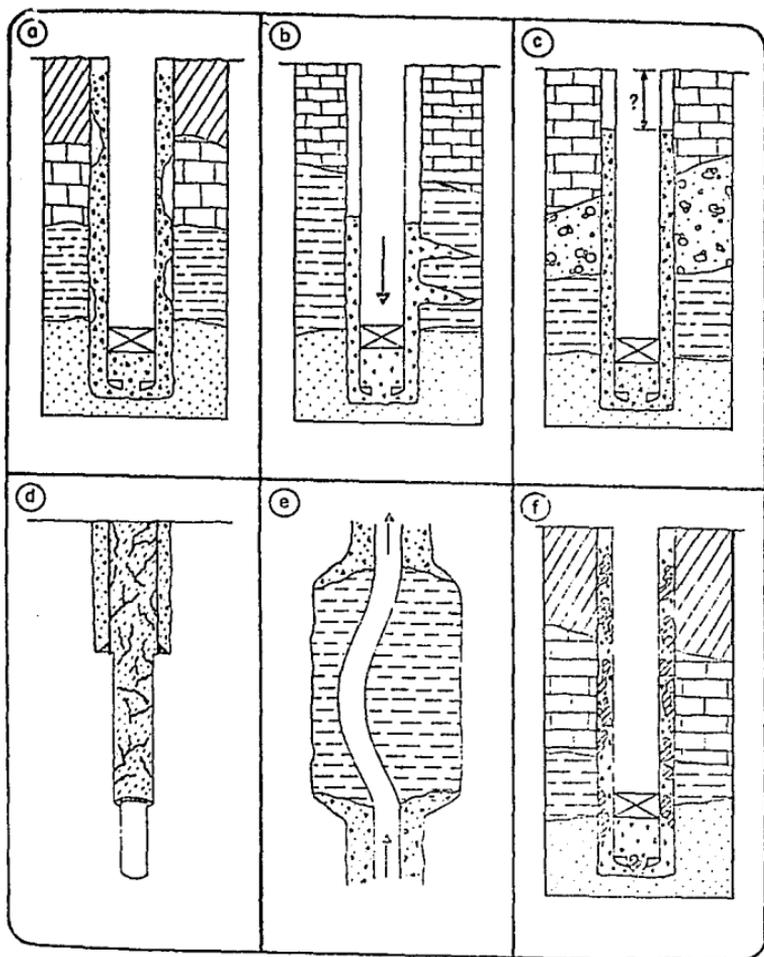
La retrogresión de resistencia se presenta en los pozos con más de 3 años de producción; y es el proceso de destrucción del cemento (disminuye su resistencia y se incrementa su permeabilidad) por lo que éste no cumple sus funciones. Entonces se presentan colapsos en secciones del pozo donde la tubería queda desprotegida. (ver fig. IV.13.d y e).

#### 6.- Empleo del cemento de construcción sin aditivos.

El cemento de construcción sin aditivos no es recomendable porque al entrar en producción el pozo, se calientan todas las tuberías y este cemento no soportará las temperaturas mayores de los 100°C, entonces se presentará anticipadamente el problema de retrogresión de resistencia. (ver fig. IV.13.d y e).

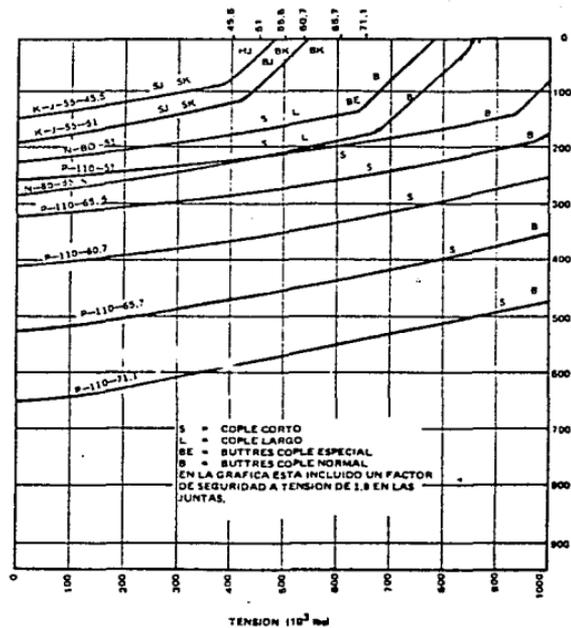
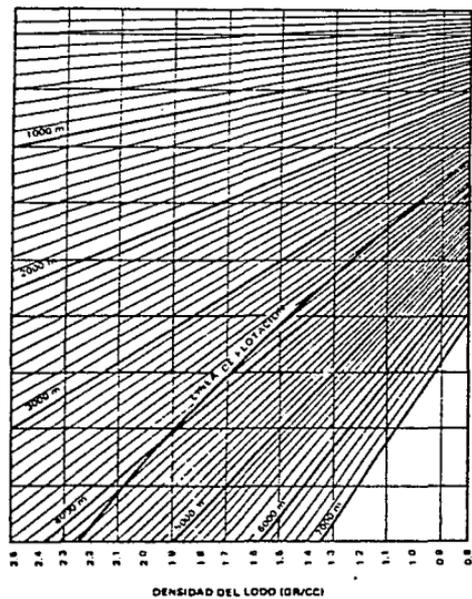
#### 7.- Empleo de salmuera en la preparación de la lechada.

El empleo de salmuera en la preparación de las lechadas puede acelerar el ataque del fluido geotérmico y degradar al cemento más rápidamente, además de modificar sus propiedades iniciales. (ver fig. IV.13f).

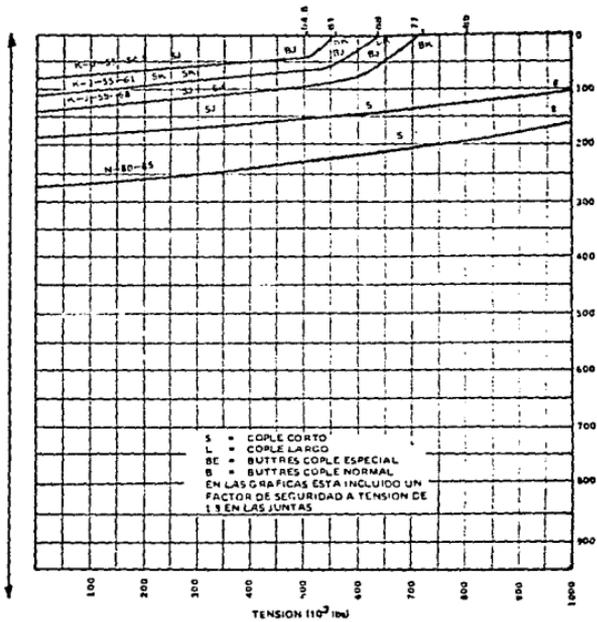
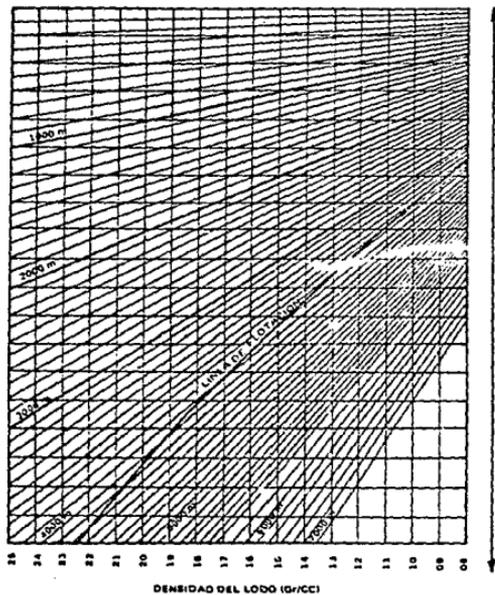


PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS CEMENTOS GEOTERMICOS

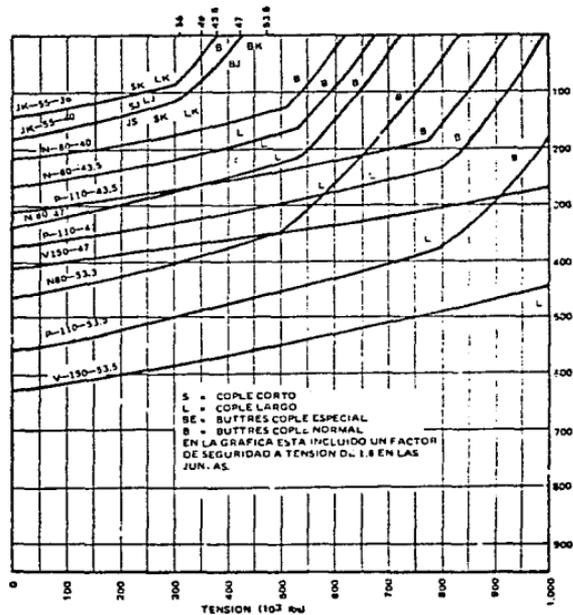
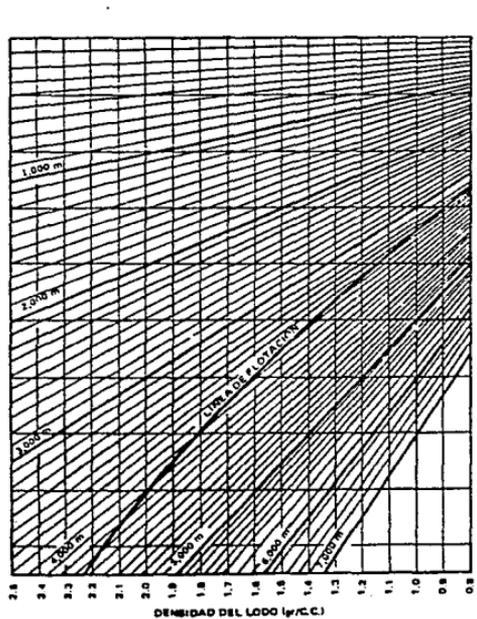
FIG. IV. 13



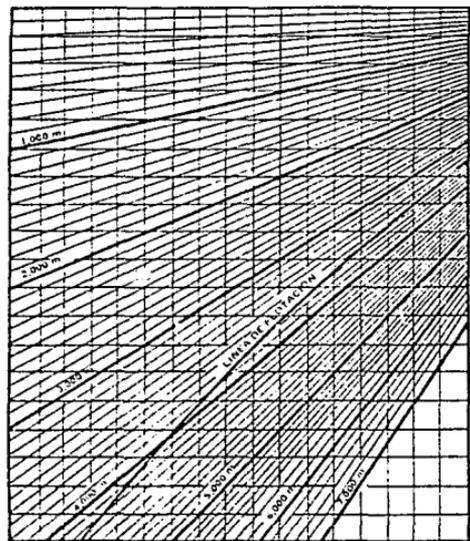
DISÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 10 3/4"



DISERO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 13 3/8"

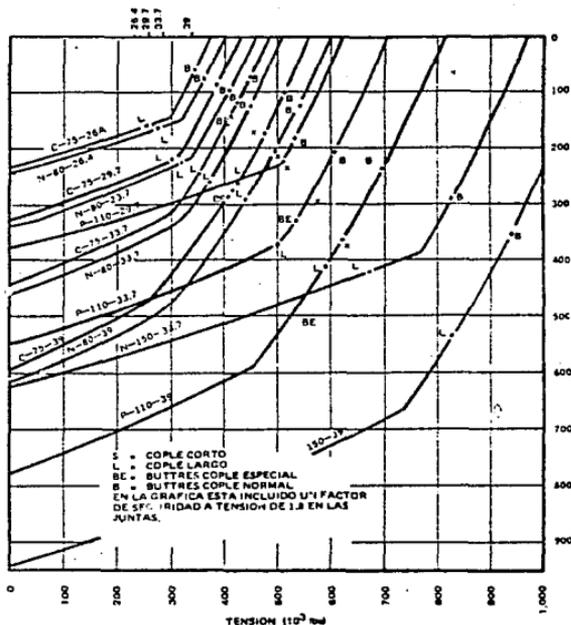


DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 9 5/8"

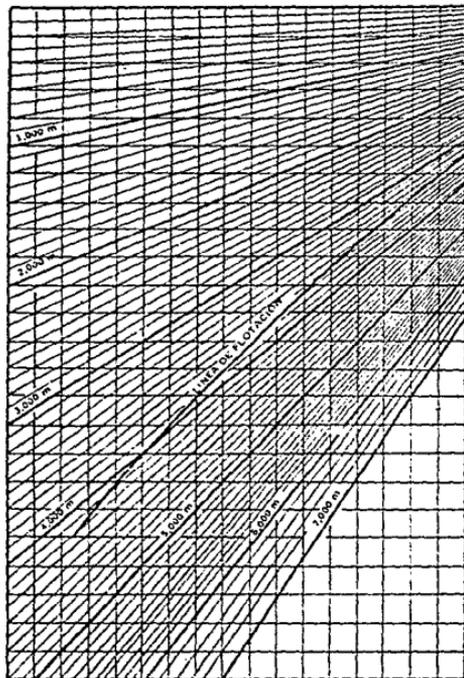


2.6  
2.4  
2.3  
2.2  
2.1  
2.0  
1.9  
1.8  
1.7  
1.6  
1.5  
1.4  
1.3  
1.2  
1.1  
1.0  
0.9  
0.8

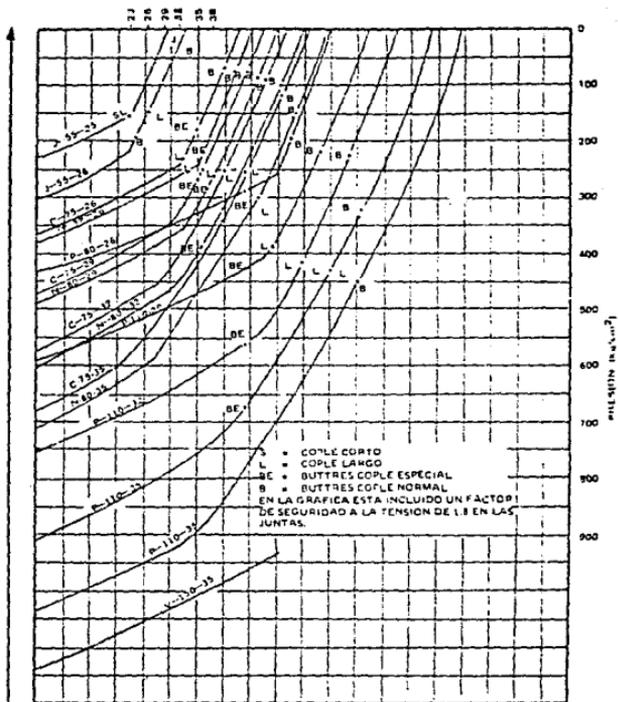
DENSIDAD DEL LODO (g/cc)



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 7 5/8"

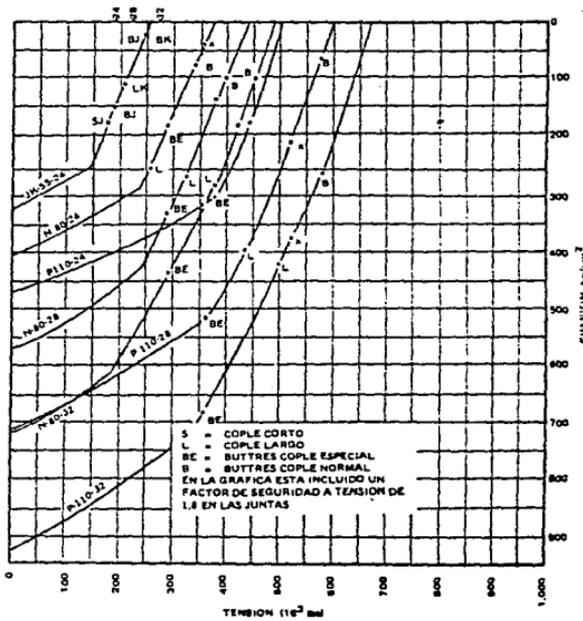
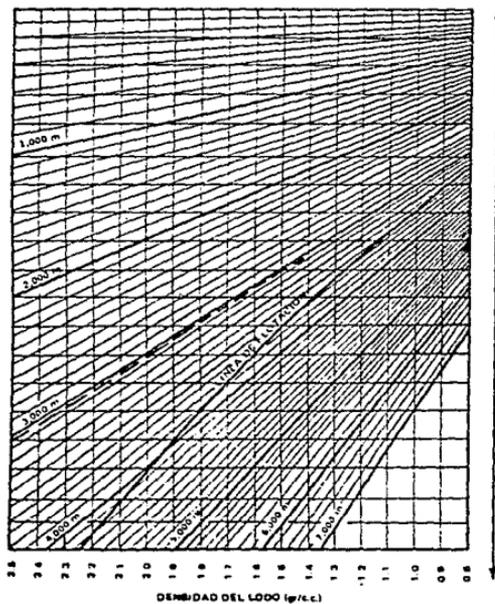


DENSIDAD DEL LODO (g/cm<sup>3</sup>)

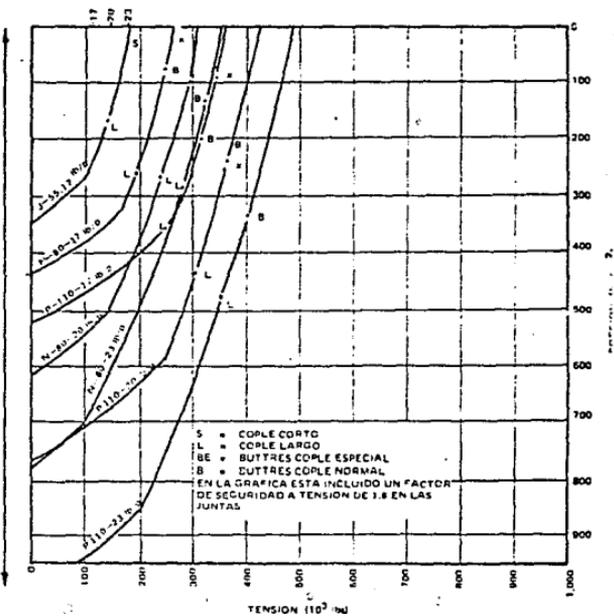
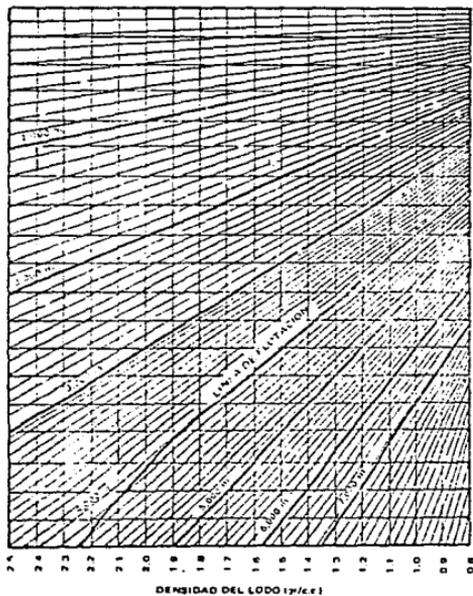


TENSION (10<sup>3</sup> kg/cm<sup>2</sup>)

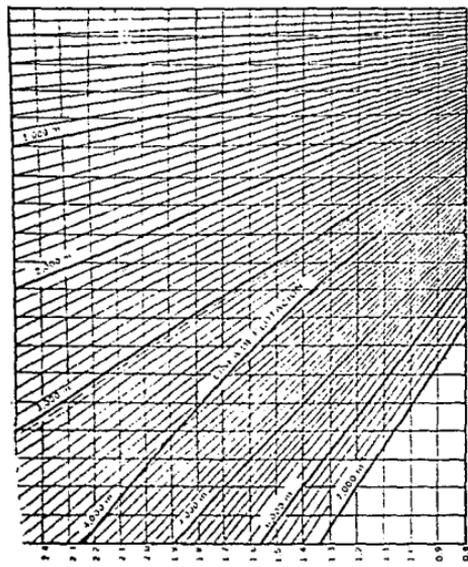
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 7"



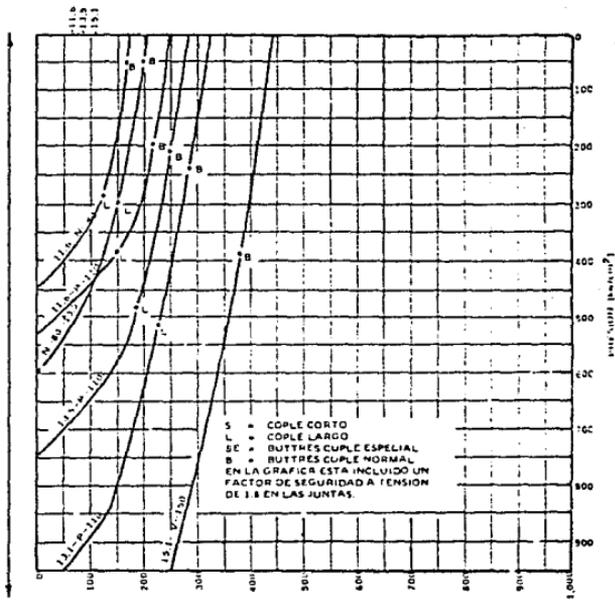
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 8 5/8"



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 5 1/2"



DENSIDAD DEL LODO (gr/cc)



S = COPLE CORTO  
 L = COPLE LARGO  
 BE = BUTRES COPLE ESPECIAL  
 B = BUTRES COPLE NORMAL  
 EN LA GRAFICA ESTA INCLUIDO UN  
 FACTOR DE SEGURIDAD A TENSION  
 DE 1.8 EN LAS JUNTAS.

TENSION ( $10^3$  lbs)

DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 4 1/2"

## TEMA V

### DISCUSION Y CONCLUSIONES.

#### V.1.-Fases de trabajo en Geotermia.

La primera etapa (reconocimiento) consta de dos fases de trabajo; en la primera se toma la informacion existente obtenida de fuentes ajenas a la Geotermia antes de comenzar ha hacer estudios; en la segunda se comienza a dar interpretacion a la informacion ya recopilada por medio de investigaciones de campo o pruebas de laboratorio.

En esta etapa se debe plantear un programa de trabajo, si la formacion de esa área presenta características favorables para la explotación geotérmica; para esto como se menciona, se debe poner atención en los recursos humanos, el aspecto económico, la tecnología y el tiempo con que se cuenta, para poder definir programas óptimos y cumplir los objetivos planteados.

Al concluir la etapa de reconocimiento se da inicio a la de profactibilidad; ésta da inicio cuando se tiene ya información regional y se quieren identificar la o las zonas con mayor probabilidad de ser explotables en forma económica.

En esta etapa se hace uso de todas las ciencias especializadas en el estudio de las formaciones geológicas (estudios geológicos, estructurales, vulcanólogos, geofísicos...) para así crear una idea de lo que sucede en el subsuelo. Aunado a estos estudios se debe realizar un análisis económico, para determinar qué personal y la cantidad que se va a necesitar y estimar el tiempo en que se realizará el estudio.

Las manifestaciones superficiales (fumarolas, manantiales) indican que puede existir un campo geotérmico de un tamaño considerable, pero no siempre se manifiestan en la superficie; es en este momento cuando son de gran importancia los estudios de Geoquímica, Geología y los métodos geofísicos exploratorios.

En seguida se comienza con el estudio de factibilidad, cuyos objetivos son principalmente:

- Evaluar el potencial geotérmico del área estudiada.
- Realizar un diseño preliminar de los sistemas para su posible utilización.

Se debe tener información de:

- Roca-sello.
  - Circulación de los fluidos y características físico-químicas de estos.
  - Distribución de temperaturas.
  - Características físicas de las zonas productoras.
- Para obtener información acerca del yacimiento como:
- Potencial energético.
  - Posibles esquemas de utilización.
  - Programa de operaciones que deberán realizarse en la siguiente fase.

Una parte muy importante de esta etapa es que se realiza un estudio sobre los aspectos ambientales que de aquí pueden originarse y se le da una solución para disminuir estos trastornos. (Se debe cuidar el medio ambiente y saber que tan grave es el daño que se le causa, porque tal vez sea irremediable y por esta razón podría no ser rentable la explotación del pozo).

Al finalizar esta etapa sigue el desarrollo del campo. Es ahora cuando se debe hacer la distribución de los pozos y determinar cuál será su función (inyectar, producir).

En esta etapa es cuando se realiza la perforación y terminación de los pozos planeados.

Es muy importante conocer el gasto de los pozos para que sean cerrados cuando ya no cumplan con el gasto (gas) necesario para satisfacer los requerimientos en la central y serán entonces sustituidos por otros que ya están en espera de ser requeridos.

Es importante conocer el estado mecánico del pozo, los problemas que pueden presentarse en él, durante su perforación y cómo corregirlos o evitarlos; es importante para una buena terminación del pozo y con esto una vida prolongada del mismo, tomar en cuenta los criterios mencionados en el Capítulo I. Si se cuenta con esta información y se emplea en la selección del equipo de terminación, se disminuye el riesgo de fracaso en esta operación.

En la etapa de explotación se debe estar revisando el estado mecánico de los pozos y el deterioro que han sufrido, para darles mantenimiento así como al campo.

Se debe también hacer un buen estudio respecto a las políticas de explotación.

#### V.2. - Características de un campo geotérmico.

Para dar origen a un yacimiento geotérmico los fluidos se mueven a través de las fracturas de la roca porosa y permeable, tratando de estar en las zonas menos profundas; estos fluidos conducen el calor que es el que da el origen a la geotermia.

El calor extraído se destina a la producción de electricidad o a satisfacer otras necesidades humanas.

Estos depósitos de aguas calientes son generados por la circulación del agua a altas temperaturas en la corteza terrestre y las corrientes de convección en el manto; además también actúa el vulcanismo. Los depósitos hidrotermales se encuentran a profundidades someras.

La energía geotérmica tiene su origen en la cámara magmática, desde donde asciende el calor hacia una zona permeable, atravesando primero una zona fracturada e impermeable; los fluidos sufren un aumento en la temperatura en la zona permeable donde se localizan y por buscar zonas menos profundas tienen manifestaciones en la superficie (fumarolas, manantiales, ...).

Es importante reflexionar si es esta energía una fuente renovable o no para explotarla a ritmos altos de extracción ó tal vez hacer un uso racional, y no suceda lo que con otros recursos que estamos agotando al no explotarlos moderadamente.

La clasificación de los sistemas hidrotermales que se realizó por su alta o baja entalpia se debe a que los primeros son más apropiados para generar energía eléctrica y los de baja entalpia tienen principalmente otros usos como: Calefacción para hoteles, calefacción para invernaderos o incubación.

La importancia de los sistemas mencionados consiste en que si son explotables económicamente, porque se cuenta con la tecnología adecuada.

En la explotación de la energía térmica de las rocas secas y calientes se presentan desventajas que provocan que no sea costable su explotación como las que se encuentran a grandes profundidades; a pesar de que existen técnicas para su explotación, no es rentable

hacerlo por el momento, pero si sufren un aumento en el precio los hidrocarburos ésto tal vez provocaría que se hiciera rentable la explotación de esta energía.

Las zonas geopresurizadas no son rentables para producir electricidad porque sus temperaturas son bajas a pesar de estar a gran profundidad.

Es muy importante determinar el contenido y la vida productiva de estos yacimientos; se deben establecer aspectos técnicos y económicos para eliminar la salmuera y determinar si hay posibilidades de hundimiento de la superficie del terreno o alterar el ambiente por la explotación de este recurso.

Por otro lado, la energía geotérmica de masas de magma no se podrá explotar durante este siglo por lo menos, debido a que no se cuenta con la tecnología adecuada y no se sabe aun a ciencia cierta qué trastornos se le pueden causar al medio ambiente al extraer grandes volúmenes de magma. El mayor problema que se tendrá en la explotación de esta energía será por la corrosión y no por las altas temperaturas.

La energía geotérmica marina se manifiesta generalmente en el fondo oceánico, donde ocurre la creación de corteza oceánica.

Tampoco esta energía es costeaible de explotar debido a las profundidades tan grandes y la falta de tecnología, así como por el momento existen formas de obtener energía más baratas. Se deben seguir realizando estudios acerca de ella y desarrollar tecnología para competir en está área con los países que se dedican a estos estudios.

### V.3. -Criterios Geocientíficos.

Estos deben basarse en un conocimiento amplio y adecuado al modelo geológico del campo, incluyendo:

- Correlaciones estratigráficas de los pozos perforados.
- Identificación de los minerales de alteración hidrotermal.
- Formulación de una hipótesis sobre ubicación de la fuente calorífica.
- Definición preliminar de los límites del campo.
- Conocimiento de los eventos volcánicos ocurridos.
- Edad de las diversas formaciones litoestratigráficas.

#### Estructurales.

Los criterios adoptados, en base al conocimiento de las condiciones estructurales de un campo, permiten disminuir las probabilidades de error en la localización de pozos productores.

Los elementos primordiales de esta disciplina son los siguientes:

- Definición de la estructura regional.
- Definición de la estructura local.
- Definición de los sistemas de fracturamiento.
- Definición de los sistemas de fallas.

#### Estratigráficos.

El conocimiento de las condiciones estratigráficas del campo aporta criterios adicionales para la ubicación de los pozos. Los aspectos fundamentales que deben conocerse son:

- Secuencia litológica de los pozos perforados.
- Definición preliminar de los componentes litológicos del campo (Cubierta, capa sello, yacimiento y basamento).
- De ser posible, correlaciones en base a estudios petrográficos especiales de los minerales de alteración.

#### Geohidrológicos.

La Geohidrología de un campo geotérmico es un aspecto determinante en la ubicación de pozos. Comprende:

- Definición de la cuenca de recarga.
- Definición de zonas y flujos de recarga.
- Identificación de los diferentes acuíferos de la zona.
- Características geohidrológicas del vaciamento (transmisibilidad, permeabilidad, porosidad, etc).
- Características hidroquímicas e isotópicas de los acuíferos.
- Determinación del modelo preliminar geohidrológico.

#### Geoquímicos.

Un buen conocimiento de las condiciones geoquímicas de los fluidos geotérmicos permite conocer su procedencia, las interacciones que han sufrido durante su camino y su temperatura de origen. Por tanto, contribuye a definir los criterios de ubicación. Los puntos

fundamentales sobre los que se basan son:

- Distribución de la temperatura del yacimiento en base a geotermómetros.
- Características geoquímicas de los diferentes acuíferos existentes en el campo.
- Delimitación superficial del campo mediante métodos Geoquímicos. Geofísicos.

La aplicación de métodos geofísicos permite la definición de las posibles estructuras del subsuelo y por tanto, ayuda en la ubicación de los pozos. En cada caso particular deberá aplicarse el método de mayor adaptabilidad al medio geológico de que se trate.

Es también recomendable la comprobación de las anomalías detectadas mediante la aplicación de dos o más métodos. Los criterios de aplicación se apoyan en los siguientes métodos:

- Determinación e interpretación de anomalías electromagnéticas, gravimétricas y microsísmicas.
- Aplicación de métodos sismológicos.
- Determinación de los patrones de flujo térmico.

#### Criterios termodinámicos

El conocimiento de los parámetros termodinámicos de los pozos existentes contribuye a ubicar los pozos siguientes a perforar, mediante la interpretación de las siguientes características:

- Distribución de temperatura en el campo.
- Correlaciones entálpicas de los pozos.
- Variaciones de las características termodinámicas.

#### V.4. - Perforación y terminación.

En cuanto a la perforación, es importante destacar que a pesar de que los pozos geotérmicos son someros comparándolos con los pozos petroleros, su costo de perforación por metro es más elevado. Esto se debe a las altas temperaturas a que están sometidos los yacimientos, lo cual provoca que el costo de la cementación sea mayor por los aditivos que se deberán agregar; también la tubería de revestimiento deberá ser de un acero que soporte estas temperaturas y lo que ellas provocan (presiones, corrosión excesiva, ...).

Debido a las características físicas de la formación, se derivan algunos problemas, que provocan pérdidas económicas (aumenta el costo del pozo).

Cuando se presenta una pérdida de circulación se tiene una pérdida considerable, económicamente hablando, porque el fluido empleado en la perforación tiene un costo alto y además el equipo está parado.

Este problema se presenta porque se perfora con fluidos base-agua y sus características geológicas ayudan a que la pérdida de agua no sea fácil de controlar.

Otro problema que frecuentemente se presenta cuando se realizan viajes de tuberías son los derrumbes de la pared del pozo, esto es debido a las características del pozo o a la mala selección de lodo. También puede ocurrir un atrapamiento de tuberías; este es uno de los problemas más graves porque si la tubería llegara a romperse por la tensión a que se somete, sería necesario realizar una operación de pesca y si no fuera recuperado el poz entonces se deberá taponar o abandonar el pozo.

En el equipo de perforación se pueden presentar fallas principalmente por altas temperaturas y contenido excesivo de sólidos en el lodo (estos sólidos se deben remover del lodo).

Un problema muy común es la pérdida de diámetro de la barrena, debido a la dureza de las formaciones. Esto provoca que en el pozo vaya disminuyendo el diámetro y esto obliga a reperfilar, causando entonces una pérdida de tiempo y un gasto elevado por las barrenas empleadas. La importancia de los fluidos de perforación no se puede ignorar puesto que sin ellos no habría sido posible alcanzar las profundidades perforadas.

Si se logra diseñar un lodo que cumpla con sus funciones, se tendrán resultados satisfactorios al final de la perforación y el pozo quedará bien acondicionado para una buena terminación.

En la perforación geotérmica se emplean principalmente lodos base-agua, por las altas temperaturas y presiones que se presentan son los que dan mejores resultados.

Debido a las características de presión y temperatura presentadas en los pozos será difícil remover y detectar los contaminantes presentes

en el lodo de perforación.

Es importante llevar un registro de las pruebas de las propiedades de los fluidos de perforación para poder identificar si el lodo está o no contaminado.

Mediante la graficación de los datos es más fácil visualizar estos síntomas.

En el diseño de la terminación de un pozo geotérmico se debe primeramente analizar:

-Costo.

-Problemas durante la perforación y cementación de pozos de diámetros grandes.

-Límites por colapso.

-Problemas durante la producción.

Para poder seleccionar el diámetro de tubería que se va a emplear, se:

-Escoge un acero con características apropiadas para estos esfuerzos y características de la formación.

-Selecciona el peso y el grado de manera adecuada.

-Usan los coples que trabajen de manera eficiente.

Es muy importante hacer las siguientes consideraciones, para que la tubería sea diseñada con un factor amplio de seguridad.

-Temperatura máxima a lo largo de todo el pozo.

-El perfil geotérmico de temperatura estática.

-Variación máxima de temperatura a la que estará sujeta la Sarta.

El rango de temperatura influye en la resistencia del acero y el diseño del modelo de esfuerzos.

Es muy importante reconocer una tubería por el troquel que tiene en el extremo cada tubo, para que no se conecten tuberías de una característica donde no van y evitar problemas en la terminación del pozo.

Mediante el método de Youngtown se diseñan TR,s para pozos con temperaturas normales, pero si se presentan pozos con temperaturas altas, se utiliza un método adecuado a ellos. Este incluye las ecuaciones para calcular aspectos alterados por esta alta temperatura.

La tubería adquirida debe cumplir con las normas API o con las que el fabricante indique en sus catálogos.

Los materiales empleados en la cementación son:

- Cemento base.
- Estabilizadores para alta temperatura.
- Aceleradores de fraguado rápido.
- Retardadores de fraguado.
- Reductores de densidad.
- Reductores de fricción.
- Densificantes.
- Homogenizadores.

Estos materiales son empleados para dar al cemento las características requeridas para una buena cementación.

Se desea que la cementación sea de buena calidad porque esto prolonga la vida del pozo y provoca mayor rentabilidad del proyecto.

Las pruebas realizadas al cemento son para saber cuál será su comportamiento en el pozo que se va a cementar; estas pruebas se simulan a condiciones de pozo.

La terminación primaria es muy importante porque de ella dependen trabajos subsecuentes; si es de mala calidad esta cementación, los trabajos que después se realizan en el pozo tendrán problema, que en algunos casos serán severos.

Las cementaciones secundarias son necesarias si la cementación primaria fue mal realizada; pueden ser:

- Recementación por espacio anular.
- Cementación forzada.
- Tapones para sellar zonas con pérdida de circulación.
- Tapones para iniciar pozos dirigidos.
- Se emplean para corregir la cementación primaria.

## B I B L I O G R A F I A .

- 1.- Benitez Hernandez M.A. Apuntes de Tecnologia de la Perforación (primera parte), Facultad de Ingenieria U.N.A.M., Mexico D.F., 1982.
- 2.- Alonso Cárdenas Ignacio. Apuntes de Terminación de Pozos, Facultad de Ingenieria U.N.A.M., México D.F. Abril 1983.
- 3.- Rojas Ríos Jorge. Cementación de Pozos Geotérmicos. Tesis Profesional, 1991.
- 4.- Casimiro Contreras. Análisis del Control de Sólidos Mediante Computadora Personal en la Perforación Geotérmica. Tesis Profesional 1991.
- 5.- Organización Latinoamericana de Energía.  
Metodología OLADE Para la Explotación Geotérmica.  
Seminario Sobre Exploración Geotérmica.  
Quito, Ecuador, 1978.
- 6.- Benitez Hernández M.A., Garaicochea Petrirena F.  
Apuntes de Fluidos de Perforación.  
Facultad de Ingenieria, (U.N.A.M.).
- 7.- Santoyo-Gutiérrez S.  
Los Fluidos de Perforación y su Importancia en la Perforación de Pozos Geotérmicos.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor. Méx.
- 8.- Santoyo Gutiérrez, S., Baca A.A y Morales, M.R.  
Estado de la Tecnología de Perforación de Pozos Geotérmicos en México.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor.  
Mexico. 1991.

9. - Morales R. J. Manuel, Herrera C. Omar, Arreola V. Reyna.  
Construcción de un Pozo Geotérmico.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Mor.
10. - Alonso Cárdenas Ignacio.  
Apuntes de Terminación de Pozos.  
Facultad de Ingeniería (U.N.A.M.).
11. -Socrates Santoyo G. J. Manuel Morales. R., Guillermo Barroso A.  
Control Apropiado de las Condiciones del Fluido de Perforación  
Durante la Construcción de los Pozos Geotérmicos.  
Instituto de Investigaciones Eléctricas (Departamento de  
Geotermia), Cuernavaca, Morelos, CP 62000, México.