



4
2 ij
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CEMENTACION DE POZOS GEOTERMICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N

JOSE MATEO AMADOR HERNANDEZ

SAUL BAUTISTA FRAGOSO

JORGE ROJAS RIOS

MANUEL SOTO MENESES

MEXICO, D. F.,

FALLA DE ORIGEN

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION

TEMA I

GENERALIDADES

- 1.1 Introduccón
- 1.2 Yacimientos geotérmicos
- 1.3 Energía geotérmica en México
- 1.4 Campos de explotación en México
- 1.5 Campos de exploración en México
- 1.6 Potencial geotérmico en México
- 1.7 Conclusiones

TEMA II

QUIMICA DE LOS CEMENTOS

- 2.1 Composición química
- 2.2 Fabricación
- 2.3 Tipos de cementos
- 2.4 Aditivos de cementos

TEMA III

DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS GEOTERMICOS

- 3.1 Aspectos únicos en el diseño de tuberías de revestimiento para pozos geotérmicos
- 3.2 Forma de identificar las tuberías de revestimiento
- 3.3 Funciones de la tubería de revestimiento
- 3.4 Diseño de tuberías de revestimiento
- 3.5 Datos requeridos para el diseño de una tubería de ademe
- 3.6 Diseño para tuberías de ademe, método Youngstown
- 3.7 Revisión del diseño de la tubería de ademe
- 3.8 Comprobación gráfica del diseño de la tubería de ademe
- 3.9 Diseño de la T.R. para régimen de temperatura en pozos geotérmicos
- 3.10 Tipos de fallas posibles
- 3.11 Adquisición de tubería para pozos geotérmicos

TEMA IV

DISEÑO DE LA LECHADA

- 4.1 Consideraciones para el diseño de sistemas cementantes
- 4.2 Materiales empleados para cementar pozos geotérmicos
- 4.3 Pruebas de laboratorio
- 4.4 Evaluación de la lechada

TEMA V

HIDRAULICA DURANTE LA CEMENTACION

- 5.1 Conceptos fundamentales
- 5.2 Determinación de parámetros reológicos
- 5.3 Ecuaciones a utilizar con el viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional
- 5.4 Ecuaciones reológicas
- 5.5 Caídas de presión por fricción
- 5.6 Equipo de bombeo

TEMA VI

TECNICAS DE CEMENTACION

- 6.1 Tipos de cementaciones
 - 6.1.1 Cementaciones primarias
 - 6.1.2 Cementaciones secundarias o correctivas
- 6.2 Problemas relacionados con la cementación de pozos geotérmicos

TEMA VII

VERIFICACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION

- 7.1 Introducción
- 7.2 Control de cementación CBL-VDL
- 7.3 Control de corrosión

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El 85% de la energía utilizada mundialmente proviene de recursos no renovables como lo son los hidrocarburos, el uranio y el carbón. es por ello que se han buscado fuentes alternas encontrandose como una opción viable el aprovechamiento de la energía geotérmica.

Un aspecto muy importante para que se orienten los proyectos de aprovechamiento de la energía hacia el campo de la geotermia es que la producción de dicha energía sea económicamente conveniente, para que esto ocurra es necesario que la vida productiva de un pozo geotérmico sea al menos de 8 a 10 años.

La vida de un pozo geotérmico depende en gran medida de los procesos llevados a cabo para la cementación del mismo, encontrandose entre ellos la selección de materiales apropiados y de calidad para las condiciones ambientales del pozo, siendo de suma importancia el completo conocimiento de las técnicas de colocación del cemento y de los problemas inherentes como lo son las pérdidas de circulación, lodos inmóviles, pobre centrado de las tuberías etc.

El objetivo de la cementación del pozo es proporcionar un completo relleno de cemento en el espacio entre la tubería y el agujero para adherir firmemente la tubería con las paredes del pozo y con otras tuberías, ayudando a soportar las severas condiciones ambientales del yacimiento. El presente trabajo tiene como finalidad mostrar la metodología seguida en la cementación de los pozos geotérmicos así como los problemas que se pueden presentar durante las operaciones de cementación.

TEMA I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

La geotermia es una energía que ha existido siempre, sin embargo, hasta principios del presente siglo empezó a dársele uso en forma comercial haciéndose notoria su existencia hace apenas dos décadas. En la actualidad con el incremento del costo de los combustibles fósiles se le ha dado una importancia relevante ya que representa una solución para países carentes de dichos combustibles. Actualmente existe un gran interés para desarrollar campos geotérmicos sobre todo en 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.

1.2 YACIMIENTOS GEOTERMICOS

La energía geotérmica esta asociada a los procesos volcánicos y tectónicos terrestres. La teoría más aceptada sobre su origen establece que masas magmáticas que no afloran a la superficie quedan atrapadas a pocos kilometros 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 yacimientos de agua y vapor. Este proceso origina gradientes térmicos de hasta 200°C por Km. siendo el gradiente normal de 30°C por Km. de profundidad.

Para que el yacimiento geotérmico sea económicamente explotable se requieren cuatro características principales : 1) Una fuente de calor. 2) Un acuífero, 3) Una capa sello, 4) Deberá estar situado a una profundidad adecuada, considerandose actualmente como máxima profundidad económica los 3000 m.

CLASIFICACION DE YACIMIENTOS GEOTERMICOS

A continuación se exponen algunas características de los diversos sistemas geotérmicos clasificados a la fecha y su estado actual de desarrollo tecnológico a nivel mundial.

a) VAPOR DOMINANTE.- Sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Su desarrollo es tal que permite generar electricidad a gran escala comercial.

b) LIQUIDO DOMINANTE (alta entalpía).- Sistemas de salmuera super caliente, con temperaturas entre 200 y 300°C. Son más abundantes que los anteriores. Estos han tenido un gran desarrollo en la generación de electricidad.

c) LIQUIDO DOMINANTE (baja entalpía).- Sistemas con temperaturas de 100 a 200°C. Son más abundantes que los dos anteriores en una proporción de 10 a 1.

d) ROCA SECA CALIENTE.- Sistemas rocosos con alto contenido energético pero con poca o nada de agua. Actualmente es una tecnología costosa por tanto su explotación económica no será antes del año 2010.

e) GEOPRESURIZADOS.- Sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión y mediana temperatura (150°C). Su desarrollo comercial en la generación de electricidad se espera en la década de los 90's .

f) MARINOS. - Sistemas de alta entalpia existentes en el fondo marino. Este tipo de sistemas ha sido poco estudiado. Se espera su explotación comercial, después del año 2020.

g) MAGMATICOS. - Sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas debilitadas.

1.3 ENERGIA GEOTERMICA EN MEXICO

En México los primeros estudios encaminados al aprovechamiento de la energía geotérmica se inician a principio de la década de los 50's, recabandose información acerca de las manifestaciones termales superficiales conocidas. En aquel tiempo se lograron identificar más de 60 áreas con manifestaciones de alta temperatura. De estas se seleccionó para iniciar la explotación de la energía geotérmica en México, la zona de Pathé en el estado de Hidalgo, más por su cercanía con la Ciudad de México que en base a sus características propicias. En este campo se instaló una planta piloto de 3,500 Kw. en el año de 1959. Esta planta operó hasta el año de 1975, cuando el campo se cerró.

La importancia de Pathé radica en el hecho de haber sido la primera zona geotérmica desarrollada en México, se permitió la preparación de técnicos mexicanos y demostró la factibilidad de explotar la energía de la tierra.

En la actualidad se tienen detectados en la Republica Mexicana más de 1000 focos termales (fig. 1.1), lo cual convierte a nuestro país en una área privilegiada en el mundo por su enorme potencial en energía geotérmica. Los estudios e investigaciones encaminadas a la evaluación de los recursos geotérmicos, han

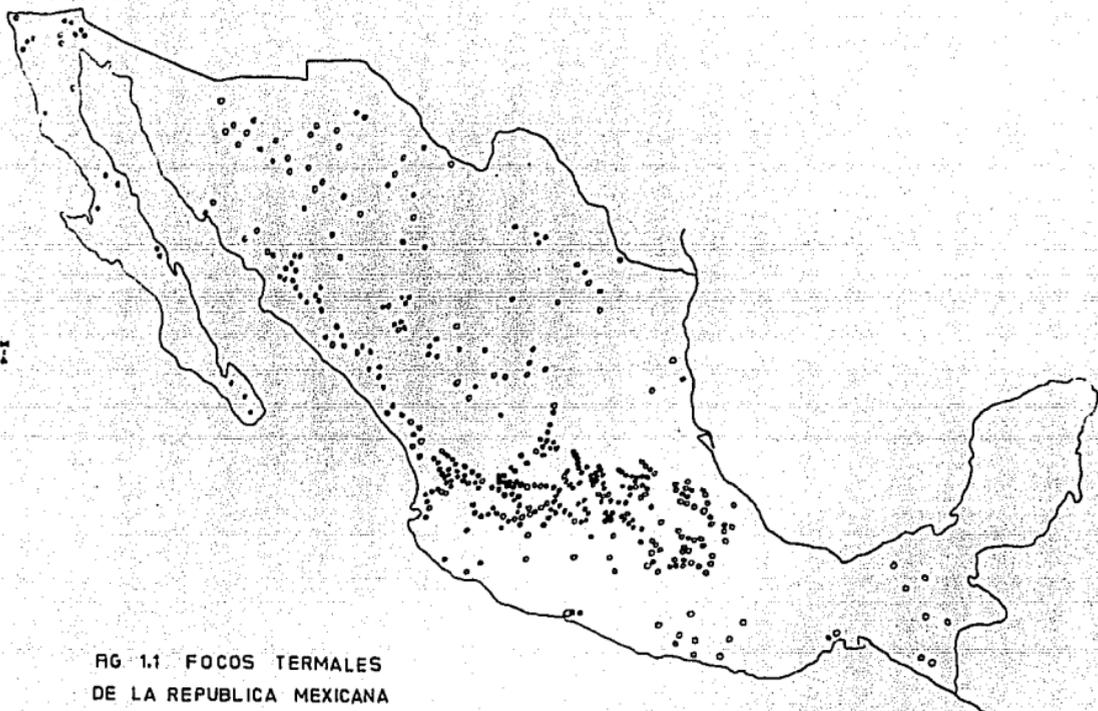


FIG. 1.1 FOCOS TERMALES
DE LA REPUBLICA MEXICANA

definido en México dos grandes áreas. Una de ellas en la región de Mexicali, en la cual se encuentra localizado el campo Cerro Prieto (fig.1.2), que es uno de los más grandes del mundo. En esta área se presenta el fenómeno de separación de placas terrestres que a lo largo del sistema de la falla de San Andrés han creado una zona debilitada en la que la roca fundida se acerca a la superficie terrestre transmitiendo su calor a los acuíferos. La otra región es de mayor extensión que la anterior y se conoce con el nombre de eje Neovolcánico. Esta zona se encuentra localizada entre los meridianos 98 y 104 de longitud Oeste de Greenwich y los paralelos 18 y 25 de latitud Norte. El eje Neovolcánico presenta condiciones geológico-estructurales favorables para la formación de zonas con temperaturas anómalas, lo cual se pone de manifiesto al haberse detectado cerca de 300 manifestaciones termales en esta zona.

Los 1000 focos termales detectados se encuentran distribuidos en la mayor parte de los estados que componen la República Mexicana. las mayores concentraciones de sitios geotérmicos se encuentran en los estados de Jalisco (36), Guanajuato (36), Sinaloa (35), Nayarit (27) y Michoacán (24). Actualmente se encuentran en explotación el campo Cerro Prieto en Baja California Norte y el campo de los Azufres en Michoacán. Se cuenta con pozos profundos en los campos La Primavera, Jalisco y los Humeros, Puebla. Se tienen pozos de exploración en los campos de San Marcos en Jalisco, Tulicheck y Riito en Baja California Norte, Ixtlán y los Negritos en Michoacán.

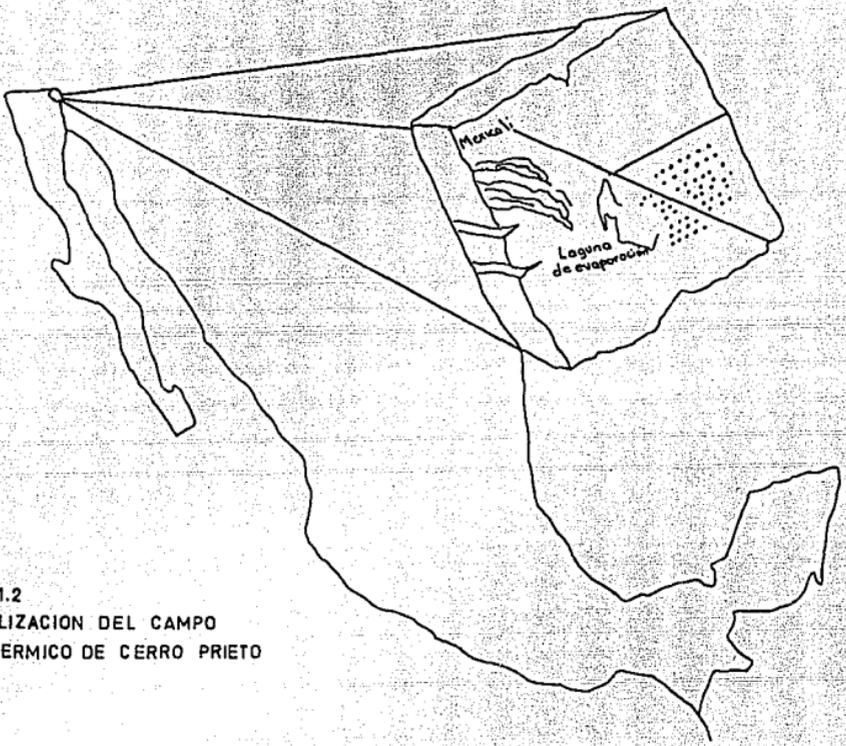


FIG. 1.2
LOCALIZACION DEL CAMPO
GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

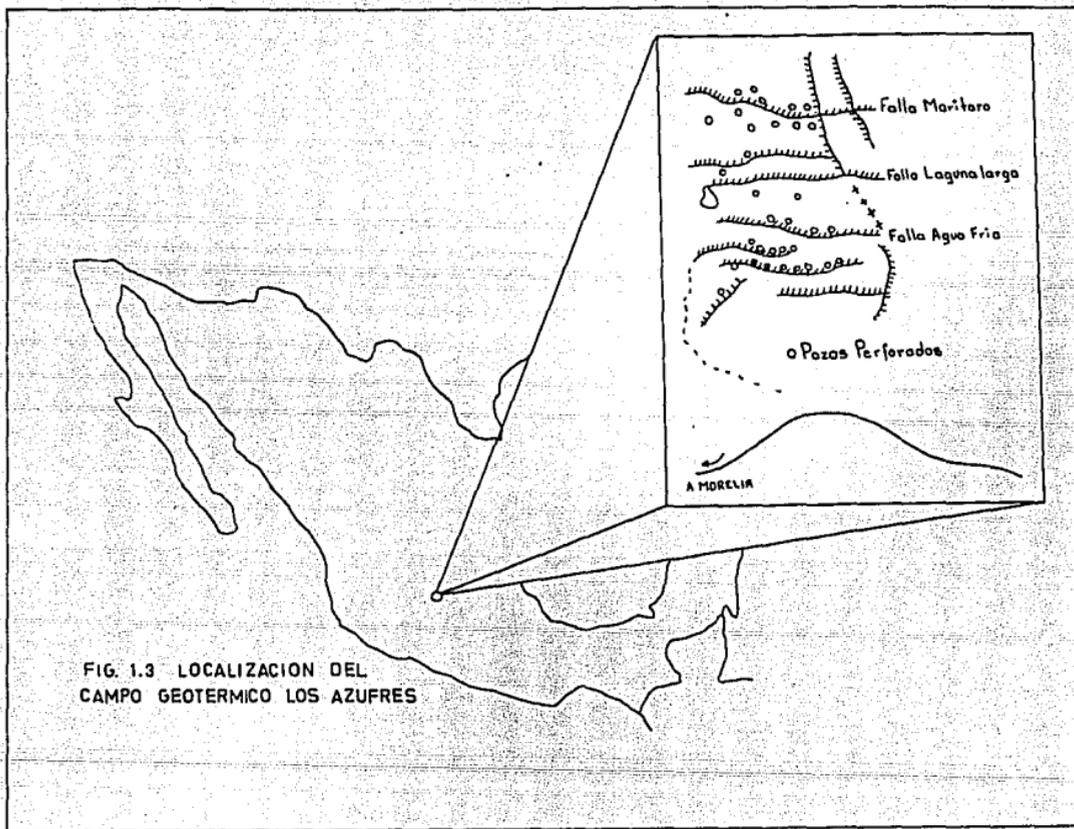


FIG. 1.3 LOCALIZACION DEL
CAMPO GEOTERMICO LOS AZUFRES

1.4 CAMPOS DE EXPLOTACION EN MEXICO

a) CERRO PRIETO.- Con los resultados obtenidos en Pathé se decidió iniciar estudios preliminares de exploración en otras áreas del país, comenzando en los Negritos e Ixtlán de los Hervores en Michoacán y en Cerro Prieto en Baja California Norte. En este último campo se concentraron los esfuerzos y recursos. Las investigaciones iniciales permitieron determinar la existencia de un gran recurso geotérmico que se comprobó al obtenerse en este campo las presiones y temperaturas más altas del mundo. Cerro Prieto es actualmente el desarrollo geotérmico más importante en México, y se encuentra localizada aproximadamente a 30 kilómetros de la ciudad de Mexicali. Algunos de los pozos de este campo se perforaron durante los años 60's, pero no fué hasta el año de 1973 cuando dos unidades de 37.5 Mw. cada una entraron en operación.

En el año de 1984 se habían perforado en Cerro Prieto 144 pozos de éstos 103 son productores, 30 de exploración y 11 han sido abandonados. Este campo es actualmente el segundo más grande del mundo.

Además de los 620 Mw instalados, se espera contar con una capacidad adicional de 220 Mw en 1992. Lo que representaría un total de 840 Mw instalados en el campo geotérmico Cerro Prieto.

Los estudios han mostrado que en este campo existen 67 Km de roca con temperaturas superiores a los 250°C. La porosidad promedio es de aproximadamente el 8%. La permeabilidad horizontal varía entre 20 y 50 md y la permeabilidad vertical entre 1 y 3 md.

b) LOS AZUFRES.- Este campo se encuentra localizado a 200 km al Oeste de la ciudad de México a una altitud aproximadamente de 2800 m. s.n.m. En Los Azufres se iniciaron las perforaciones en el año de 1978, habiéndose perforado a la fecha 48 pozos (fig. 1.3), de los cuales 28 son productores, 12 de exploración y 8 de reinyección.

En agosto de 1982 entraron en funcionamiento 3 turbogeneradores móviles de 5000 Kw. cada uno, que opera a boca de pozo. En 1988 entro en operación en este campo una central geotermoelectrica con una capacidad de 55 Mw.

1.5 CAMPOS DE EXPLORACION EN MEXICO

a) EXPLORACION EN EL NORTE DEL PAIS.- En el Valle de Mexicali se tienen actualmente bajo exploración diversas zonas circundantes al campo Cerro Prieto. Entre las más prometedoras se encuentran Mesa de Andrade y Tulicheck.

1) Mesa de Andrade

Al sureste del campo geotermico Cerro Prieto se encuentra Mesa de Andrade. En este lugar se tienen anomalías termales significativas y se han efectuado estudios geológicos y geofísicos con resultados prometedores.

2) Tulicheck

En este lugar que se encuentra localizado al noreste del campo Cerro Prieto, se han efectuado estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. Se han encontrado temperaturas de aproximadamente

150°C y se estima que la alteración hidrotermal es de aproximadamente 7 km.

b) EXPLORACION EN EL EJE NEOVOLCANICO.- En el eje Neovolcánico existen varios focos termales que se encuentran en exploración por CFE. Entre éstos destacan los siguientes:

1) La Primavera Jalisco.

La zona geotérmica de la primavera esta situada al Oeste de la ciudad de Guadalajara en una región montañosa con gran número de domos volcánicos pertenecientes a una caldera de grandes dimensiones. En esta área se encuentran tanto manantiales calientes como fumarolas y escapes de vapor. Se estima que el área de alteración hidrotermal es de aproximadamente 3 km.

2) La Soledad Jalisco

Este lugar se encuentra localizado al Norte de la ciudad de Guadalajara, en la ribera del río Santiago. Las manifestaciones existentes en el área son principalmente chorros de agua-vapor que alcanzan gran altura y manantiales calientes. El área de alteración hidrotermal es de 4 km.

3) San Marcos y El Pantano Jalisco

El área geotérmica de San Marcos esta localizada a una altitud de 1350 m.s.n.m., en el extremo Oeste del lago de Chapala. El área de alteración cubre una extensión de 11 km. Las manifestaciones son de diversa índole, manantiales hirvientes, estanques burjeantes, lagunas de agua caliente, volcanes de lodo,

etc. El agua es de salinidad media y los geotermómetros indican temperaturas superiores a 200°C.

4) Ixtlán de los Hervores Michoacán

Este lugar se encuentra localizado al Este del lago de Chapala a una altitud de 1535 m.s.n.m. Aquí existen manifestaciones termales de gran intensidad en una área de más de 2 km. principalmente manantiales con temperaturas de 50 y 80°C, lagunas de lodo hirviente, fumarolas y escapes de vapor.

5) Los Negritos Michoacán

Esta zona se encuentra localizada en la intersección de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, al Este del lago de Chapala y a 27 km del campo de Ixtlán de los Hervores. Esta es una zona plana caracterizada por un gran número de manifestaciones termales, tales como, volcanes de lodo y estanques burbujeantes con temperaturas de 40 a 90°C.

6) Los Humeros Puebla

En esta zona que se encuentra localizada al Oriente de la ciudad de México, se han efectuado trabajos de geología, geoquímica y geofísica en una superficie de 7000 km. De acuerdo con los estudios realizados esta es una zona bastante promisoría para explotarse comercialmente, en este campo se han medido temperaturas de hasta 310°C.

1.6 POTENCIAL GEOTERMICO EN MEXICO

En base al conocimiento que se tiene actualmente de los recursos , el potencial geotérmico del país puede clasificarse de la siguiente manera:

1) RESERVAS PROBADAS.- Son aquellas en que los pozos productores y los estudios del yacimiento permiten recomendar la instalación de una planta con vida útil de 30 años.

2) RESERVAS PROBABLES.- Son aquellas en que mediante estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos se ha podido cuantificar de manera aproximada la energía térmica almacenada en el yacimiento.

3) RESERVAS POSIBLES.- Son aquellas que por manifestaciones termales en la superficie permiten inferir la posibilidad de un recurso geotérmico.

De acuerdo con los estudios más recientes, se sabe que las reservas geotérmicas (sistemas hidrotermales únicamente) de la República Mexicana son:

PROBADAS.....	1340 Mw.
PROBABLES.....	4800 Mw.
POSIBLES.....	8000 Mw.

Si las reservas probadas corresponden básicamente a los campos actualmente en desarrollo: Cerro Prieto, Los Azufres y Los Hornos. Las reservas probables corresponden a nuevos campos en los que se están realizando perforaciones exploratorias como: La Primavera, Ceboruco, Araró, Ixtlán de los Hervores, Los Negritos

o ampliaciones de los campos actualmente en desarrollo. Las reservas posibles a una estimación en base a lo que se sabe de los 1000 focos termales que se conocen en la República Mexicana.

1.7 CONCLUSIONES

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

En el pasado se ha dado énfasis a la producción de electricidad por este medio, no obstante, el aprovechamiento de los usos no eléctricos de los yacimientos de baja entalpia es de fundamental importancia en la optimización del uso de este energético. En la actualidad además de emplearse para calefacción y aire acondicionado puede proporcionar energía para más de 50 procesos industriales.

La energía geotérmica de fuentes de alta entalpia tienen un aspecto limitado a escala mundial, ya que los lugares con este tipo de recursos que pueden alcanzarse con la tecnología actual son reducidos. Sin embargo, la posibilidad de utilizar fuentes de mediana y alta entalpia, mediante el proceso de ciclo binario, aumentaría la importancia que a nivel mundial pudiera llegar a tener este energético.

En México, la generación de electricidad por medio de plantas geotérmicas es una realidad palpable y se estima que para finales de siglo se contará con una capacidad instalada mínima de 1000 Mw.

BIBLIOGRAFIA

1. M. R. Mavliutov, Tecnología de perforación de pozos profundos,
Ed. Mir Moscu
2. Arellano V. M., Energía geotérmica en México y el mundo,
Instituto de investigaciones eléctricas

TEMA II

QUIMICA DE LOS CEMENTOS

2.1 COMPOSICION QUIMICA

La química del cemento es principalmente la química de los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados, ya que todo tipo de cementos deben su acción y propiedades a la formación de estos compuestos.

Se llama cemento al producto previamente pulverizado resultante al calcinar una mezcla artificial de materiales calcáreos y arcillosos. Este producto debe contener cuando menos 1.7 partes en peso de sílice, más alúmina con óxido férrico, no más de 4% de magnesio y no más de 1.75% de anhídrido sulfúrico (resulta de la adición de yeso y los gases de la calcinación).

Los materiales en bruto deben ser mezclados en proporciones muy exactas. Calcinando estos materiales a fusión incipiente, se garantiza una densidad alta, indispensable en el cemento Portland.

Los principales componentes del cemento Portland son: óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3) y pequeñas proporciones de: anhídrido sulfúrico (SO_2), óxido de magnesio (MgO), óxidos alcalinos (K_2O y Na_2O) y sulfato de calcio (CaSO_4) comúnmente conocido como yeso.

Se admite 1.75% del trióxido de azufre (SO_3) porque los compuestos de azufre son inevitables al agregar yeso en sus diferentes formas para regular el tiempo de fraguado.

El cemento Portland es el más importante de todos los usados en construcciones de mampostería y en trabajo estructural en

general, cede su primer lugar al acero.

Los componentes del cemento se encuentran libres en la naturaleza pero no en tal forma que puedan ser usados en la manufactura del cemento; el carbonato de calcio es la excepción y de no encontrarse libre se usa en forma de cal. Se utilizan la sílice y la alúmina en forma de barro, pizarra u otros materiales arcillosos.

Las rocas que se usan en la manufactura del cemento se combinan, las más usadas en América son: Rocas calizo-arcillosas y roca caliza-pura; mármol y barro o barros arcillosos; "Clinker" de alto horno y piedra caliza.

ROCA CALIZA. Consiste ésta esencialmente de carbonato de calcio (Ca-CO_2) con algunas impurezas como carbonato de magnesio, sílice, hierro, álcalis y azufre. No sirve una roca caliza que contenga más de 50% de carbonato de magnesio. La sílice cuando se encuentra sola no se combina con la cal en el horno; cuando está mezclado con alúmina se combina con la cal durante el proceso de beneficio, razón por la cual esta roca es el material más importante en la manufactura del cemento Portland. No se debe permitir que lleguen a 5% la sosa y la potasa cáusticas.

Los componentes de las rocas calizas usadas en México son aproximadamente los siguientes:

componente	% proximado	% recomendado
CaCO ₃	88.0-98.0	93.0-97.0
SiO ₂	0.3- 8.0	0.4- 3.0
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0.2- 2.1	0.5- 1.3
MgCO ₃	0.2- 4.2	1.0- 2.5

ROCA CALIZO ARCILLOSA. Consiste esta de caliza conteniendo de 68 a 72% de carbonato de calcio; 18 a 27% de material barroso, y no más de 5% de carbonato de magnesio. Tiene un color que va del gris al negro y es más suave que la roca caliza.

MARMOL. Esta roca es de carbonato de calcio relativamente puro, debido a su origen por sedimentación. Realizándole un análisis se tienen los valores siguientes: 90 a 97% de carbonato de calcio y magnesio; menos de 1% de óxido de silicio; menos de 1% de alúmina y sesquióxido de hierro; pequeñas cantidades de materia orgánicas.

Cuando este material se usa en la fabricación de cemento Portland, debe agregarse de 15 a 20% de barro.

ARCILLA, PIZARRA Y BARROS ARCILLOSOS. Estos materiales pueden ser considerados como constituidos por los mismos componentes químicos. Difieren solamente en su estructura más o menos compacta. Todas las arcillas tienen su origen en la desintegración de las rocas por intemperismo.

La arcilla pura consiste de un silicato de alúmina hidratada (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O). Esta arcilla resulta inservible para la

fabricación del cemento si se contiene hormigón y arena.

La proporción en que debe estar la sílice es de 55 a 65% cuando menos, y la alúmina combinada con el óxido de hierro debe tener la proporción de entre un tercio y un medio de la cantidad de sílice. Los barros arcillosos son arcillas endurecidas por presión, formados estos por depósitos sedimentarios. Este material es preferible al barro suave por ser similar a la roca caliza en su carácter físico.

Tiene además menos agua y por lo tanto requiere menos secado, la arcilla es preferible cuando se le usa combinada con el mármol. La pizarra es barro sometido a muy altas presiones durante mucho tiempo y que se ha solidificado en estructura laminar; este material se usa en forma limitada en la fabricación del cemento Portland.

"CLINKER" DEL ALTO HORNO. Es este un silicato fusible que se forma durante la fundición del material mineral del hierro, de la combinación del fundente con la llamada ganga del mineral. El "clinker" usado en la manufactura del cemento tiene carácter fuertemente básico, siendo mejor a medida que contiene cal.

El clinker contiene cuatro fases principales que constituyen la fase potencial, formada a partir de las reacciones químicas producidas entre los componentes del cemento. La composición de la fase potencial es la siguiente: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (beta C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Las características de los cementos están influenciadas por factores físicos como el tamaño y forma de las partículas.

A continuación se describen brevemente cada una de las fases que constituyen la fase potencial.

SILICATO TRICALCICO (3CaO.SiO₂)

Es la fase anhidra más importante del cemento Portland, también llamada halita, constituye del 45 al 55 % del mismo. Es además el componente que proporciona la mayoría de la resistencia, reacciona lentamente con poca contracción, no posee buenas propiedades plásticas y tiene un calor de hidratación de 120 calorías por gramo. El C₃S tiene forma cristalina triclinica a temperatura ambiente, monoclinica a temperaturas moderadas y forma triangular a altas temperaturas.

SILICATO DICALCICO (2CaO.SiO₂)

Esta fase constituye el 15-25 % del cemento, reacciona más lentamente con el agua, aunque después de 180 días iguala a la del C₃S, por lo que controla la resistencia a largo plazo. Posee bajo calor de hidratación: 60 calorías por gramo. En el cemento se puede presentar de tres formas: alfa-C₂S o bredigita, silicato no hidráulico; beta-C₂S o Iarnita, forma cristalina que se hidrata a una velocidad que depende del tipo de estabilizador, y gama-C₂S, silicato casi inerte con muy escasa resistencia mecánica.

ALUMINATO TRICALCICO (3CaO.Al₂O₃)

El C₃A reacciona rápidamente con el agua, desarrollando un gran calor de hidratación, 207 calorías por gramo, no tiene alta resistencia, ocasiona fuertes contracciones y reacciona

desfavorablemente con los sulfonatos. No se han observado formas polimorfas del aluminato tricálcico en el cemento.

FERROALUMINATO TETRACÁLCICO ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)

La fase ferrita en el clinker del cemento Portland también llamada brownmillerita, es una solución sólida formada por mezclas como $\text{C}_2\text{F}-\text{C}_2\text{A}$. Esta fase reacciona rápidamente con el agua pero más lentamente que el C_3A , su valor de hidratación es de 100 calorías por gramo. Se ha observado que al aumentar su contenido, disminuye el del aluminato tricálcico, esto se logra agregando mayor proporción de óxido ferrico en la preparación del clinker.

El siguiente análisis típico del "clinker" obtenido en cementos de clase II: Silice, 33.1%; óxido de hierro y alúmina, 12.6%; cal, 49.98%; magnesio, 2.454%.

2.2 FABRICACION

La calcinación de los materiales para la fabricación del cemento Portland debe ser precedida por tres procesos:

- a. - Reducción de los materiales a polvo
- b. - Mezcla de los materiales en proporciones adecuadas.
- c. - Después de la mezcla de estos materiales se completa la pulverización.

CALCINACION. En la calcinación de los materiales usados para el cemento Portland se verifican los siguientes procesos: la evaporación del agua, la desintegración de los carbonatos de

calcio y magnesio, la expulsión de los álcalis y la combinación de la cal y magnesio con la sílice, alúmina y óxidos férricos para formar silicatos, aluminatos y ferritos que dan la estructura del cemento.

La mayor parte de la humedad se desprende cuando se rebasan los 100°C. El carbonato de magnesio se desintegra probablemente entre los 800 y 900°C, para la mayor parte de los cementos comerciales se ha encontrado que la temperatura más adecuada es de 1500°C que asegura una perfecta combinación de la cal con los compuestos de arcillas.

EXTRACCION, TRITURACION Y SECADO DE LA ROCA CALIZA. Los materiales en bruto empleados para el proceso en seco de la elaboración de cemento consiste, por lo general, de una roca de mediana compactación que es la piedra caliza y el material arcilloso. La extracción se hace por lo regular a un costado del cerro de explotación, extrayendo la piedra del banco y quebrando a un tamaño razonable se conduce en carros de vía Decauville a la trituration inicial. El tamaño a que se acostumbra triturar, es entre 5 y 8 centímetros de diámetro.

Algunas ocasiones se tiene que secar la piedra con el objeto de mejorar los rendimientos del molino y la quebradorta. Para secar esta piedra se usan hornos rotatorios que emplean los gases de escape de los hornos usados en la manufactura del cemento.

TRITURACION, MEZCLA Y PULVERIZACION DE LOS MATERIALES. Se tritura el material después de haberse secado; la trituration es entre 1 y 6 mm o aún menos. Se realiza esto con el material ya

mezclado o por separado; más tarde esta mezcla de materiales se pulveriza finamente en molinos cuyos tipo depende de las características del material empleado. Después se debe hacer un análisis cuidadoso para agregar aquel material que esté escaso.

Parece ser que el factor más importante para la calidad de un cemento es la pulverización fina y la mezcla de los componentes debido a que el cemento en su proceso no se funde sino que se escarifica (se hace costras) en forma incipiente. En el caso de que no se lleve a cabo una mezcla, la reacción no se verifica adecuadamente; al no fundirse la cal, la alúmina y la sílice bajo una temperatura que no excede de 1600°C, y no se llegue a la fusión.

CALCINACION DE LA MEZCLA PARA CEMENTO. El único horno que da resultado satisfactorio para esta operación, es el rotatorio de trabajo continuo.

Como combustible se usa gas natural, petróleo crudo o carbón mineral pulverizado. El "clinker" bien calcinado es negro verdoso y algo vidrioso; el tamaño más apropiado es como de 1.5 cm. de diámetro. Uno de los medios para conocer el estado de calcinación del "clinker" es el color y su apariencia. Cuando le ha faltado calor tiene puntos cafés o negros o es café en su totalidad.

Teniendo condiciones medias, un horno mediano rotatorio, de 2.4 m de diámetro por 45 m de largo, produce 300 toneladas en 24 horas y uno de 2.7 m de diámetro por 45 de largo, produce 375 en el mismo tiempo.

2.3 TIPOS DE CEMENTOS

El Instituto Americano del Petróleo ha clasificado diferentes tipos de cemento para los pozos, los primeros 4 tipos son básicamente los mismos que los usados para la construcción. La química de estos cementos es algo complicada. La densidad de una lechada es de 1.8 gr/cm^3 por lo general, aunque puede ser más alta.

Los cementos clasificados de la A a la H, se usan de la superficie hasta los 2440 m (8000 pie). Pueden utilizarse a profundidades mayores usando aceleradores y retardadores para cubrir un rango mayor de profundidad y temperaturas en el pozo.

Algunas veces se tiene el cemento clasificado como tipo "J" que cubre profundidades hasta de 4880 m bajo condiciones de presión y temperatura extremadamente altas. Todos los cementos antes mencionados tienen resistencia al sulfato moderada o alta según sea necesario.

CEMENTOS ESPECIALES

1. CEMENTOS PUZOLANICOS. Los materiales artificiales o naturales que contienen un porcentaje suficientemente grande de sílice susceptible de combinarse con el hidróxido de calcio y formar un cemento de propiedades hidráulicas, son conocidos con el nombre de puzolanas. Las puzolanas pueden usarse como un aditivo para un cemento ordinario o preparado como combinación puzolona-cal.

Dos clases de puzolanas están en uso la natural de origen volcánico y la sintética. Una forma común más reciente es la

ceniza volátil producto de la combustión de carbón pulverizado que se obtiene en las plantas generadoras de vapor. El sistema cementante puzolana-cal ha probado que es bueno para usarse en pozos petroleros profundos.

Los cementos puzolanicos incluyen todas aquellas clases de morteros hidráulicos que están hechos por la incorporación de puzolanas artificiales con cal hidratada sin calcinación posterior. El cemento puzolanico, con frecuencia llamado cemento de escoria, hecho por la incorporación de la escoria del alto horno, al hidróxido de calcio, sin calcinación posterior no debe confundirse con el cemento Portland que está hecho de la pulverización del clinker derivado de la calcinación de una mezcla hecha íntimamente de materiales similares. Se ha observado considerables variaciones en las propiedades de las puzolanas, y se requieren que sean evaluados individualmente.

2. CEMENTOS DIACEL. Este nombre se le dá a cementos modificados por uno o más aditivos como Diacel D, L W L y A. Tales cementos tienen un rango extenso de densidades y tiempos de espesamiento, lo que les dá un campo amplio de aplicabilidad. La arena fina (95% pasada por malla 200) se agrega algunas veces para aumentar la primera concentración de la lechada.

3. CEMENTO LATEX. Este es un cemento muy especial compuesto de latex cemento, un agente activador de superficie y agua. Ha probado su utilidad en aplicaciones especiales como lo son trabajos de taponamiento para la exclusión de agua.

Es especialmente resistente a la contaminación con aceite o lodo y tiene un alto poder de unión con otros materiales (lubería, rocas, etc.).

4. CEMENTOS ACEITE-DIESEL (DOC). Mezclas de cemento Portland, aceite, diesel o querosina y un dispersante químico se han empleado con éxito en trabajos de reparación de pozos para sellar la comunicación con el estrato que contiene agua. Este material no se fragua hasta que esté en contacto con el agua y tiene en consecuencia un tiempo ilimitado de bombeo. Ha sido usado también para combatir las pérdidas de circulación.

5. CEMENTOS DE EMULSION DE ACEITE EN AGUA. Son cementos con baja pérdida de agua, y baja densidad, pero de adecuada concentración y tiempo de fraguado; se preparan con kerosina, agua, cemento y bentonita en un 2 a 4 %. Se usa lignosulfonato de calcio como agente emulsificante y retardador. Tales cementos tienen aplicación en las cementaciones primarias y de reparación.

6. CEMENTOS DE RESINAS. Son la combinación apropiada de resinas sintéticas, agua y un cemento Portland; son a menudo utilizados para proveer un aumento en la adherencia de la formación-cemento en ciertas operaciones de reparación. El costo prohíbe el uso de este material para una cementación rutinaria de las tuberías de ademe.

7. CEMENTOS DE YESO. Estas son mezclas especiales que tienen una concentración alta de ingredientes y tiempos de colocación fácilmente controlables. El yeso es el ingrediente básico. Su uso principal es el de proveer tapones temporales durante los trabajos de pruebas y reparación.

8. CEMENTOS CON BAJA PERDIDA DE AGUA. Se han preparado cementos que contienen aditivos especiales para reducir la pérdida de agua a una cantidad muy pequeña cuando se prueban en el filtro-prensa API para lodo. El uso de estos cementos es ventajoso en algunas

cementaciones forzadas, lo mismo que en cementaciones primarias de tuberías donde la pérdida de agua sea un factor importante.

9. CEMENTOS PARA POZOS GEOTERMICOS. Todos los cementos fabricados bajo estas especificaciones deben cumplir con los requerimientos de prueba que se indica en el tema IV tabla 4.4.1.

2.4 ADITIVOS DE CEMENTO

Muchas áreas tienen formaciones que tienden a tomar los fluidos de perforación o las lechadas al presentarse un leve aumento en la presión hidrostática ejercida en el fondo.

La presión ejercida en un pozo durante la cementación es una combinación de la presión necesaria para bombearlo más la presión hidrostática del fluido (lodo de perforación o lechada) en el espacio anular. Debido a que muchas veces poco se puede hacer para reducir la presión de bombeo, la mayor parte de la reducción de presión debe efectuarse disminuyendo la densidad en la lechada, esto reduce la presión hidrostática ejercida por la columna de cemento.

A continuación se citan varios materiales que actúan como aditivos en cualquier lechada de cemento, ver Tabla 2.1.

2.5 HIDRATACION DEL CEMENTO EN AMBIENTES GEOTERMICOS

Un problema referente a todos los cementos hidráulicos, que no se ha resuelto del todo, es conocer las reacciones de hidratación que provocan el espesamiento inicial y el endurecimiento final

del cemento.

Las reacciones de hidratación del cemento no terminan cuando este endurece sino que normalmente continua hidratándose y desarrollando resistencia lentamente durante muchos años.

La transformación del cemento en sus fases cristalinas durante la hidratación esta estrechamente relacionada con el desarrollo de sus propiedades a largo plazo, por ello a temperatura ambiente la resistencia permanece casi constante, mientras que a temperaturas mayores de 100°C, el cemento alcanza su máxima resistencia en las primeras semanas, y empieza a disminuir en forma continua hasta la destrucción del mismo, este fenómeno es conocido con el nombre de retrogresión.

Esta degradación en el cemento por altas temperaturas se debe a cambios en la estructura del cemento hidratado, por lo que es conveniente estudiar los silicatos de calcio hidratados incluyendo sus condiciones de formación, estructura cristalina y propiedades.

Para estabilizar la resistencia de los cementos en los ambientes geotérmicos se necesita la formación del componente más fuerte y estable a estas condiciones: "la xonotlita". Su formación depende de la relación inicial C/S (CaO/SiO_2) en el cemento.

Trabajos recientes sobre retrogresión [Ref. 2] han encontrado que la arena de sílice con tamaño de 70 a 200 mallas es efectiva como estabilizador hasta 150°C de temperatura, mientras la harina de sílice es efectiva a cualquier temperatura.

Se conocen más de 30 fases del silicato de calcio y sus

TIPO DE ADITIVO	USO	COMPOSICION QUIMICA	BENEFICIO	TIPO DE CEMENTO
ESTABILIZADOR A LA TEMPERATURA	CEMENTACIONES A ALTAS TEMPERATURAS	MARINA DE SILICE	RESISTENCIA ESTABILIZADA	TODA LA CLASE API
ACELERADORES	REDUCCION DEL TIEMPO DE FRAGUADO SUPERFICIAL EN TUBERIAS FRAGUADO EN TAPONES DE CEMENTO COMBATIENDO PERDIDAS DE CIRCULACION	CLORURO DE CALCIO CLORURO DE SODIO YESO SILICATO DE SODIO DISPERSANTES AGUA DE MAR	FRAGUADO ACCELERADO ALTA RESISTENCIA TEMPRANA	TODA LA CLASE API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
RETARDADORES	INCREMENTO EN EL TIEMPO DE FRAGUADO EN EL LUGAR REDUCCION DE LA VISCOSIDAD DE LA LECHADA	LIGNOSULFONATOS ACIDOS ORGANICOS CMHC LIGNOSULFONATOS MODIFICADOS	INCREMENTO EN EL TIEMPO DE FRAGUADO MEJORAR LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO	CLASES D, E, G Y H API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
ADITIVOS REDUCTORES DE PESO	REDUCIENDO PESO COMBATIENDO PERDIDAS DE CIRCULACION	BENTONITA-ATAPULGITA GILSONITA DIAGRAMAS DE TIERRA PERLITA PUZOLANAS	PESO LIGERO ECONOMICO MEJORAR LLENADO DENSIDAD BAJA	TODA LA CLASE API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
ADITIVOS AUMENTADORES DE PESO	COMBATIENDO ALTAS PRESIONES INCREMENTANDO PESO DE LA LECHADA	HEMATITA LIMONITA BARITA ARENA DISPERSANTE	ALTA DENSIDAD	CLASES D, E, G Y H API
ADITIVOS PARA CONTROLAR LA PERDIDA DE CIRCULACION	ACORDARIENTO INCREMENTAR LLENADO COMBATIENDO PERDIDA DE CIRCULACION	GILSONITA CASCARA DE NOGAL MOJUELAS DE CELOFAN YESO DE CEMENTO ACTIVO BENTONITA-DIESEL FIBRAS DE NAVLON	FRACTURAS PUENTEADAS ALIGERA COLUMNA DE FLUIDO ZONAS DE FRACTURAS A PRESION MINIMIZAR PERDIDAS DE CIRCULACION	TODA LA CLASE API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
ADITIVOS CONTROLADORES DE FILTRADO	CEMENTACIONES FORZADAS FRAGUADO LARGO EN LINERS CEMENTACION EN FORMACIONES SENSITIVAS AL AGUA	POLIMEROS DISPERSANTES CMHC LATEX	DESHIDRATACION REDUCIDA BAJO VOLUMEN DE CEMENTO MEJORAR LLENADO	TODA LA CLASE API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
DISPERSANTES	REDUCIR POTENCIA HIDRAULICA DENSIFICAR LECHADAS DE CEMENTO PARA TAPONES MEJORAR PROPIEDADES DEL FLUIDO	ACIDOS ORGANICOS POLIMEROS CLORURO DE SODIO LIGNOSULFONATOS	LECHADAS SILUDAS MEJORA LA PERDIDA DE FLUIDO MEJORAR LA RESISTION DEL LODO MEJORAR COLOCACION	TODA LA CLASE API PUZOLANAS SISTEMAS DIACEL
CEMENTOS ESPECIALES O ADITIVOS DE SAL	CEMENTACION PRIMARIA	CLORURO DE SODIO	MEJORAR LA UNION ENTRE SAL, ARCILLA, ARENAS	TODA LA CLASE API
INHIBIDOR DE LODO	NEUTRALIZAR QUIMICAMENTE AL LODO TRATADO	PARAFORMALDEIDOS	MEJORAR LA UNION GRAN RESISTENCIA	CLASES A, B, C, G Y H API
TRAZADORES RADIACTIVOS	TRAZAR PATRONES DE FLUJO LOCALIZAR FILTRACIONES	Sc 46	-----	TODA LA CLASE API
CAL PUZOLANA	CEMENTACION A ALTAS TEMPERATURAS	REACTIVOS SILICE-CAL	ALIGERA PESO ECONOMICO	-----
SILICE DE CAL	CEMENTACION A ALTAS TEMPERATURAS	REACTIVOS SILICE-CAL	ALIGERA PESO	-----
CEMENTO DE YESO	APLICACION EN CONDICIONES ESPECIALES	SULFATO DE CALCIO SEMIHIDRANTE	ALTA RESISTENCIA RAPIDO FRAGUADO	-----
HIDRONITE	APLICACION EN CONDICIONES ESPECIALES	YESO CON RESINA	ALTA RESISTENCIA RAPIDO FRAGUADO	-----
CEMENTO LATEX	APLICACION EN CONDICIONES ESPECIALES	LIQUIDO O POLVO LATEX	MEJOR UNION CONTROLAR FILTRADO	CLASES A, B, G Y H API

TABLA 2.1

productos de hidratación a temperaturas elevadas (entre 150-400°C) en condiciones hidrotérmicas. Se ha observado la presencia de algunas de estas fases en el cemento expuesto a los ambientes geotérmicos. Los silicatos cálcicos hidratados estudiados hasta la fecha se pueden dividir en cinco grupos de acuerdo a su importancia, conforme a la siguiente tabla:

GRUPO	FASE	FORMULA
Wollastonita beta-CS	Xonotlita Nekolita Okenita Fosagita Hillebrandita	C_0S_0H $C_0S_0H_0$ $C_0S_0H_0$ C_4S_4H C_2SH
Tobermorita $C_5S_5H_5$	Portlandita Tobermorita 14 A Tobermorita 11.3 A (Riversideita)	$CSH-(I)$ $CSH-(II)$ $C_5S_5H_5$ $C_2S_4H_5$
Gyrolita C_2S_2	Gyrolita Truscotita Fase Z (de Assarson) Reyerita Pectolita	$C_2S_2H_2$ $C_0S_{10}H_9$ $C_2S_4H_5$ $KC_{14}(Si_{24}O_{60})(OH)_5$ Na C_4S_0H
Gama-Silicato Dicalcico. gama C_2S	Calciochondrodita Kilchoanita gama- C_2SH	C_5S_2H C_3S_2 $C_0S_3H_2$
Otros compuestos	Afwillita alfa- C_2SH Fase Y Silicato tricálcico hidratado	$C_3S_2H_3$ C_2SH C_0S_3H C_3SH

TABLA 2.2

SIMBOLO	C	S	A	F	H
COMPUESTO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O

TABLA 2.3

Las fases cristalinas hidratadas más comúnmente observadas en muestras de cementos expuestos a condiciones geotérmicas son:

TOBERMORITA

Esta se forma como producto intermedio en la mayoría de las reacciones de hidratación entre los iones calcio y sílice en solución acuosa, a temperatura ambiente y hasta 150°C, con relaciones C/S=0.8. Se ha observado que a temperaturas o relaciones mayores en la fase antecesora de la xonotlita, truscotita y otras. La tobermorita es el mayor constituyente del cemento hidratado a bajas temperaturas aunque persiste en pequeñas cantidades a cualquier temperatura. Su determinación es de notable importancia debido a que además de ser un buen cementante, posee alta resistencia y baja permeabilidad.

XONOTLITA

Su formación es muy estable dentro de un rango de 200 a 400°C y con relación C/S=1.0. Se ha observado que la tobermorita se transforma en xonotlita a temperaturas mayores de 200°C, disminuyendo el volumen absoluto de cemento, provocando microfisuras que disminuyen la resistencia un 20%, por lo que esta fase posee moderada resistencia y permeabilidad.

GYROLITA

Se forma con relación C/S menores de 0.8, está asociada con la formación de truscotita y fase Z a temperaturas entre 120 y 240°C. Posee menor resistencia que la xonotlita. Se ha observado que con el tiempo en ambiente geotérmico se transforma

en truscotita.

TRUSCOTITA

Fase estable a 400°C. su formación tiene lugar a la temperatura de 250°C en cementos con relaciones de C/S=0.83. Esta fase presenta mayor resistencia y probablemente proviene de la transformación de la xonotlita formada a 300°C.

PECTOLITA

La formación de esta fase en el campo está asociada con la zeolita y depósitos basálticos altamente básicos; es muy resistente al deterioro por exposición con salmuera, pero tiene muy baja permeabilidad. También puede suponerse que estos componentes se producen por la presencia de una fuente de sodio o potasio activo en la lechada con propiedades y estructura similares a la truscotita.

SCAWTITA

La presencia de esta fase da un indicio de que el sistema cementante ha estado en contacto con salmuera que contienen carbonatos. Trazas de esta fase favorecen las propiedades del cemento, mientras que altas proporciones son perjudiciales. Este compuesto cristalino no es un material cementante y se produce cuando ha estado en contacto la xonotlita con carbonatos.

ALFA SILICATO DICALCICO HIDRATADO

Esta fase se forma cuando no existe la sílice suficiente para formar fases de mayor importancia como xonotlita, tobermorita,

etc., tiene la mayor permeabilidad y menor resistencia de todos los silicatos cálcicos hidratados. La presencia de esta fase va estrechamente relacionada con el fenómeno de retrogresión.

Cabe mencionar que la técnica utilizada durante la inducción de un pozo geotérmico, es un factor muy importante en el comportamiento del cemento, pues un cambio de temperatura muy drástico de 80 a 300°C, afectaría de sobremanera la estructura cristalina y las propiedades del cemento, debido a los esfuerzos térmicos tan grandes que se presentan al abrir un pozo intempestivamente. Se recomienda iniciar la producción lentamente para controlar los esfuerzos de expansión y las reacciones de hidratación del cemento ocasionadas por los cambios de temperaturas.

En la figura 2.1 se presentan los cambios de fase de dos cementos con diferente relación C/S.

PRODUCTOS DE HIDRATACION DEL CEMENTO

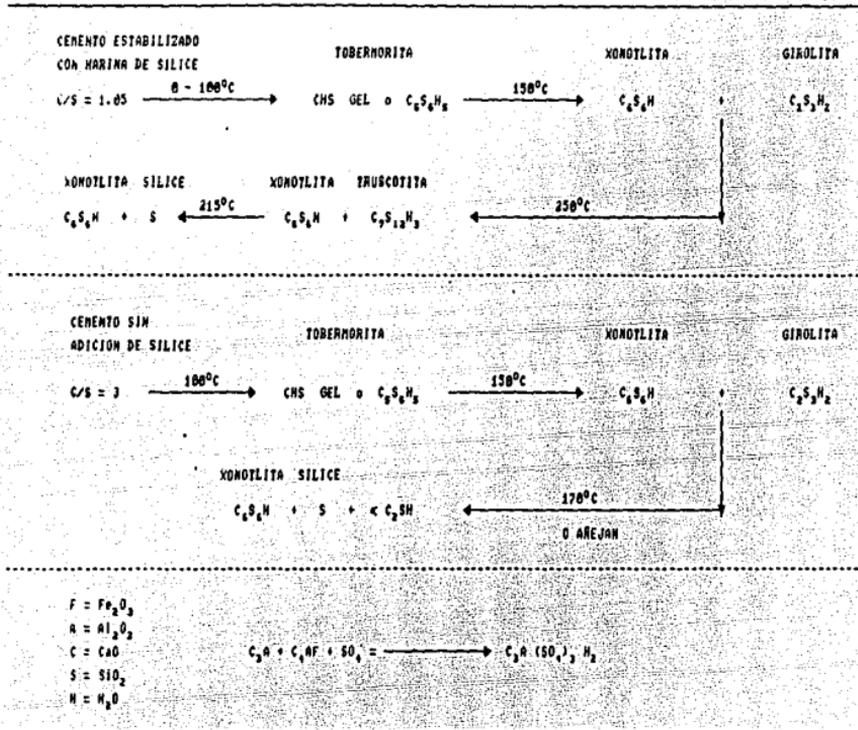


FIGURA 2.1

BIBLIOGRAFIA

1. Cabrera Montero María Isabel, "Cementos, aditivos y su aplicación a la ingeniería petrolera", tesis profesional, México D.F., 1990
2. Mireya A., Morales J. M., "Química del cemento en ambientes geotérmicos", Tecnología de Perforación en pozos geotérmicos, Curso sobre Fluidos de Perforación y Cementos, Capítulo 12, Informe I.I.E. 11/2753/14, Nov. 1988, Cuernavaca Mor., México, Nov. 1988.
3. Morales J. M., Barroso G. H., Baca A., Carreón A. M. "Control de calidad del cemento y aditivos empleados en la cementación de pozos geotérmicos", Tecnología de Perforación en pozos geotérmicos, Curso sobre Fluidos de Perforación y Cementos, Capítulo 12, Informe I.I.E. 11/2753/14, Nov. 1988, Cuernavaca Mor., México, Nov. 1988.

TEMA III

DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS GEOTERMICOS

3.1 ASPECTOS UNICOS EN EL DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO PARA POZOS GEOTERMICOS

La tubería de revestimiento (T.R.) representa normalmente del 20 al 30 % del costo en un pozo geotérmico, los diseños en la sarta de T.R. son, por tanto, elementos críticos para la economía de los proyectos geotérmicos.

Una falla en la sarta de T.R. a menudo conduce a la pérdida del pozo o cuando menos a un gasto mayor en reparación para reestablecer una producción segura. En la figura 3.1 se presenta el perfil de un pozo geotérmico complejo en un yacimiento con problemas como alta temperatura, incrustación y corrosión. Los pozos geotérmicos típicos producen vapor a baja presión y/o salmuera caliente desde profundidades relativamente someras, sin embargo los efectos de las temperaturas entre 177°C y 371°C (350 y 700°F) y el medio ambiente 100 % acuoso crean problemas durante la terminación y la operación de los pozos que son extraños a cualquier operador experimentado en pozos petroleros. Se presentan problemas inusuales en las tuberías de revestimiento, que de otra manera se diseñan apropiadamente para las condiciones básicas de tensión, colapso y estallamiento. Se agudizan las limitaciones de la cementación primaria causadas por las severas condiciones de pozo y acarrear malos resultados.

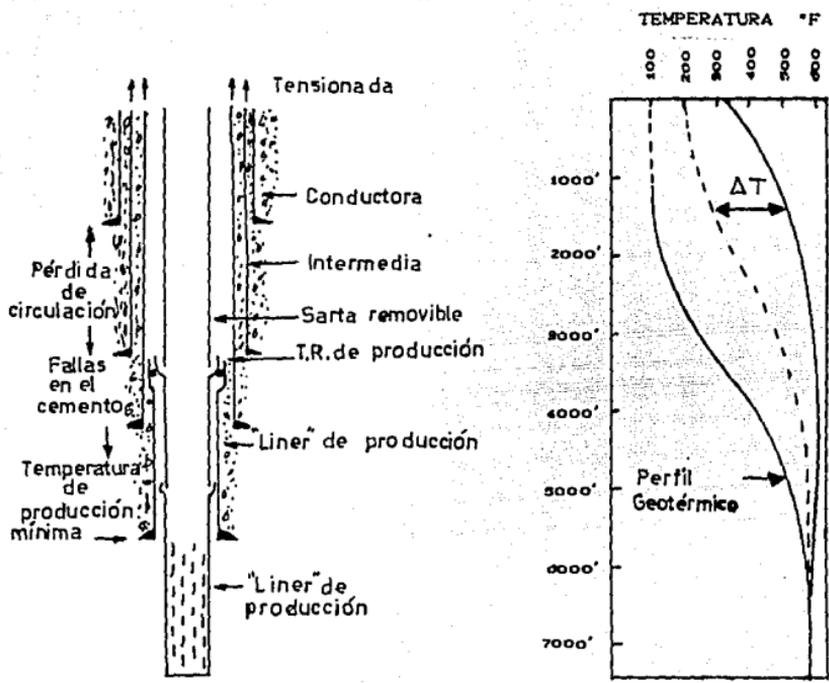


FIGURA 3.1

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE T. R.

Los pozos geotérmicos son relativamente someros, generalmente entre 5,000 y 9,000 pies; Los yacimientos son con baja presión comparados con una columna de agua fresca además los pozos producen a los gastos máximos permisibles a través de las tuberías de revestimiento para minimizar las pérdidas por fricción.

Los factores que limitan el diámetro de las tuberías son el costo, problemas durante la perforación y la cementación de pozos con diámetros grandes, los límites por colapso, y problemas durante la producción. En pozos de vapor seco, un diámetro grande de tuberías puede reducir la velocidad de flujo y causar condensación dentro del pozo.

Las consideraciones en el diseño de T.R. después de haber seleccionado el diámetro, incluyen:

- 1.-El uso de un acero con resistencia mecánica entre baja y moderada para obtener una máxima resistencia a la corrosión, trabajo extremo y posibles fisuras por corrosión-esfuerzo causadas por el H_2S .
- 2.-Selección del peso y grado mediante cálculos básicos de tensión, estallamiento y colapso.
- 3.-Utilización de coples API tipo Buttress o Premium para prevenir fatiga y fallas inducidas térmicamente y en último caso eliminar huecos en el acoplamiento para protección contra la corrosión.

TEMPERATURA

Un parámetro obvio en las operaciones geotérmicas es el régimen

de temperatura, existen tres consideraciones importantes en el diseño de las T.R. relacionadas con la temperatura:

- 1.-Temperatura máxima a lo largo del pozo.
- 2.-El perfil geotérmico de temperatura estática.
- 3.-El cambio máximo de temperatura al cual la sarta podrá o estará sujeta.

En la figura 3.1 se indican estas tres consideraciones (temperatura vs profundidad).

La temperatura máxima a lo largo del pozo afecta otros parámetros tales como tipo de acero, resistencia (esfuerzo), velocidad de corrosión, incrustación, presiones, materiales de sello, diseño de lechada y el mecanismo de cementación.

Existen esencialmente cuatro rangos de temperatura dentro de la geotermia:

- a) Yacimientos con baja temperatura ($T \leq 90^{\circ}\text{C}$).
- b) Yacimientos con temperatura moderada ($90^{\circ}\text{C} < T \leq 150^{\circ}\text{C}$).
- c) Yacimientos con alta temperatura ($150^{\circ}\text{C} < T \leq 427^{\circ}\text{C}$).
- d) Yacimientos con super-temperatura ($T > 427^{\circ}\text{C}$).

Existen también temperaturas de Magma de 1093°C y mayores. En este trabajo se discute sobre yacimientos con temperaturas entre 90°C y 427°C .

El perfil de temperatura estática está definida como la temperatura de la tierra a lo largo del eje del pozo, para un pozo no desviado es equivalente al gradiente geotérmico. Para un periodo de tiempo largo sin flujo tanto del pozo hacia afuera como de las formaciones al pozo, la temperatura de la tierra es aquella a la cual estará sujeta la T.R. para cada profundidad.

Este conjunto de datos de temperatura vs profundidad es de

extrema importancia en el diseño de la T.R. ya que estas son las temperaturas iniciales para muchos cálculos de diseño. El cambio máximo de temperatura está entre una temperatura superior (que existirá después de un periodo largo de condiciones estáticas o de producción) y una temperatura inferior (que puede imponer y controlar el operador en el pozo). Estos límites de temperatura afectan principalmente la resistencia del acero necesaria y el diseño del modelo de esfuerzos. El operador tiene un considerable control sobre la temperatura mínima, por tanto el modelo de esfuerzos puede ser controlado.

PROGRAMAS DE DIÁMETROS PARA LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

El programa de diámetros para las T.R. utilizadas en los pozos geotérmicos en un yacimiento específico afecta significativamente el costo total de los pozos. El yacimiento dicta primeramente el régimen de temperatura y los parámetros controlados por el fluido tales como incrustamiento y corrosión. El diseñador del pozo se encuentra con consideraciones económicas demasiado conflictivas al determinar el programa de diámetros para las T.R., la geología y las condiciones de perforación usualmente marcan las profundidades óptimas para colocar las T.R., por un lado el diseñador necesita un pozo que produzca al mayor gasto de acuerdo a las restricciones impuestas por los usos del fluido (como los requerimientos de temperatura y presión para las plantas generadoras de electricidad). El quiere éste gasto durante el mayor tiempo posible y quiere limitar los paros en la producción ocasionados por la formación de incrustación, problemas de corrosión y/o pérdidas del pozo.

En el lado contrario el pozo es más costoso conforme aumenta el diámetro en el agujero y en las tuberías, estos costos adicionales son por tuberías con mayor diámetro, aumento en el volumen de fluidos para perforación, barrenas y componentes de la sarta de perforación más caros, mayores equipos en el cabezal y a la larga equipos de perforación más costoso.

Existen a menudo restricciones en diámetros máximos debido a la disponibilidad del acero necesario por las temperaturas y los fluidos en el medio geotérmico, además los diámetros del agujero y las tuberías usadas en las operaciones presentes son aquellas disponibles en la industria petrolera. Diámetros de tubería diferentes a los utilizados resultan extremadamente caros y rara vez serán justificados económicamente para uso geotérmico.

3.2 FORMA DE IDENTIFICAR LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Las peculiaridades básicas para la identificación y selección de tuberías de ademe, cuando han perdido las marcas o colores de fábrica es mediante el troquel que tiene cada tubo en el extremo donde va la caja, el troquel y los colores indican las características siguientes:

DIAMETRO

Exterior o Interior (el diámetro exterior no cambia aún y cuando la tubería sea de diferente peso).

GRADO

Especifica la composición del acero o el material con que está fabricado el tubo.

RANGO

Es la longitud del tubo y hay tres tipos de rango (0-7), (0-9) y (0-11)m.

PESO

Es el peso correspondiente a una unidad de longitud ya sea en kg/m o lb/pie.

JUNTA

Es la unión o caja integral o cople que tiene el tubo en uno de sus extremos, los hay de dos tipos:

a) Con cople.

b) Sin cople e integral.

DRIFT

Es lo que el fabricante recomienda como diámetro interior garantizado (Diámetro interno de trabajo).

ROSCA

Es el maquinado que se le hace a cada tubo en los extremos, hay de varios tipos (Redonda, Buttress, Armco, Hydril, Mannesman), estos tipos de roscas las lleva el tubo en ambos extremos, por eso cuando se trata de utilizar tuberías con roscas diferentes se recurre a una combinación. La diferencia de las roscas estriba en el ángulo, las roscas tipo Buttress, Armco, Hydril y Mannesman tienen la ventaja sobre la redonda de resistir más a la tensión que el propio cuerpo del tubo. La rosca del tubo está en función de la resistencia y grado del tubo.

Al diseñar la tubería de revestimiento por tensión deberá revisarse la resistencia del cuerpo del tubo, así como el tipo de rosca y tipo de junta. A medida que la tubería es de mayor diámetro la resistencia a todos los esfuerzos disminuye.

3.3 FUNCIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Las tuberías de ademe o revestimiento en un pozo, tienen varias funciones, de acuerdo a su colocación en el pozo una tubería se clasifica como:

Tubería conductora

Tubería superficial

Tubería intermedia

Tubería de explotación

Tubería corta o "Liner"

TUBERIA CONDUCTORA

Las funciones de esta tubería son evitar la erosión y las inundaciones en la base del equipo de perforación, transportar el fluido de perforación a las presas de asentamiento y succión.

Cuando se está perforando y se está utilizando esta tubería no se tienen conexiones o válvulas de control (preventores) instalados, principalmente por no ser necesarios.

TUBERIA SUPERFICIAL

Esta es la primera tubería que se introduce al agujero perforado, su profundidad varía de 500 a 1000 metros y tiene como funciones principales las siguientes:

- 1.-Sirve como base para los primeros equipos controladores del pozo (preventores) y permite continuar la perforación.
- 2.-Sostiene mediante cuñas las siguientes tuberías de ademe que se introducen al pozo.

- 3.-Aislar formaciones deleznable y acuíferos superficiales, por esta razón la tubería se cementa en toda su longitud.

TUBERIA INTERMEDIA

Es la segunda tubería de ademe que se introduce en el agujero perforado, esta tubería puede cementarse en toda su longitud, se coloca hasta una profundidad entre 1000 y 2000 m, dependiendo de la profundidad total del pozo, sus funciones principales son:

- 1.-Aislar la formación perforada.
- 2.-Permitir elevar la densidad del fluido de control si se requiere.
- 3.-Anclar la siguiente tubería que se introduzca en el pozo.
- 4.-Proteger la T.P. en caso de problema.

TUBERIA DE EXPLOTACION

Es la tercera tubería de ademe que se introduce en el agujero perforado hasta una profundidad de 2500 y 3300 m, todas las tuberías de ademe que se introducen al pozo antes de esta, tienen funciones muy importantes, pero no tienen la trascendencia que tiene la de explotación ya que esta es determinante en la vida del pozo. Un mal diseño de esta tubería puede tener como consecuencia erogaciones substanciales en las reparaciones para corregir un error de esta naturaleza.

Sus principales funciones son:

- 1.-Tener un conducto seguro para que los fluidos geotérmicos lleguen hasta la superficie y un medio para control del yacimiento por explotar.
- 2.-Explotar el pozo.

3.-Anclar herramientas.

TUBERIA CORTA O LINER

La tubería corta se cuelga de la tubería de producción para alcanzar el intervalo productor y tiene ranuras para permitir el paso de los fluidos geotérmicos.

3.4 DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Para obtener un programa óptimo de la tubería de revestimiento se deberán conocer las profundidades del pozo y la densidad del lodo utilizado al perforar. También es importante conocer las propiedades físicas de las tuberías y las conexiones incluyendo en ellas las resistencias a la presión interior, a la presión exterior (colapso o aplastamiento) y a la deformación por efecto de peso (tensión). El Instituto Americano del Petróleo (API) establece normas para la fabricación de productos que se emplean en la industria del petróleo, las especificaciones que rigen a los productos tubulares son las 5A, 5AC y la 5AX, que establecen el peso-unidad de longitud (lb/pie o kg/m), el rango de la tubería (R1, R2 o R3), el diámetro exterior, el peso del tubo, el diámetro libre de trabajo, el grado de acero, el espesor del tubo, los métodos de fabricación y el tipo de conexión del tubo.

Los grados de acero son identificados por letras y números, que determinan la calidad de acero. Los números señalan el esfuerzo mínimo para la deformación Y_p , en otras palabras es el esfuerzo que soporta la T.R. con una elongación menor del 0.5% y la letra indica la calidad y determina el máximo esfuerzo. La siguiente

tabla indica los grados de tubería comunmente empleados.

Grados API	Mínimo Esfuerzo(lb/pgz)	Máximo Esfuerzo(lb/pgz)
H-40	40,000	80,000
J-55	55,000	80,000
K-55	55,000	80,000
C-75	75,000	90,000
L-80	80,000	95,000
N-80	80,000	110,000
C-95	95,000	110,000
P-110	110,000	140,000
V-150	150,000	-----

TABLA 3.1

Las tuberías para quedar dentro de las especificaciones se someten a la prueba de presión hidrostática que es la más severa y que se basa en 60 u 80% del valor del mínimo esfuerzo a la deformación este rango de porcentaje es aplicado dependiendo del grado y diámetro de la tubería, por ejemplo para los aceros H-40, K-55 y J-55 en diámetros de 10 3/4" y mayores se empleará el 60% y para los otros grados de acero y diámetros menores el 80%. La ecuación empleada para esta prueba es la siguiente:

$$Ph = (2FSL)/D \dots \dots \dots (1)$$

donde:

Ph: Presión Hidrostática (lb/pg²)

FS: 0.60Yp o 0.80Yp (lb/pg²)

Yp: Mínimo esfuerzo a la deformación (lb/pg²)

t: espesor del tubo (pg)

D: Diámetro exterior (pg)

CONEXIONES

Las tuberías son fabricadas generalmente con roscas en ambos extremos y posteriormente se conecta la junta o cople en uno de ellos, con excepción de la tubería denominada de extremos planos (extreme line) cuyas roscas son maquinadas en el cuerpo del tubo.

Las tuberías son nominadas conforme al número de hilos en la rosca redonda con cople corto o largo (8 h.r.r.c.c.^M o 8 h.r.r.c.l.^{MM}) de acuerdo con la longitud de la rosca en la T.R. a usar (en la norma Spec 5-A del API se encuentran las dimensiones de las roscas y los coples).

La carga axial que puede soportar una junta cople se denomina como resistencia a la tensión. El boletín 5-C3 del API en la sección 20.4 da las ecuaciones para calcular la resistencia al desprendimiento para roscas de tipo Redondo, Buttress con extremos planos o lisos.

Generalmente la tubería de revestimiento representa uno de los puntos de mayor costo en el trabajo de perforación de un pozo, por lo que la columna ideal sería aquella cuyo peso fuera el más ligero y el de menor grado de acero posible, pero que asegure no fallar ante los esfuerzos y condiciones ambientales a los que será expuesta.

Es por eso que el diseño se efectúa para que dichas columnas soporten esfuerzos para evitar:

- 1.-La ruptura debida a una presión interna.

^M 8 hilos rosca redonda cople corto

^{MM} 8 hilos rosca redonda cople largo

- 2.-El colapso o aplastamiento ocasionado por el exceso de una presión externa.
- 3.-El desprendimiento o falla ocasionada por esfuerzos axiales debidos al peso propio de la tubería.

FACTOR DE DISEÑO

Debido a que los materiales con que se construyen las T.R. tienen propiedades físicas que son determinadas estadísticamente y que las propiedades de una pieza individual de T.R. pueden desviarse considerablemente del promedio estadístico, se ha introducido el concepto de factor de seguridad que es la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de trabajo. La selección del factor de diseño en cualquier problema de ingeniería está gobernado por cuatro consideraciones básicas.

- 1.-La realidad del grado de resistencia utilizado en diseño.
- 2.-El grado de similitud entre las condiciones de servicio y las condiciones de prueba.
- 3.-La realidad del dato de carga utilizado en el diseño.
- 4.-La consecuencia de la falla (posibilidad de peligro personal e incremento en los costos).

En el caso de diseño de las T.R. se utilizan las condiciones más drásticas posibles, en colapso se supone que la presión interior es cero, en presión interna se desprecia la flotación por lo cual resulta una carga axial aproximadamente 12% mayor que la real. La pérdida económica en cualquiera de los casos es considerable.

Los factores de seguridad a utilizar como normas en el diseño de las columnas de tuberías de revestimiento se indican en la tabla 3.2.

PRESION INTERNA

El API establece que la presión interna que resiste una T.R. (Internal yield pressure) estará en función del diámetro exterior (D), el mínimo espesor en la pared (t) y el mínimo esfuerzo a la deformación del tubo (Yp). La siguiente ecuación establece que el valor de la presión interna será:

$$P=1.75(Y_p)(t)/D \dots\dots\dots(2)$$

donde:

P: Presión interna mínima para causar deformación permanente (lb/pg²)

La presión necesaria para reventar una junta o cople de un tubo tendrá que ser superior a la calculada por la ecuación anterior.

Al diseñar una tubería por presión interna, se deberá considerar un factor de seguridad (DFI) que varía entre 1.0 y 1.75. Este factor afectará el valor calculado de la presión en la superficie. La máxima presión en la superficie se obtiene cuando la tubería se llena con gas de la formación; Una ecuación empírica aplicable para determinar esta presión es:

$$P_s = P_b / (\exp(G_x L_x 34 \times 10^{-6})) \dots\dots\dots(3)$$

TUBERIA DE REVESTIMIENTO				
TIPO DE TRABAJO	SUPERFICIAL	INTERMEDIA	EXPLOTACION	CORTA
COLAPSO	NO	CON DIFERENCIA DE DENSIDAD ENTRE EL LODO Y AGUA POR EL FACTOR DE 1.125	SI	NO
TENSION	SI	SI	SI EN T.R. CORTA. NO EN T.R. CORTA FACTOR DE SEG. 1.8. POZOS DIRECCIONALES 2.0	NO
PRESION INTERNA	NO	SI FACTOR DE SEGURIDAD 1.25 DE LA PRESION DE FRACTURAMIENTO	SI FACTOR DE SEGURIDAD 1.25 DE LA PRESION DE FRACTURAMIENTO	NO
DESGASTE INTERNO	NO	SI EN CASOS ESPECIALES. CONSIDERAR 20% ADICIONAL AL DISEÑO (ESPESOR O GRADO T.R.)	SI EN CASOS ESPECIALES. CONSIDERAR 20% ADICIONAL AL DISEÑO (ESPESOR O GRADO T.R.)	SI POR VIAJES T.P.
FATIGA POR FLEXION O COLUMNA	SI POR CONTINUAR PERFORANDO	SI POR CONTINUAR PERFORANDO	SI POR CONTINUAR PERFORANDO	NO
CORROSION	RARA VEZ	RARA VEZ	SI	SI
DISPAROS	NO	NO	SI	OCASIONALMENTE
EROSION	NO	NO	SI	SI

TABLA 3.2

donde:

Ps: Presión en la superficie (lb/pg^2)

Pb: Presión en el fondo (lb/pg^2), cuando se desconoce la presión de fondo es válido emplear la presión ejercida por la columna del lodo.

exp: Logaritmo base natural = 2.7182818

G: Densidad relativa del gas, normalmente se usa la del metano (CH_4). = 0.545

L: Profundidad del pozo (pies).

De lo anterior se deduce que $P_s < P$ y el valor de P_s será el utilizado para el cálculo de diseño por presión interior.

PRESION DE COLAPSO O APLASTAMIENTO

La resistencia al colapso de una tubería está en función del diámetro exterior, el espesor en la pared y el grado de acero. La resistencia al colapso se ha investigado, tanto teórica como experimentalmente; el API emplea cuatro ecuaciones para determinar la presión de colapso, basadas en diferentes tipos de fallas: elástica, transición, plástica y de cedencia o deformación.

El uso específico de las ecuaciones está gobernado por la relación del diámetro exterior (D), el espesor de la pared (t) y de las características del material (Y_p). Cabe aclarar que las fórmulas para el tipo de falla elástica y deformación son del tipo teórico, mientras que las fórmulas para el tipo de falla plástica o de transición se determinaron por datos experimentales.

Otro factor importante (que hay que considerar) y determinante en el diseño, es la fuerza axial a que está sujeta una tubería;

Este fenómeno está determinado por la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales, que determina una reducción sobre la presión de colapso debida al peso de la tubería (carga o fuerza axial).

La ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales es la siguiente:

$$X^2 + Y^2 + XY = 1$$

$$X = T / (C Y_p x A_s) \quad (\text{adim.}) \dots\dots\dots (4)$$

$$Y = [1 - 0.75 X^2]^{0.5} - 0.5 X \quad (\text{adim.}) \dots\dots (5)$$

donde :

T = Tensión o peso de la tubería en la sección considerada (lb).

A_s = Área en la sección transversal del tubo considerada (pg²).

Para corregir la presión de colapso por efecto de la carga axial:

$$P_{ca} = Y_x P_{co} \dots\dots\dots (6)$$

donde:

P_{ca}: Mínima presión de colapso bajo efecto de tensión (lb/pg²).

P_{co}: Mínima presión de colapso sin efecto de tensión (lb/pg²).

El diseño de una columna de tubería de revestimiento por presión de colapso se afecta por un factor de seguridad al colapso (DFc) que varía entre 1.0 y 1.5, llegandose a utilizar para zonas con presión anormalmente alta o formaciones deleznable valores mayores.

Para considerar la presión de colapso, es práctica común presumir que la presión por fuera de la tubería es resultante de la presión ejercida por la columna de lodo, de esta manera el valor mayor de presión se encontrará en el fondo del pozo y el menor valor en la superficie.

El procedimiento matemático se expresa como:

$$P_c = (0.052 \times W \times L) \times DF_c \dots\dots\dots (8)$$

donde:

P_c: Presión de colapso (lb/pg²)

W: Densidad del lodo (lb/gal).

L: Profundidad del pozo (o también una sección considerada, pie).

0.052: Gradiente de presión para un fluido cuya densidad es igual a 1 lb/gal (lb/pg²/pie).

A medida que la profundidad disminuye la presión ejercida por la columna de lodo también disminuye, por lo tanto una columna de tubería combinada en peso y grado, es a menudo empleada, siempre que satisfaga los requerimientos de los factores de diseño, con el menor costo de inversión de ahí que P_c < P_{co} cuando éste efecto es considerado; La determinación de las profundidades a que deberán ser introducidas las diferentes tuberías a usarse

involucra un cálculo de ensaye y error o bien por solución gráfica.

TENSION

La resistencia a la tensión de una tubería es función del área en la sección transversal y de la mínima resistencia a la deformación que depende del grado del acero, resultado de esto es que el cuerpo del tubo es de mucho mayor resistencia que el cople o unión, esta consideración en el diseño depende en gran parte de la resistencia de la unión al igual que en las dos consideraciones anteriores, en esta tercera se involucra el factor de seguridad a la tensión (Dft) y que es la relación de la resistencia de la unión o junta propuesta a la carga axial para la columna de tubería, matemáticamente se expresa:

$$Dft = JT/T$$

donde:

JT: Resistencia a la tensión de la junta

T: Tensión o peso de la columna de tubería

Los factores de diseño a la tensión varían para el cuerpo del tubo de 1.6 a 1.8 y para la junta o unión de 1.8 a 2.0

3.5 DATOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DE UNA TUBERÍA DE ADEME

Los datos que debe conocer el Ingeniero encargado de la elaboración del diseño de una tubería de ademe son:

a). -Diámetro exterior de la T.R.

- b).-Diámetro de la barrena.
- c).-Densidad del fluido de control en el pozo.
- d).-Profundidad a la cual se va a introducir la tubería.
- e).-Presiones internas a que se someterá la T.R. durante la operación.
- f).-Factor de seguridad para los diferentes esfuerzos.

3.6 DISEÑO DE TUBERIAS PARA ADEME METODO YOUNGSTOWN

El diseño de tuberías para ademe es un problema netamente ingenieril, que requiere un análisis cuidadoso para lograr resultados satisfactorios en el aspecto técnico, así como en el económico. De no cumplirse con 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 y esfuerzos a que va a estar sometida la tubería durante la perforación y la terminación del pozo que se trate. Es de todos conocido que cuando se termina un pozo la tubería para ademe 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, ya que esto es propiamente el complemento del diseño.

Generalmente el diseño se basa únicamente en la profundidad, sin embargo en muchas ocasiones existen zonas geopresionadas o de presión anormal que deben tomarse en cuenta.

CONTENIDO DE LAS GRAFICAS

Con las gráficas que se anexan al final, se pueden diseñar tuberías de ademe de 4 1/2 a 13 3/8" de diámetro y profundidades que varían de 0 a 7,000 m con densidades de fluidos de control de 0.8 a 2.5 gr/cc.

DESCRIPCION DE LAS GRAFICAS

Las gráficas de referencia están comprendidas en dos partes, una al lado derecho denominada I y la del lado izquierdo como II.

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 con 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 la T.R. de 7 5/8" se tienen L, X, 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 2.5 gr/cc así como profundidades de 0 a 7,000 m ya antes indicadas. Para

diseñar una columna de ademe deben vigilarse 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 considerese que la tubería esta flotando en el aire, o sea, en un pozo vacío, y en el segundo que esta flotando parcialmente, debido al empuje del fluido de control en que se ha introducido.

USO DE LAS GRAFICAS

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 la profundidad a que se va a introducir la tubería de ademe, 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 10,000 pies.

$$L=3048.78x \frac{pws}{(pws-pwa)}$$

donde:

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

pws : Densidad del acero (7.853 gr/cc).

pwa : 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 METODO

En la gráfica I se trazan tantas rectas como pesos de tubería de ademe 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 tuberías (39.0, 33.7, 29.7, 26.4) en el caso de la gráfica para T.R. 7 5/8".

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 grado-peso de la misma gráfica. El origen de la siguiente 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, 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.

3.7 REVISION DEL DISEÑO DE LA TUBERIA DE ADEME

REVISION A LA TENSION

Del punto formado por la intersección de la paralela con la parte superior de la gráfica I se baja una perpendicular hasta la parte inferior de la misma gráfica, en donde están marcados los valores a la tensión. Con esto obtenemos un valor de la tensión para cada sección de tubería del mismo grado, por lo que se hace lo mismo para los diferentes puntos formados por las intersecciones de las paralelas con las gráficas o curvas.

Ahora bien, si el peso de la tubería que resulta de esa proyección es mayor que el valor que indica la tabla del manual (para la tensión afectada por su factor de 1.8) 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.

REVISION POR COLAPSO

Determinese 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 este valor determinado es mayor que el que resiste la tubería de ademe en el fondo del pozo, afectado por el factor (1.0 a 1.125) se procede a su cambio, por otra de mayor resistencia a este esfuerzo, se hace lo mismo para los demás puntos formados por las intersecciones de las paralelas con las gráficas o curvas.

REVISION POR PRESION INTERNA

Se busca en el manual de tablas de resistencias, el valor de la presión interna que resiste la sección de tubería que estamos revisando. Todos los valores obtenidos de la revisión al colapso a la tensión y a la presión interna son valores teóricos por lo que es necesario comprobarlos y en caso necesario corregirlos

Para realizar la comprobación o corrección de las diferentes secciones de tubería diseñada se hará lo siguiente:

a).-Con los datos de diámetro, grado y peso de cada sección de tubería diseñada gráficamente, nos vamos a las tablas de los manuales para determinar las resistencias, de esta forma obtenemos un valor de resistencia al colapso, el cual lo dividimos entre el factor de seguridad al colapso y así determinamos el valor real de resistencia al colapso que debe

tener la sección de tubería.

b).-Este valor real de resistencia al colapso obtenido se compara con el valor de resistencia al colapso teórico y si este último es mayor o igual al valor de resistencia real esto nos indica que el diseño es correcto para esta sección de tubería.

c).-En caso contrario en que el valor de resistencia teórico sea menor que el valor de resistencia real, entonces nos indicará que el diseño teórico es incorrecto por lo que es necesario corregirlo tomando un mayor peso u otro grado para esta sección de tubería con lo cual aumentamos su resistencia y se procede de la misma manera para comprobar si con tomar una tubería de mayor peso o grado de resistencia fué suficiente para superar o igualar el valor real de resistencia que necesita dicha tubería.

d).-Este mismo proceso se hace para comprobar si el diseño gráfico satisface las demás secciones de tubería de diferente grado, así como para la revisión a la tensión.

3.8 COMPROBACION GRAFICA DEL DISEÑO DE LA TUBERIA DE ADEME

1.-En una hoja de papel milimétrico elijanase las escalas, una vertical para las profundidades y dos horizontales, una en la parte superior para la tensión y la 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 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 corresponda 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 el 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 tres ejes a escala procederemos a efectuar la comprobación gráfica de la siguiente manera:

ADREVISION A LA TENSION

Del valor indicado por el diseño real, determínese el que corresponde al de la tubería superficial, bájese una vertical hasta interceptar la proyección de la siguiente horizontal, y unanse por medio de líneas rectas como se muestra en la figura 3.1A.

Si estas líneas no interceptan en ninguna parte de la línea que

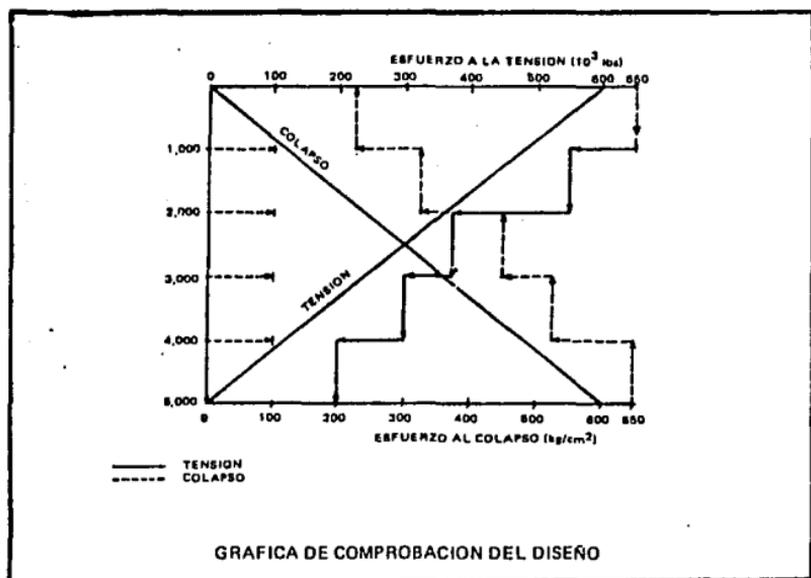


FIGURA 3.1A

representa a las tensiones, esto indicará que el diseño es correcto, pero si existiera alguna intersección deberá de cambiarse el tramo de tubería por otro que tenga mayor resistencia a este esfuerzo.

B) REVISION AL COLAPSO

El procedimiento para revisar por colapso es similar al anterior, la única diferencia que existe es que 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 línea 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.

3.9 DISEÑO DE LA T.R. PARA REGIMEN DE TEMPERATURA EN POZOS GEOTERMICOS

Anteriormente se definieron tres aspectos de la temperatura que afectan el diseño de las T.R. y son:

- 1.-Máxima temperatura en el pozo.
- 2.-La temperatura geotérmica a lo largo del pozo.
- 3.-El cambio máximo de la temperatura a través del pozo.

Estos aspectos afectan el tipo de material de la tubería, los

procedimientos de instalación y las condiciones de operación dentro del pozo. En la tabla 3.3 se presenta un resumen con las ecuaciones utilizadas para estimar varios aspectos en el diseño e instalación de la T.R.

TENSION 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 muestran en la tabla 3.3, por ejemplo la figura 3.2 muestra el gradiente geotérmico durante la producción para el pozo HOPA, la temperatura cerca de la superficie varía desde 260°C (500°F) durante la producción hasta los 38°C (100°F) cuando está cerrado, esto puede ocasionar un cambio en los esfuerzos por compresión de 82,800 psi en tubería confinada. La pre-tensión de la T.R. durante la instalación puede reducir éste cambio máximo hasta cerca de 45,000 psi en tensión (pozo frío) o compresión (pozo productor con diámetro 9 5/8 pulg., 43.5 lb/pie N-80 pre-tensionado a 585 000 lbs.). La reducción en el nivel de esfuerzo también es benéfico para reducir los problemas de corrosión.

PRE-TENSION

Se deben tomar dos precauciones cuando se considera la pre-tensión, primera la inyección de fluido al pozo puede causar que la tubería sea sobre tensionada y falle, segunda la carga en el cabezal del pozo debe ser la adecuada para deslizamiento, la

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: $\Delta L = (6.9 \times 10^{-6}) \times \Delta t \times L$

DIAMETRO: $\Delta D_o = (6.9 \times 10^{-6}) \times D_o \times \Delta t$

"P.P.": $\Delta T = 2.27 \times w \times W_p \times (T \times D_o^2 / I)^{1/2}$

TEMPERATURA PROMEDIO:

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

DESPLAZAMIENTO DE LA TUBERIA:

$$F_{C_5} = [1 + (R_1 \times 2.3 / L_5)] + (R_1 \times 2.3 / L_5)^2]^{-1/2} \times (1/A_5 \times Y_5)$$

CARGA PARA EL CORTE DE ADMIRENCIA:

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

DONDE:

A_5 = AREA DE LA PARED DE LA TUBERIA (Pg^2)

D = PROFUNDIDAD (pie)

D_o = DIAMETRO EXTERIOR DE LA TUBERIA (Pg)

ΔD_o = CAMBIO EN EL DIAMETRO (Pg)

D_1 = DIAMETRO INTERIOR DE LA TUBERIA (Pg)

E = MODULO DEL ACERO (Psi)

F_{C_5} = CARGA MAXIMA DE DESPLAZAMIENTO (lb_1)

ΔF_1 = CAMBIO EN LA CARGA AXIAL (lb_1)

I = MOMENTO (Pg^4)

L = LONGITUD DE LA TUBERIA (pie)

L_5 = LONGITUD DEL DESPLAZAMIENTO

M_1 = PENDIENTE DE CURVA DE TEMPERATURA A CONDICION 1

M_2 = PENDIENTE DE LA CURVA DE TEMP. EN 2

R_1 = RADIO DE LA TUBERIA

S_T = ESFUERZO DESIDO AL CAMBIO DE TEMP. Psi

S_{CHT} = ESFUERZO COMPRESIVO DEL CEMENTO Psi

Δt = CAMBIO DE TEMPERATURA

t_{D_1} = TEMPERATURA A LA CONDICION 1

t_{D_2} = TEMPERATURA A LA CONDICION 2

ΔT = CAMBIO EN LA TENSION lb_f

T = TENSION lb_f

W_p = PESO DE LA TUBERIA lb/pie

Y_5 = CEDENCIA MINIMA Psi

w = PATA DE FERRO "P.P." ($^{\circ}/100$ pies)

TABLA 3 - 3

ecuación se indica en la tabla 3.3.

La pre-tensión requiere que la T.R. sea anclada, esto puede realizarse mecánicamente dentro 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 se muestra en la fig. 3.3.

Por ejemplo para pre-tensionar con 585 000 lbs. tubería de 9 5/8 pulg. en el cemento, requiere una longitud bien cementada de solamente 40 pies para un cemento con 1500 psi de resistencia de compresión. En la práctica se necesitan tener cuando menos 100 pies de tubería cementada para asegurar 40 pies de cemento bueno. Clavar 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 y 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. Un detalle en la figura 3.2 representa esta situación. Por ejemplo una T.R. con 9 1/2" de diámetro y 43.5 lb/pie a 5,000 pies cementada convencionalmente tendrá una carga por compresión a los 5,000 pies de 14.019 psi (el cemento con densidad de 16.2 lb/gal desplazado genera una fuerza neta hacia arriba de 178,000 lbs sobre una área en la pared de la T.R.

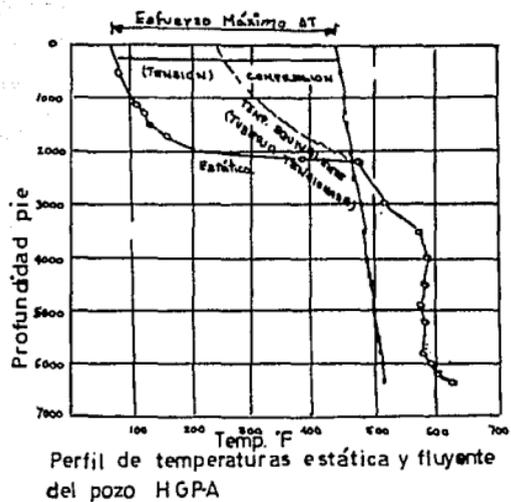


FIGURA 3.2

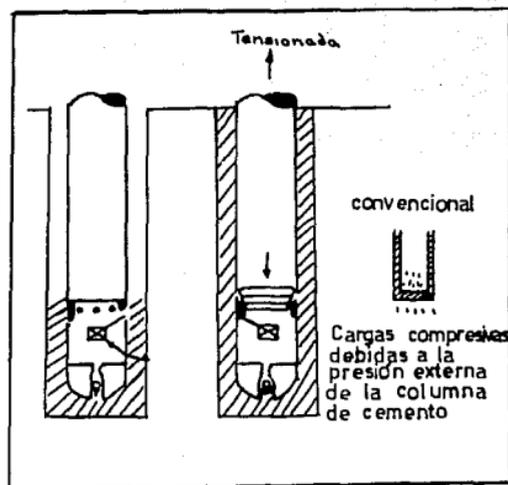


FIGURA 3.3

de 12.56 pg^2), por lo tanto la T.R. N-80 podrá permanecer segura sólomente 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).

3.10 TIPOS DE FALLAS POSIBLES

El medio geotérmico crea consideraciones adicionales que pueden ser poco familiares para los operadores de pozos petroleros convencionales. Conocer lo que puede ocurrir en ciertas situaciones permitirá a los perforadores e ingenieros evitar ciertos problemas, o prepararse para enfrentar aquellos que no son completamente previsibles. Una limitación básica es la incapacidad de obtener cementaciones confiables y consistentes en las T.R. desde el fondo hasta la superficie del pozo debido a problemas como pérdida de circulación, alargamiento del agujero, gelación del lodo, erosión, disolución del cemento por salmueras geotérmicas y fallas en las herramientas de cementación.

Las causas posibles de fallas en la T.R. en pozos geotérmicos incluyen:

- 1.-Carga de formación.
- 2.-Daño mecánico.
- 3.-Corrosión e incrustamiento.
- 4.-Esfuerzos térmicos.
- 5.-Fallas en el metal.
- 6.-Expansión de fluidos atrapados.

DOBLAMIENTO, ESFUERZO TERMICO

La colocación del cemento, las pérdidas de circulación, el agrandamiento del agujero y la disolución del cemento endurecido pueden dejar un intervalo de T.R. sin soporte lateral. El incremento en la temperatura causa la elongación de la tubería y si el intervalo sin cemento es bastante largo, se doblará. La ecuación de Euler para el doblamiento en una columna con los extremos fijos es:

$$S_c = \frac{4 \pi^2 E}{(L / r_g)^2}$$

donde :

S_c = Esfuerzo crítico para la columna (psi).

E = Módulo de elasticidad para el acero 29×10^6 (psi).

L = Longitud de la columna sin soporte (pg).

r_g = Relación de giro (pg).

En esta expresión r_g es función de los diámetros internos y externos.

$$r_g = \frac{(D_o^2 + D_i^2)^{1/2}}{4}$$

Nótese que el esfuerzo crítico: a) Se incrementa con el diámetro de la T.R., b) Disminuye con la longitud y c) Disminuye con el espesor de la pared.

El efecto importante por el diámetro se ilustra en la figura 3.4.

La T.R. puede fallar también a partir de esfuerzos de tensión cuando se cementa completamente, este fenómeno daña a muchos pozos inyectoros de vapor y ha causado fallas en los Liners profundos cuando se inyectan fluidos fríos en pozos calientes. La expresión para el esfuerzo térmico que es independiente de la longitud es:

$$St = \beta \Delta T E$$

donde:

St = Esfuerzo térmico (psi).

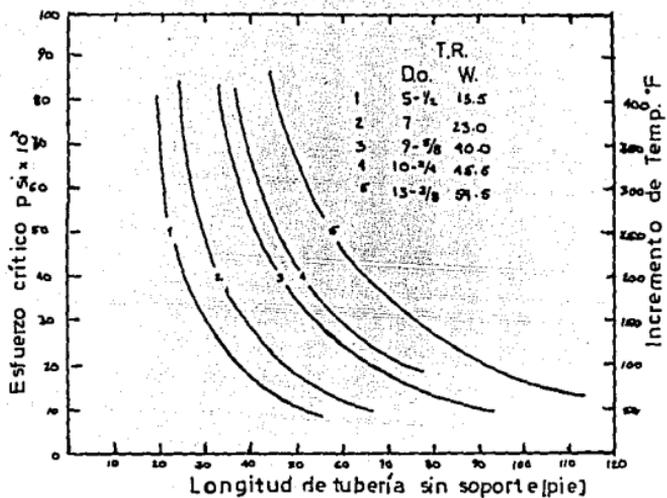
β = Coeficiente de expansión térmico lineal del acero 6.9×10^{-6} (pg/pg/°F).

ΔT = Incremento de temperatura (°F)

E = Módulo de elasticidad para el acero 29×10^6 (psi)

Así para el acero el esfuerzo térmico es $St \approx 200 \Delta T$ (psi), la figura 3.5 ilustra los efectos para las tuberías T.R. H-40 y N-80 note que por ejemplo con una ΔT de 204°C (400°F), 93°C iniciales y 315°C finales, los esfuerzos de compresión exceden el punto de cedencia y deforman el metal.

En enfriamiento, el esfuerzo por tensión del cuerpo o en el cople de la tubería puede ser excedido antes de que se alcance la temperatura original, sin embargo el uso de cuerdas tipo Buttress o Premium puede prevenir estas rupturas, desde que estas cuerdas han sido utilizadas no es común encontrar fallas.



Tendencia de pandeo

FIGURA 3.4

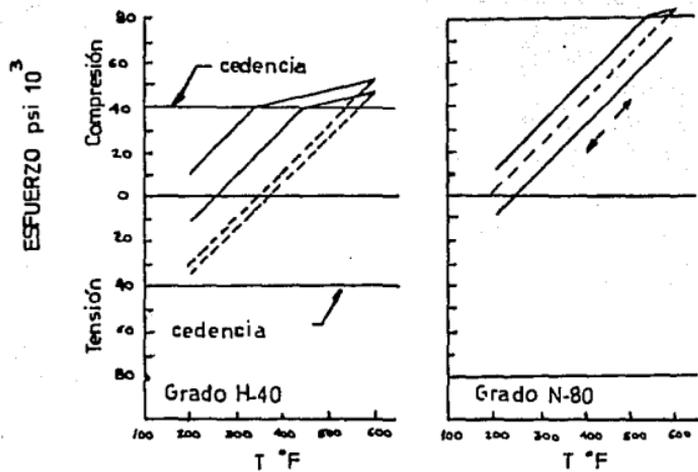


FIGURA 3.5

La expansión radial por el calor puede romper el cemento o crear un microanillo que permita el flujo de agua con la consiguiente corrosión y disolución del cemento. El cemento y el acero tienen propiedades comparables de expansión térmica sin embargo el acero responde rápidamente al contacto con el agua caliente y los pozos deben ser puestos a producir lentamente para permitir un calentamiento lento y uniforme del sistema cemento-tubería.

DAÑOS MECANICOS

Se debe tener extremo cuidado en no trabajar tuberías de acero endurecido, crear puntos localizados de fatiga al marcar la tubería, golpearla en la superficie durante su manejo, crear puntos calientes al soldar etc. Tales daños alteran la metalurgia de la tubería y colocan celdas de corrosión galvánica en presencia de salmuera iniciando el fracturamiento de la misma con esfuerzo bajo tensión, compresión y/o torsión.

CORROSION E INCRUSTAMIENTO

La corrosión en medios geotérmicos en los cuales existen todas las condiciones para reacciones electroquímicas, se reconoce como el principal problema en todos los pozos productores con excepción de aquellos que producen vapor seco. Información sobre corrosión interna severa en el fondo de la sarta causada por altas temperaturas y gases ácidos en la salmuera, fué presentado por Traseder y Wieland en un estudio realizado en pozos del campo Valle Imperial USA donde el yacimiento tiene una temperatura de 320°C (808°F). La corrosión externa en las T.R. se acelera por

fallas en la cementación primaria, algunas de estas condiciones se muestran en la figura 3.6.

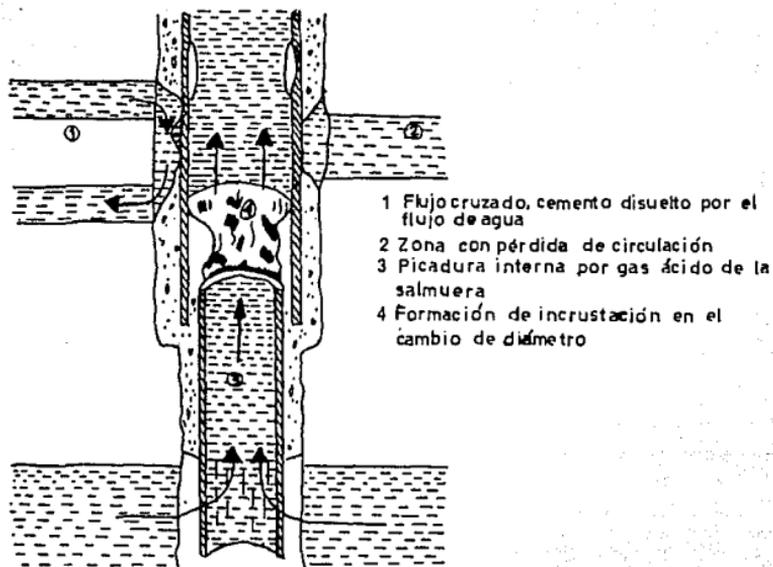
El fenómeno de flujo cruzado puede causar un fuerte flujo de agua entre zonas permeables y actuar como un enfriador, el líquido más denso fluye hacia el fondo. El flujo de agua caliente puede precipitar minerales de sílice y carbonatos desde el cemento durante el fraguado y puede remover cemento que no ha endurecido y dejar intervalos de tubería desprotegida.

La corrosión y el incrustamiento severo ocurre comunmente en el mismo pozo pero en diferente zona. Traseder notó que la corrosión era mitigada hacia arriba del pozo conforme el gas CO_2 era liberado del flujo de agua, entonces aumenta el PH en el sistema.

La incrustación dura del carbonato de calcio también protege al metal del contacto directo con agua corrosiva.

El incrustamiento en si mismo es un problema de operación, la causa básica es el alto contenido de minerales (hasta 300,000 ppm en el área de Nilan del campo Valle Imperial USA) y las condiciones que desestabilizan la salmuera para comenzar la precipitación de sílice y carbonato. La figura 3.6 es una representación esquemática de los mecanismos desestabilizadores comunes. Existen tres técnicas básicas para combatir el medio geotérmico corrosivo:

- 1.-Metalurgia.
- 2.-Métodos químicos.
- 3.-Diseño de mantenimiento rutinario.



Condición de fondo causante de incrustación y corrosión

FIGURA 3.6

PERDIDA DE LA RESISTENCIA DEL METAL

El punto de cedencia del acero utilizado en cálculos "API" para la tensión, estallamiento y colapso disminuye rápidamente arriba de los 315°C (600°F). Holliday usó en 1967 datos del API para seleccionar los aceros en sus diseños para minimizar las fallas en tuberías en pozos inyectoros de vapor, datos similares han sido suministrados por la corporación de acero en USA para aceros P-110 hasta 538°C (1000°F) y K-55 -N-80 hasta 371°C (700°F) ver la tabla 3.4

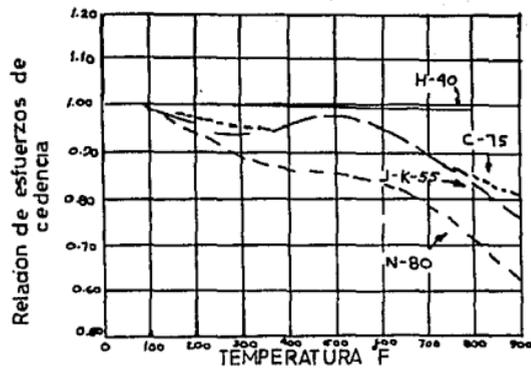
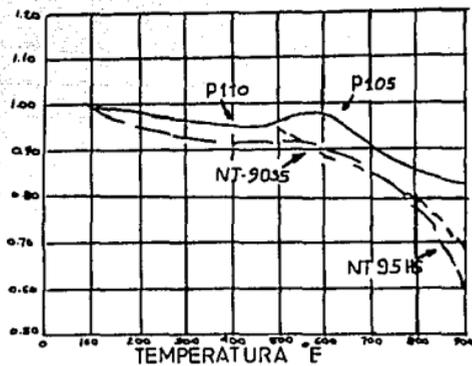
El sulfuro de hidrógeno (H₂S) también ataca aceros endurecidos cuando se presentan tres condiciones:

- a) El agua líquida moja al acero.
- b) Cuando el acero está sometido a esfuerzos de tensión.
- c) PH abajo de 10.

La máxima temperatura en el pozo reduce la resistencia y otras propiedades mecánicas del material de la tubería, la figura 3.7 muestra la reducción en el esfuerzo de ruptura debido al incremento de la temperatura. El módulo de elasticidad también se reduce desde 30×10^6 psi a 25°C (77°F) hasta 27×10^6 psi a 351°C (700°F). El diseño para altas temperaturas debe estar basado en estos valores reducidos, no se pueden aplicar los diagramas de diseño para pozos petroleros con bajas temperaturas, al diseño de pozos geotérmicos con altas temperaturas sin tomar en cuenta el diseño por régimen de temperatura.

TEMPERATURA DE PRUEBA (°F)	MODULO DE ELASTICIDAD (10 ⁶ PSI)	ESTUERO DE CEDENCIA (ksi)	ESFUERO DE TENSION (ksi)	ELONGACION EN 1 PULGADA PORCIENTO
<u>T.R. N-55</u>				
77	38.2	56.3	106.6	23.2
500	28.4	55.8	114.9	12.7
600	27.7	53.9	111.7	20.0
700	27.8	52.0	100.0	21.0
<u>T.R. NORMALIZADA N-00</u>				
77	38.1	84.4	122.4	10.0
500	28.2	77.4	120.1	20.0
600	27.5	76.4	122.4	25.0
700	26.0	71.0	114.6	27.5
<u>T.R. TEMPLADA N-00</u>				
77	38.7	91.6	109.1	26.0
500	28.3	76.4	103.4	22.5
600	27.6	73.5	104.0	31.0
700	26.0	70.2	93.4	30.5

TABLA 3.4 PROPIEDADES DEL ACERO INVESTIGADO



Curvas de diseño de aceros indicados para T.R. a elevadas temperaturas.

FIGURA 3.7

OTRAS TENSIONES

Las desviaciones en el pozo pueden aumentar significativamente la tensión sobre la T.R., pueden ocurrir sobre esfuerzos cuando se conjugan las cargas axiales, con cargas por doblamiento. Las cargas biaxiales se incrementan y la resistencia al colapso en la tubería se reduce notablemente, entonces cuando se pretensiona o enfría el agujero mediante la circulación o la inyección de fluidos deberán considerarse los esfuerzos por agrandamiento en el diámetro tipo "Pata de Perro" (Estos problemas son a menudo mucho más severos que los conocidos).

El colapso es un modo frecuente de falla en la T.R., además de la reducción en la resistencia al colapso debida a los esfuerzos por Pata de Perro, el agua atrapada puede causar colapsos (durante una mala cementación puede quedar agua atrapada entre dos tuberías y se expandirá conforme sea calentada durante la producción). Se diseña la sarta de T.R. con el lado exterior teniendo un rango de estallamiento bajo en comparación con el lado interior.

Cambiar la temperatura de la T.R. lentamente también puede reducir esta condición de colapso porque la expansión de los fluidos puede permearse lentamente dentro del cemento. Así por medio de la práctica y con operaciones cuidadosas una sarta bajo diseñada puede resistir el ambiente y la alta temperatura del medio.

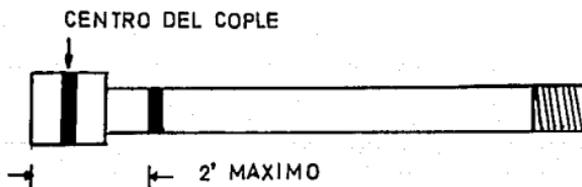
3.11 ADQUISICION DE TUBERIA PARA POZOS GEOTERMICOS

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 utilizadas en los pozos geotérmicos serán 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 (ejemplo: 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 5A, esta es la especificación para la fabricación de la tubería K-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 de tipo geotérmico al armar e introducir la T.R. dentro del pozo. Las marcas deberán cumplir las especificaciones API o aquellas especificadas por el proveedor (figura 3.8) 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

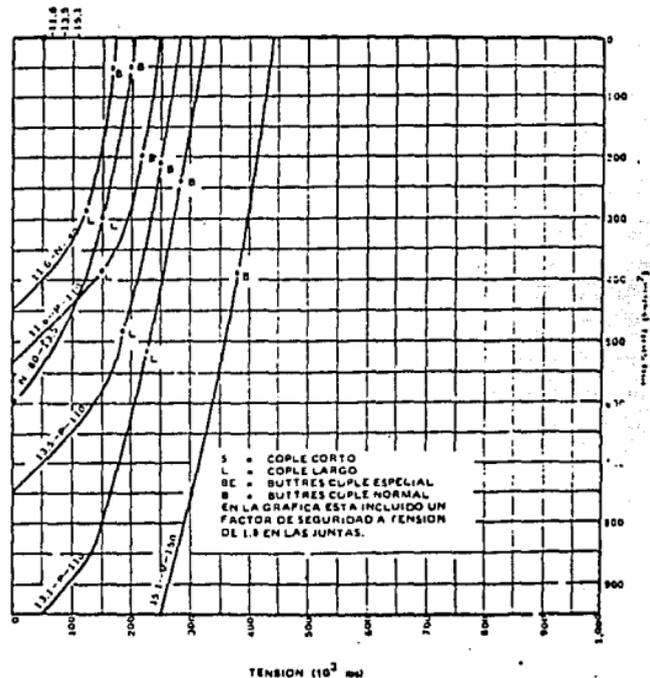
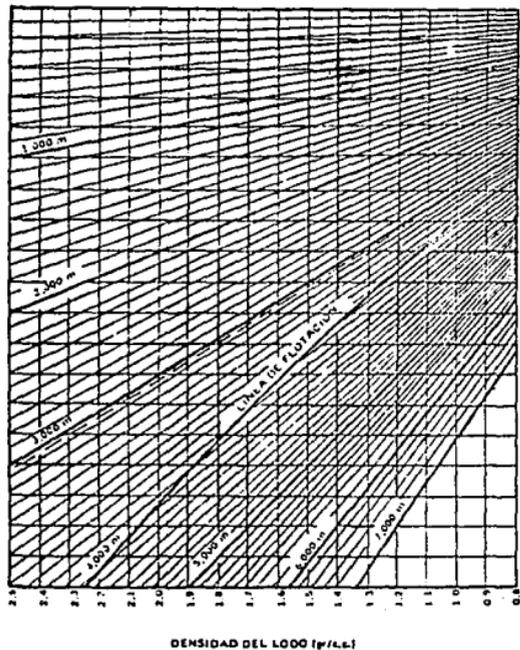
ESPECIFICACION DE COLORES API PARA
T.R. UTILIZADA EN POZOS GEOTERMICOS



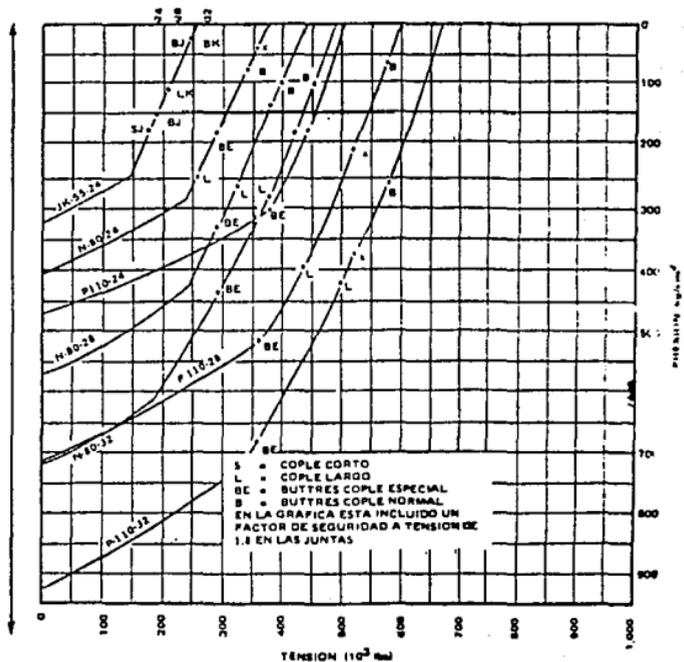
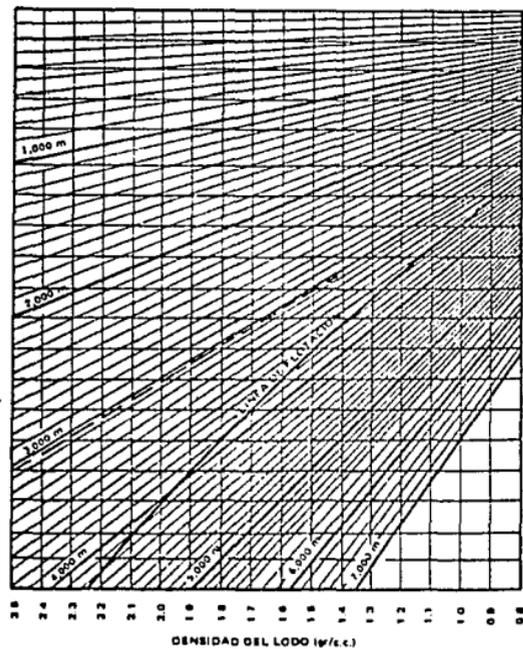
- J-55 UNA BANDA VERDE CLARO
- K-55 DOS BANDAS VERDES CLARO
- N-80 UNA BANDA ROJA
- C-75 UNA BANDA AZUL
- L-80 UNA BANDA ROJA Y OTRA MARRON

FIGURA 38

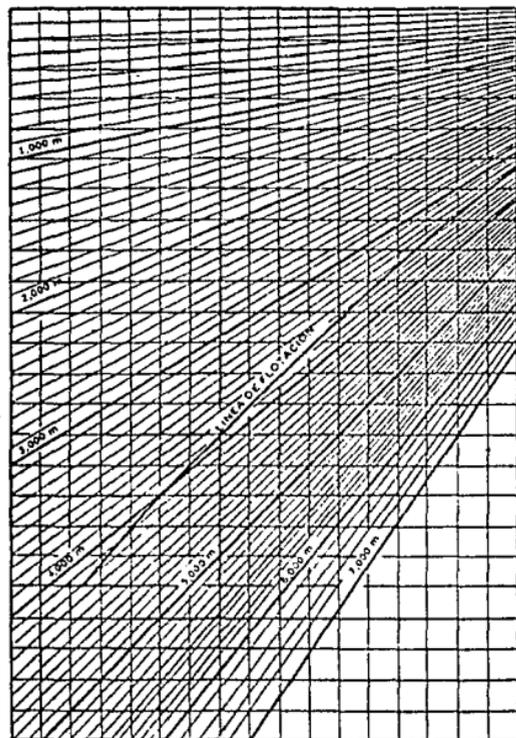
de calidad y se instala apropiadamente. El personal responsable de esto debe estar familiarizado con las normas API Spec 5A, Spec 5AC, las practicas recomendadas RP 5C1 y los boletines BUL 5A2, BUL 5C2, BUL 5C3, BUL 5C4 y BUL 5T1. Además los fabricantes y proveedores son buena fuente de información.



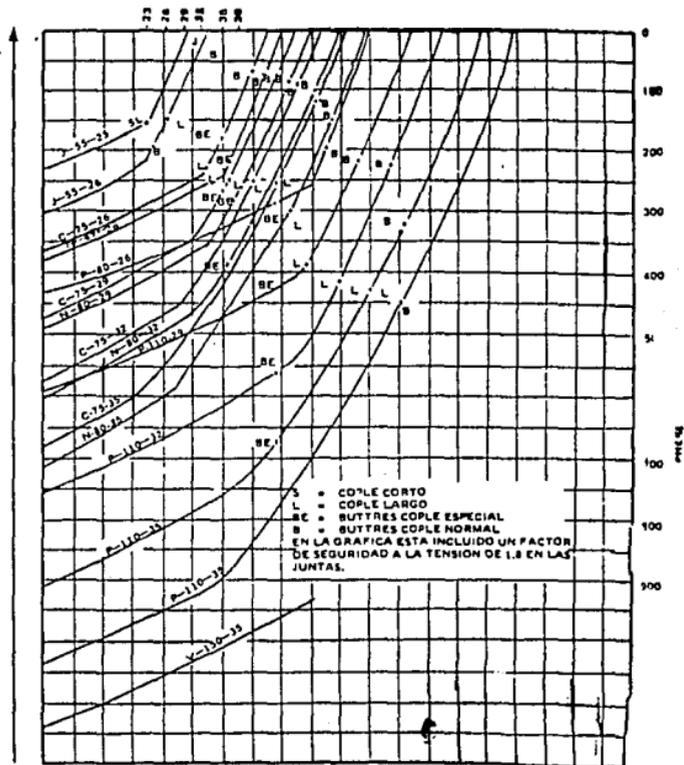
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 41/2"



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 6 5/8"

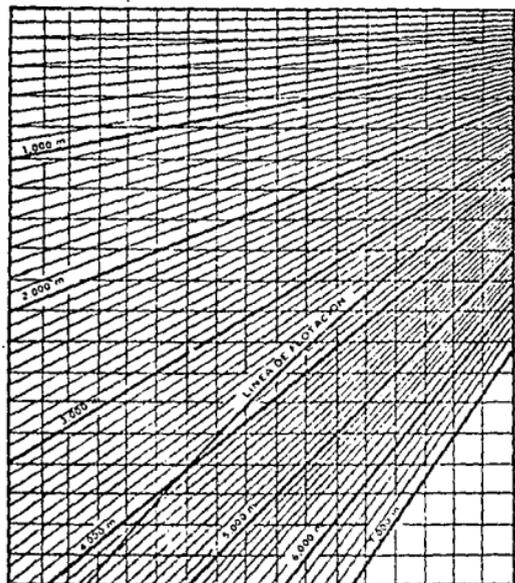


DENSIDAD DEL LODO (ppc.)



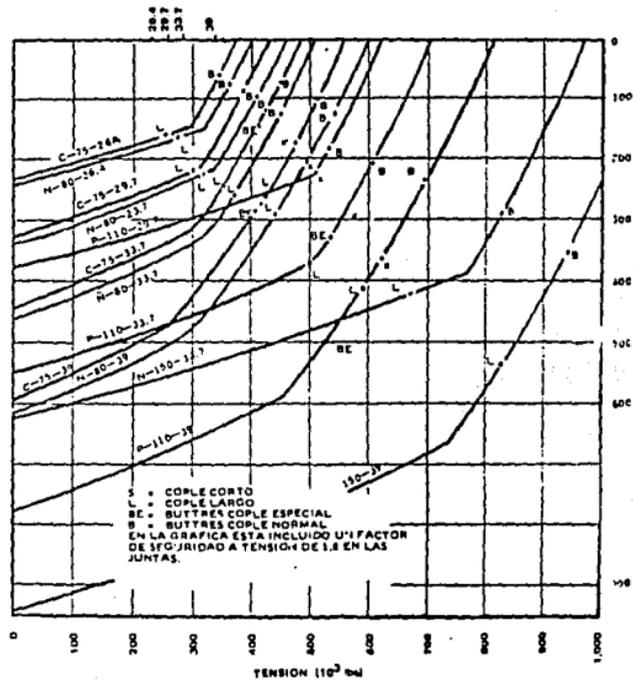
TENSION (10^3 lbs)

DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 7"

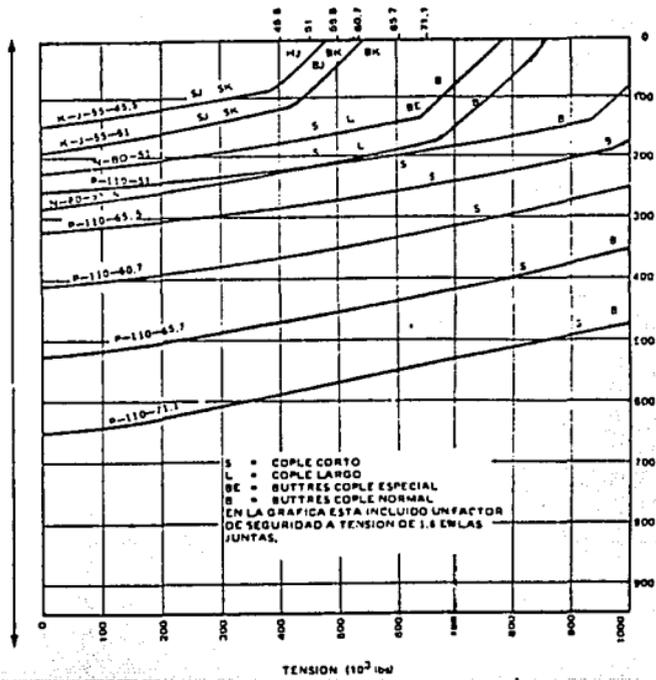
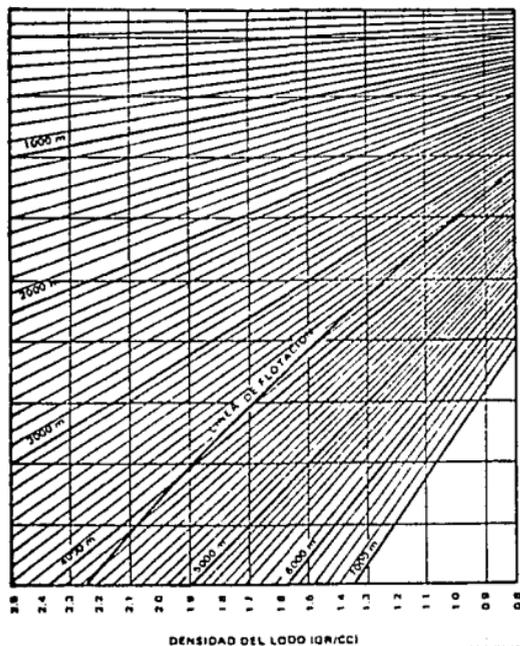


2.6
2.4
2.3
2.2
2.1
2.0
1.9
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.1
1.0
0.9
0.8

DENSIDAD DEL LODO (g/cc.)



DISÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 7 5/8"



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 10 3/4"

BIBLIOGRAFIA

1. Miguel A. Benítez Hernández, Apuntes de Tecnología de la Perforación (primera parte), Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F. 1982.
2. Ignacio Alonso Cardenas, Apuntes de Terminación de Pozos, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F. Abril 1983.
3. Robert W. Nicholson, "Unique aspects of Geothermal Casing Design", Geothermal Resources Council Bulletin, pag. 18-20 April 1984.
4. Robert E. Snyder, "Geothermal Well Completions: A critical review of Downhole Problems and specialized Technology Needs", SPE No. 8221.
5. Robert E. Snyder, "Casing Failure modes in Geothermal Wells", Geothermal Resources Council, Transactions Vol. 3 September 1979.
6. J. Manuel Morales Rosas, Diseño de tuberías para Pozos Geotérmicos, informe 11E 11/2748/I 04/P, Cuernavaca Morelos, Agosto 1990.

7. Robert W. Nicholson, "Casing Design for temperature Regimes in Geothermal Wells", Geothermal Resources Council (Bulletin vol 3 May 1984 pag 23-26).

8. Barroso G.H., Morales J.M., Santoyo S., Arellano J.M.; Norma para Cementación de pozos. Estudio de diseños específicos para el campo Geotérmico La Primavera Jal., fase II, Informe 11E 11/2005/I 03/P Cuernavaca Morelos, Junio 1985.

TEMA IV

DISEÑO DE LA LECHADA

4.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS CEMENTANTES

El cemento usado en pozos geotérmicos debe tener una buena estabilidad a largo plazo (10 a 20 años). El cemento tiene que mantener sus propiedades como resistencia (esfuerzo a la compresión y a la tensión), adherencia y permeabilidad cuando estara sometido a altas temperaturas por largos períodos de tiempo. Esto requiere lechadas con composiciones especiales y técnicas especializadas de colocación.

Algunas composiciones, pueden tener una resistencia a la compresión satisfactoria al tiempo de fraguar pero empiezan a perderla rápidamente cuando estan expuestas continuamente a las temperaturas geotérmicas.

Conforme la resistencia a la compresión sufre el fenómeno de retrogresión, la permeabilidad del cemento se incrementará hasta que la columna de cemento ya no es capaz de evitar la comunicación o flujo de aguas térmicas y aguas de estratos superiores entre diferentes zonas del pozo.

Los cementos que exhiben retrogresión contienen dos productos de hidratación: hidróxido de calcio y silicato dicálcico alfa hidratado. Este fenómeno empieza a temperaturas del 10°C (230°F) y se acelera a temperaturas mayores. Una solución a este problema es usar harina silica a concentraciones entre 30 y 80 partes en peso agregadas a 100 partes de cemento. Cuando la harina silica se agrega al cemento una porción de ella reacciona con el hidróxido de calcio para formar silicato dicálcico

alfahidratado. La sílice remanente reacciona con los alfa-hidratos para formar fases hidratadas más resistentes y estables como la xonolita y la tobermorita, además tienen alta resistencia a la temperatura, propiedad que no tienen los silicatos dicálcicos alfa-hidratados.

Todas las lechadas presentan el fenómeno de retrogresión a temperaturas mayores a los 110°C (230°F).

En el rango entre 110°C (230°F) y 205°C (400°F) después de que el cemento fragua, la resistencia a la compresión del mismo cemento disminuye rápidamente. Solamente el cemento tipo "G" con 40% de harina sílica muestra suficiente resistencia a la compresión y durabilidad con el tiempo.

Hay una gran variedad de aditivos disponibles para modificar los cementos para pozos geotérmicos.

El cemento tipo "G" puede ser usado hasta 77°C (170°F), arriba de esta temperatura y hasta 315°C (600°F). Es necesario agregar entre otros aditivos, como los retardadores cuya concentración depende, precisamente, de la temperatura de fondo.

La propiedad de filtrado en un cemento sin aditivos es superior a 1,000 ml en 30 minutos, en base a la prueba API. La adición de aditivos como retardadores, bentonita, gilsonita, puzolana, etc., no afecta significativamente esta pérdida de fluido o filtrado. Sin embargo, empleando los aditivos, especialmente diseñados para reducir este filtrado, se pueden obtener valores en esta prueba inferiores a 100 ml.

Las características reológicas de un cemento tipo "G" API sin aditivos, son muy similares a las que tiene el cemento con harina sílica, pero pueden ser mejoradas adicionando aditivos como

reductores de fricción y retardadores.

La composición del sistema cemento-harina sílica-agua, es capaz de reducir cualquier flujo de agua en un pozo geotérmico y es ideal para los propósitos de adherencia, sello y aislamiento de zonas.

En los casos de temperaturas mayores a 500°C (932°F) un cemento refractario (cálcico-aluminado) con 40 a 60% de harina sílica es una composición efectiva. Este tipo de lechadas han sido probadas hasta temperaturas de 816°C (1500°F) por grandes períodos, lo cual ilustra su estabilidad térmica. Si es necesario cementar hasta la superficie cuando se utilizan este tipo de lechadas, se puede diseñar un cemento ligero en la parte superior del pozo y el cemento cálcico-aluminato en la parte inferior del mismo.

Otras dos composiciones, una mezcla de cemento cálcico-aluminato y arcilla calcinada en relación 1:1, y una mezcla de puzolana refractaria han sido probadas con éxito a temperaturas superiores a los 500°C. De acuerdo a pruebas de laboratorio, estas composiciones pueden ser utilizadas satisfactoriamente a temperaturas de hasta 1094°C (2000°F).

En estas condiciones de alta temperatura, el cemento no sólo debe ser térmicamente estable, sino que también debe tener propiedades de aislamiento térmico.

Algunas lechadas mezcladas con aditivos aligeradores muestran una conductividad térmica en el rango de 0.4 a 0.6 BTU/Hr/Pie/°F comparado con lechadas normales que tienen su rango de conductividad térmica entre 0.8 y 0.9 BTU/Hr/Pie /°F.

Hay una condición que ayuda a la estabilidad del cemento a elevadas temperaturas y es su expansión.

El cloruro de sodio agregado a las lechadas en concentraciones mayores al 10% en peso basados en el agua de mezcla y hasta la concentración de saturación producirá una lechada que exhibirá una expansión lineal hasta de 0.17% .

Hay otros materiales disponibles que producen expansión, con algunas ventajas sobre la sal pero generalmente son más caros.

Ayudará también para alcanzar el objetivo de buena adherencia en las interfaces cemento-formación y cemento-tubería el uso de un fluido lavador químico adelante de la lechada para remover el lodo y dejar a las formaciones en condiciones favorables. Estos lavadores deben ser buenos diluyentes de lodo y contener un surfactante propiciador de humectabilidad al agua. Puesto que estos lavadores son fluidos base agua normalmente, son fácilmente puestos en turbulencia y esto ayuda a cumplir los objetivos de dilución y remoción del lodo. Debido a la gran variedad actual de los fluidos de perforación, el lavador químico deberá ser seleccionado para un lodo de perforación en particular. Desde luego, la colocación de la misma lechada en flujo turbulento sería una gran ayuda para la remoción del fluido utilizado durante la perforación. Sin embargo, la turbulencia durante las cementaciones geotérmicas por lo general no es recomendable debido a los problemas de pérdidas de circulación.

Actualmente se están llevando a cabo estudios de laboratorio para entender mejor las propiedades físicas de las lechadas. En estos estudios se incluye la evaluación de las siguientes propiedades: conductividad térmica, difusividad térmica, coeficiente de expansión y módulo de elasticidad y esfuerzos existentes en la tubería de revestimiento y el cemento causados

por cambios de temperatura y presión, etc.

Para determinar que aditivo agregar a la composición básica, se debe analizar qué propiedades se necesitan o requiere el pozo. La primera necesidad básica es que la lechada tenga suficiente tiempo de bombeo para colocarla en el espacio anular entre la tubería y el agujero; este tiempo de bombeo dependerá de la profundidad del pozo, la presión diferencial y la temperatura de fondo. Este no debe ser excesivo ya que puede reducir las propiedades de resistencia en cemento. Hay que recordar que la composición de cemento y aditivos se prepara a condiciones atmosféricas y estará sujeta en el fondo del pozo a varios cientos de grados centígrados, entonces es necesario agregar a la lechada retardadores para mantenerla fluida por un tiempo determinado.

Frecuentemente es necesario reducir la densidad de la lechada para disminuir la presión hidrostática y prevenir y reducir problemas como pérdida por circulación. La reducción de la densidad en una lechada va acompañada por la adición de agua a la misma. Para mantener esta fase acuosa extra debidamente integrada a la lechada se emplean aditivos como bentonita, puzolana y perlita. Algunas veces se requiere aumentar la densidad de la lechada para contrarrestar las presiones de formación y prevenir un descontrol del pozo. Entoces para este fin, se reduce el requerimiento de agua de la lechada agregando dispersantes y/o materiales con alto peso específico.

4.2 MATERIALES EMPLEADOS PARA CEMENTAR POZOS GEOTERMICOS

Los materiales utilizados para la cementación de tuberías de

revestimiento en pozos geotérmicos se clasifican en los siguientes grupos : (Ref. 1-2)

- A) Cemento base.
- B) Estabilizadores para alta temperatura.
- C) Aceleradores de fraguado.
- D) Retardadores de fraguado.
- E) Reductor de densidad.
- F) Reductor de fricción.
- G) Densificantes.
- H) Controladores de filtrado.
- I) Controladores de zonas con pérdida de circulación.
- J) Homogenizadores.

AD CEMENTO BASE

Es un material en forma de polvo sin aditivos comúnmente llamado cemento Portland. El API tiene clasificados 9 tipos de cementos para pozos petroleros (A, B, C, D, E, F, G, H y J). La ASTM tiene clasificados 5 tipos para construcción (I, II, III, IV y 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 temperatura hasta 77°C. Para mayores temperaturas, deberán agregarse aditivos retardadores y estabilizadores para temperatura.

Composición : El cemento base es el producto del Clinker que esta compuesto principalmente por Silicato Tricálcico (CsS), Silicato dicálcico (C2S), Aluminato Tricálcico (CsA) y

Ferroaluminato Tetracálcico (C₄FA).

B) ESTABILIZADORES PARA ALTA TEMPERATURA

Compuestos inorgánicos con alto contenido de Sílice cristalina.
Se pueden utilizar : Arena de Sílice y Harina de Sílice.

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

Composición : Sílice 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-S, Diacel a y Yeso.

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

Composición : Compuestos inorgánicos, principalmente : CaCl₂, NaCl y CaSO₄.

D) RETARDADORES DE FRAGUADO

Derevados de Lignina, Sacarosa, Celulosa y sales orgánicas.

Se emplean compuestos como : Supercaltex, 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 : 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, Esferulita, Gilsonita, etc.

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

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

F) REDUCTORES DE FRICCIÓN

Polímeros orgánicos de cadena larga.

Se pueden emplear bajas concentraciones de Supercaltex, Lingex y Spersene porque estos aditivos son retardadores muy energéticos.

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 : Cromolignosulfonatos de calcio modificados, borax y sales orgánicas.

G) DENSIFICANTES

Materiales compatibles con las lechadas, con densidades mayores de 4.0 grs./cm .

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

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

Composición : Sulfatos de Bario, Fierro, etc.

HD 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 : CarboMetilCelulosa, Carboxi-hidroxi-etil-celulosa

I) CONTROLADORES DE ZONAS CON PERDIDA DE CIRCULACION

Materiales fibrosos, granulares o laminillas.

Se pueden usar :

Obturantes : granulares, sello automático, etc.

Bagazo de : caña, tequila, etc.

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

Composición : Celulosa, Celofán.

J) HOMOGENIZADORES

Arcillas hidrófilas.

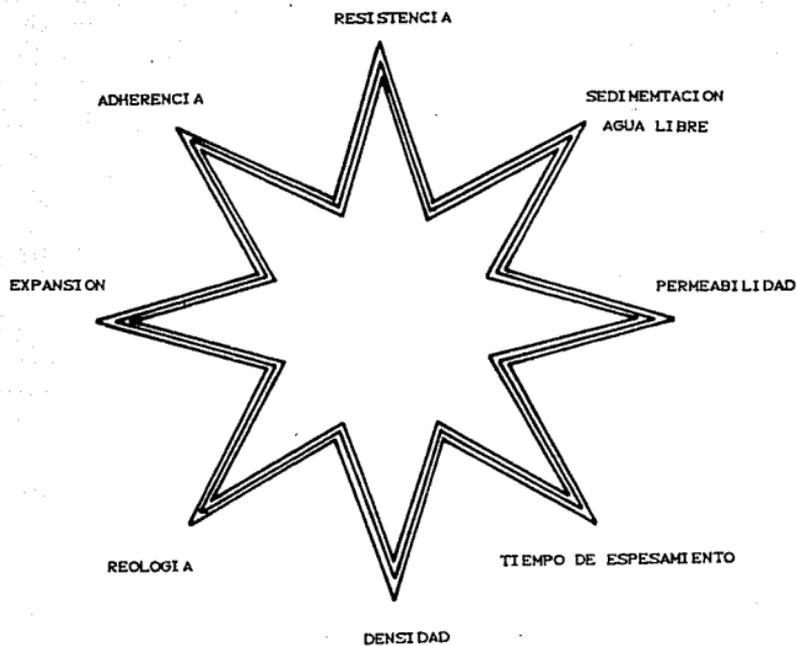
Materiales como : Bentonita.

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

Composición : Montmorillonita de Calcio.

En la figura 4.1 se muestra la correlación cuantitativa de propiedades del cemento.

Fig. 4.1 Correlación cuantitativa de propiedades del cemento.



4.3 PRUBAS DE LABORATORIO

a) PREPARACION DE LA LECHADA

APARATOS

Uno de los aparatos utilizados son las balanzas. La carga indicada en las balanzas será exacta con una tolerancia del 0.1%. El recíproco de la sensibilidad no será mayor del doble de la tolerancia permisible para la exactitud de la balanza. [Ref. 3]. Las probetas graduadas deberán ser lo suficientemente grandes para medir y vaciar, en una sola operación el volumen requerido de agua de mezcla a 20 °C (68 °F); la variación en volumen no excederá de $\pm 0.2\%$. Las graduaciones estarán subdivididas por lo menos cada 5 ml.

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 12,000 rpm (200 rev/s) en alta. Los recipientes utilizados y las espas 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 o agua destilada libre de dióxido de carbono. Para pruebas de rutina, puede utilizarse agua potable. El porcentaje en peso de agua que debe agregarse a cada tipo de cemento debe ser conforme a los valores dados en la tabla 4.3.1.

Tabla 4.3.1 Composición de lechadas de cemento

CEMENTO CLASE API	% DE AGUA EN RELACION AL CEMENTO	AGUA POR SACO	
		90 KG. 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 DE CEMENTO Y AGUA. La cantidad requerida de agua se colocará en el recipiente del mezclador, éste se accionará a la una velocidad de 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.

b) DETERMINACION DE CONSISTENCIA EN 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.

PREPARACION DE LOS APARATOS.

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

PROCEDIMIENTO

Llenado del aparato. La lechada se deberá vertir rápidamente a la celda hasta el nivel de llenado que esta indicado por una ranura alrededor 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 en la tapa de la celda.

Consistencia de la lechada. La escala de cuadrante en la tapa de la celda esta graduada en diez segmentos iguales de torsión y las lecturas tomadas en esta escala deberan transformarse a unidades Bearden de consistencia Bc.

c) DETERMINACION DEL AGUA NORMAL Y AGUA MINIMA DE LECHADA.

Procedimiento para el contenido de agua normal. La lechada de cemento, preparada como se menciona anteriormente se vacia inmediatamente al consistometro atmosférico y se agita a 27°C

(80°F) durante un período de 20 minutos y al final se anota la consistencia. Se llevarán a cabo varias determinaciones variando la relación de agua y se realizarán gráficas para establecer la cantidad de agua con 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.

d) DETERMINACION DE AGUA LIBRE DE LA LECHADA

Procedimiento para el contenido de agua libre. La lechada de cemento preparada como se mencionó anteriormente se vacía inmediatamente en un consistómetro atmosférico y se agita a 27°C (80°F) por un período de 20 minutos posteriormente, la lechada se volverá a mezclar 35 segundos a alta velocidad en una mezcladora Waring Blender. Posteriormente la lechada se utiliza para llenar una probeta de 250 ml, se tapa herméticamente para evitar la evaporización posteriormente, la probeta con la lechada se coloca en una placa de acero de 6.4 mm (1/4 de 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 2 horas se extraerá ya sea pipeteando o decantando y se medirá en una probeta graduada de tamaño adecuado El volumen se expresará en mililitros (ml) y se denominará Contenido de Agua Libre.

e) DETERMINACION DE LA DENSIDAD EN LA LECHADA

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

La copa de muestra se llena inicialmente con la lechada cuya densidad será determinada. La copa debe llenarse hasta un nivel ligeramente debajo del borde superior de la taza aproximadamente 0.64 mm (1/4 pg.).

Colocar la tapa sobre la taza con la válvula checadora fijada a la misma 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 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 esta sometida a presión ahora se determinara 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 esta 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. psi/1000 pie, lb/pie , gr/cm .

f) RESISTENCIA A LA COMPRESION

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 se apisona 25 veces por muestra con una varilla sedimentadora. La lechada se coloca en todos los compartimientos de las muestras antes de comenzar la operación de cementación. Después de sedimentar la capa, la lechada restante 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 de prueba es de acuerdo a la norma ASTM C109 : "Resistencia compresiva de morteros hidráulicos de cemento".

g) PROPIEDADES REOLOGICAS

La lechada de cemento preparada 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 retraso 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 800 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 800 rpm se toma 20 segundos después de la rotación continua. Anotar las lecturas del dial para las velocidades de 800, 300, 200, 100 ϕ y 3 rpm (10, 5, 3.3, 1.7, 0.10 y 0.05 rev/seg) en ese orden. Cada velocidad de rotor se cambiara 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 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 estática de fondo. Pruebas de reología y sedimentación a 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 segregación. Cuando la celda esta llena completamente, se atornilla el fondo, debiendo asegurarse de que todo el aire queda excluido.

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

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

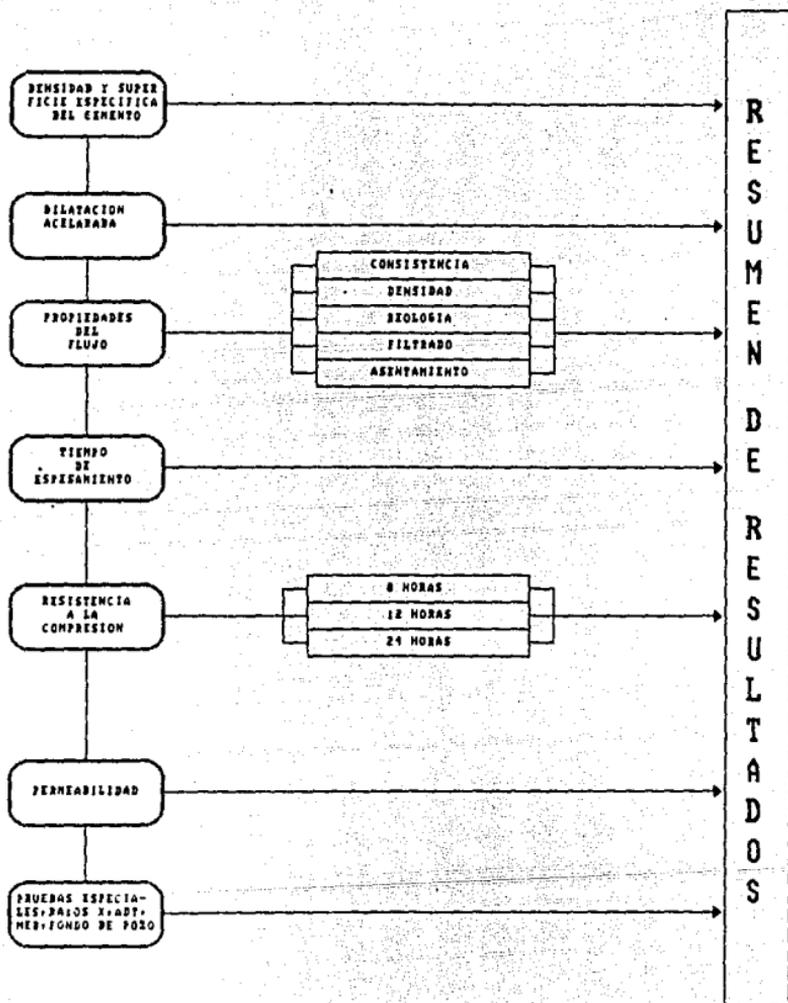
PRUEBA DE PERMEABILIDAD

La prueba de permeabilidad se realiza con los siguientes pasos:

- a) Se aplica una presión diferencial de 1.4 a 14 kg/cm² (20 a 200 lb/pg) para inyectar agua a través de la muestra.
- b) El agua es circulada por la muestra por un tiempo máximo de 15 minutos o hasta cerca de 15 ml.
- c) 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 :

FIG. 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA CEMENTOS Y ADITIVOS UTILIZADOS EN LA TERMINACION DE POZOS GEOTERMICOS



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

donde :

k = Permeabilidad en D.

Q = Qasto en cm /seg.

μ = Viscosidad del agua en cp.

L = Longitud de la muestra en cm.

A = Area transversal de la muestra en cm .

Δp = Caída de presión en atm.

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

4.4 EVALUACION DE LA LECHADA

Se presenta a continuación el programa experimental desarrollado por el IIE para evaluar los materiales y los sistemas cementantes antes de ser empleados en los pozos y para realizar un control de calidad en las operaciones de cementación en pozos geotérmicos. (Ref. 4)

A) EVALUACION COMO CEMENTO API TIPO G.

La evaluación del tipo "G" de cemento se realiza conforme a la norma API spec 10 (Ref. 5- 6), utilizando el cemento sin aditivos en las siguientes pruebas :

PRUEBAS AL CEMENTO EN SECO:

Superficie específica (Blaine) [Ref.7].

Densidad (Le Chatelier) [Ref.8].

Análisis químico de óxidos presentes mediante Fluorescencia de

rayos [Ref.9].

PRUEBAS A LA LECHADA DE CEMENTO :

Empleando agua destilada con relación agua/sólidos $R a/s = 0.44$.

TIEMPO DE ESPESAMIENTO:

Temperatura 52 °C y Presión 398 kg/cm (Cédula 5 API).

RESISTENCIA A LA COMPRESION :

Después de curarlo 8 horas a presión atmosférica y a las temperaturas de 38 °C y 60 °C (Cédula 1C y 3C API).

PROPIEDADES DE FLUJO:

Consistencia, Reología, Densidad y Sedimentación a temperatura ambiente y presión atmosférica.

B) EVALUACION DE ADITIVOS.

Conforme a las especificaciones existentes para cada material en las normas API [Ref. 12-18], ASTM [Ref. 19-33], IMP [Ref. 34], e IIE [Ref. 10-11]; además las lechadas preparadas con los aditivos deben cumplir los requerimientos de aplicación que se presentan en la tabla 4.4.1.

C) DISEÑO DEL SISTEMA CEMENTANTE.

Obtención de la composición cementante básica (cemento y aditivos óptimos) para la cementación de T.R.'s en campo conforme a los siguientes datos: Profundidades planeadas para las T.R.'s, temperaturas esperadas, temperaturas de entrada y salida en el

lodo, densidad y datos de los problemas encontrados durante la perforación.

1. Selección de Composición Básica :

Conforme a los datos anteriores y los productos disponibles en la región (fig. 4.2).

2. Determinación de la relación agua sólidos (R a/s) para obtener la densidad propuesta en la lechada mediante las pruebas de : Consistencia, reología, densidad y sedimentación.

3. Determinación de la cantidad de retardador o acelerador necesaria para tener el tiempo de bombeo suficiente para realizar la operación de cementación con un margen de seguridad.

PRUEBAS DE TIEMPO DE ESPESAMIENTO :

a) Temperatura de 52°C y presión de 355 kg/cm .

Lechada A : Cemento, harina de sílice y agua destilada.

b) Temperatura de 120°C y presión de 200 kg/cm .

Lechada B : Cemento, harina de sílice, retardador y agua destilada.

4. Determinación de las propiedades mecánicas : Esfuerzo a la compresión, permeabilidad y adherencia en muestras de lechadas A y B fraguadas y añejadas durante 1, 3 y 8 días con las siguientes condiciones :

a) Temperatura de 80 °C y presión atmosférica.

b) Temperatura de 250 °C y presión de 200 kg/cm .

5. Determinación de las cantidades de homogenizador, reductor de fricción mediante la determinación de las propiedades de flujo : Pruebas de consistencia, reología, densidad y sedimentación a temperatura ambiente y presión atmosférica de las lechadas A y B.

6. Determinación de los productos de hidratación presentes en las muestras obtenidas en el punto 4 mediante técnicas termoanalíticas, análisis por difracción y fluorescencia de rayos X.

a) Fluorescencia : Análisis elemental reportando óxidos del cemento, harina de sílice, bentonita y aditivos empleados.

b) Difracción : Determinación de las fases cristalinas presentes en el cemento y en las muestras obtenidas en el punto 4.

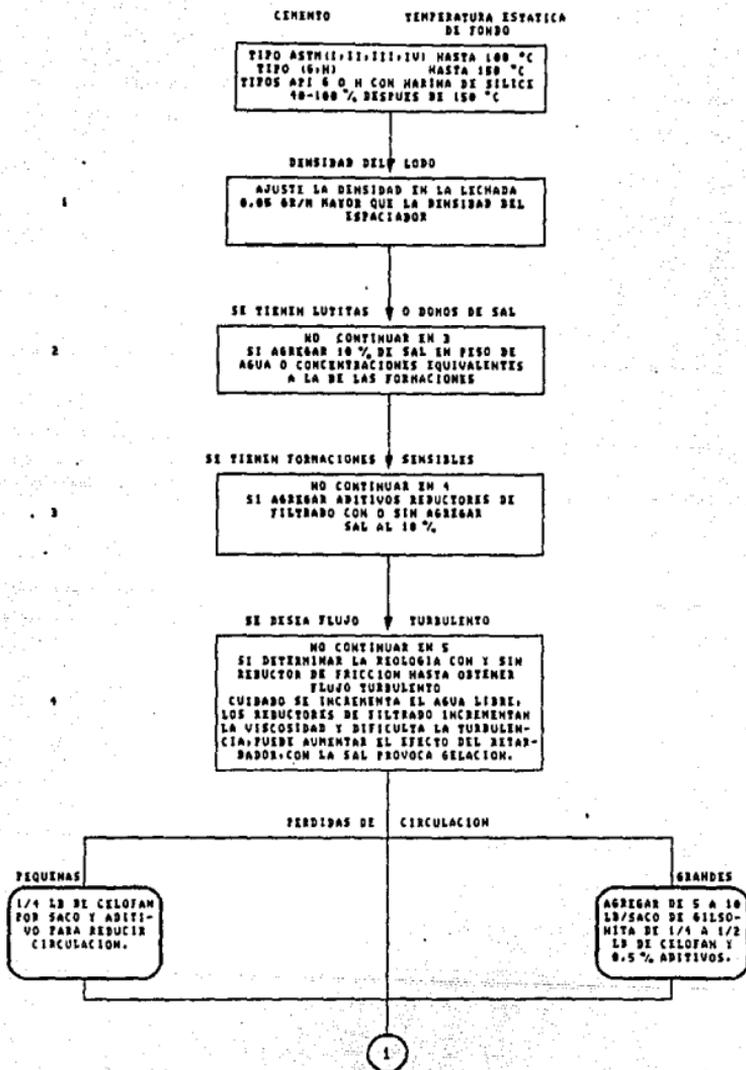
D) DOSIFICACION DE RETARDADOR.

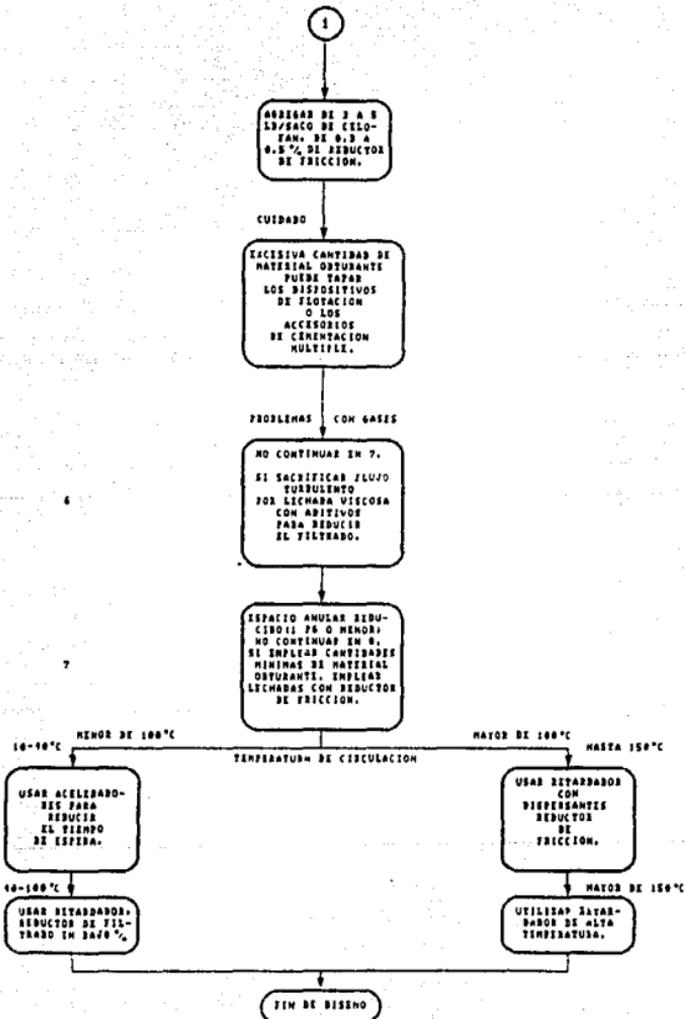
Se determina la cantidad de retardador a utilizar en una cementación de T.R. conforme a los datos de campo : Profundidad, registros de temperatura en el pozo, temperaturas de entrada y salida en el lodo, densidad del lodo y datos sobre los problemas encontrados durante la perforación, etc.

Tabla 4.4.1 REQUERIMIENTOS DE APLICACION PARA
CEMENTOS GEOTERMICOS

PROPIEDAD	MINIMO	MAXIMO	UNIDADES
			Lectura a
Reología	-	300	800 rpm
Consistencia	-	25	Bc
Asentamiento	-	1	%
Densidad	1.3	2.0	gr/cm
Tiempo de espesamiento			
TR.13 3/8" a TC 120 °C	1:00	4:00	Hrs:min.
TR.9 5/8" a TC 150°C	1:00	4:00	Hrs:min.
Resistencia a la compresión			
24 Hrs. a 200 °C	70	-	kg/cm
3 Días a 200 °C	100	-	kg/cm
Expansión lineal	-	1	%
Permeabilidad al agua	-	0.1	milidarcy

FIG. 4.3 SELECCION DE COMPOSICION BASICA





BIBLIOGRAFIA

1. M. Morales, A. Baca, "Cementos para pozos geotérmicos, curso sobre lodos y cementos utilizados en la construcción de pozos geotérmicos" OLADE/IIIE/CFE/UNAM memorias, Cuernavaca, Mor. Pag. 3.1-3.10, (18-19 Nov. 1985).
2. D. K. Smith, "Cementing" SPE Monogram 4, pag. 8-31, (1974).
3. Spec API. "Materiales y pruebas para cementación de pozos".
4. "Simposio Internacional sobre Desarrollo y Explotación de Recursos Geotérmicos" Cuernavaca, Mor. 5-9 de octubre de 1987. Memorias pag. 355-365.
5. Spec API10A. "Especificaciones para el cemento y los aditivos utilizados en pozos de petróleo y gas".
6. RP 10 B. "Prácticas y métodos de prueba recomendados para evaluar cemento y aditivos utilizados en pozos de petróleo gas".
7. Norma ASTM C 204-53. "Determinación de la finura del cemento Portland por el Aparato de Permeabilidad del aire".
8. Norma ASTM C189-44. "Peso específico del Cemento Hidráulico"

9. A. Bottai, F. Fabbri, B. Tarquini, R. Ricciardulli (ENEL), Domínguez, J. Gallegos, (CFED), G. H. Barroso, J. M. Morales, A. Baca, S. Santoyo, (IIE), "Estudio de Fluidos de perforación y cementos parapozos geotérmicos", Marco de cooperación técnica México-Italia, Dipartimento per la Cooperazione allo Sviluppo del Ministero Affari Esteri D'Italia, Informe final (1986).
10. G. H. Barroso, J. M. Arellano, M. Morales, A. Baca, S. Santoyo, "Estudio del diseño de lechadas específicas para el campo de la Primavera, Jalisco. Fase II", elaboración de normas, Informe IIE/11/2005/1 04/P, (1986).
11. G. H. Barroso, J. M. Arellano, A. Baca A. J. M. Morales, S. Santoyo. "Estudio del diseño de lechadas específicas para el campo geotérmico de la Primavera, Jalisco. Fase II. elaboración de normas", IIE/11/2005/1 05/final (1986).
12. Bul. API 10 C. "Boletín sobre Nomenclatura de cementos para pozos petroleros".
13. Spec. API 10 D. "Especificaciones para centradores de tuberías de revestimiento".
14. RP API 10E. "Prácticas recomendadas para aplicaciones de cubierta de cemento para buen acero tubular, manejo, instalación y uniones".

15. Bul. API D4. "Efectos de los aditivos para lodos de perforación en los cementos para pozos petroleros".
16. Spec. API 13 A. "Especificaciones para materiales de fluidos de perforación para pozos petroleros".
17. RP API 13 B. "Práctica recomendada para procedimiento estándar para prueba de fluidos de perforación".
18. Bul. API 13 D. "La reología de los lodos de perforación de pozos petroleros". (La descripción será la misma que la del boletín S-2).
19. Norma ASTM C 115-58. "Finura del Cemento Portland por Turbidímetro".
20. Norma ASTM C 186-68. "Calor de Hidratación del Cemento Portland".
21. C 187-64. "Consistencia Normal del Cemento Hidráulico".
22. Norma ASTM C 191-58. "Tiempo de Fraguado de Cemento Hidráulico por medio de la Aguja de Vicat".
23. Norma ASTM C 227-63 T. "Reactividad Potencial Alcalina de Combinaciones Cemento Agregados".

24. Norma ASTM C 305-65. "Mezclado Mecánico de Pastas de Cemento Hidráulico y Morteros de Consistencia Plástica".
25. Norma ASTM C 311-64 T. "Muestreo y ensayo de Ceniza de alto horno para usarse como aditivo en Concreto de Cemento Portland".
26. Norma ASTM C 340-63 T. "Cemento Portland Puzolánico".
27. Norma ASTM C 219-66. "Términos Relativos a Cemento Hidráulico".
28. Norma ASTM C 183. "Muestreo".
29. Norma ASTM C 184 y C 430. "Análisis Granulométrico con malla No. 100, 200 y 325".
30. Norma ASTM C 151 y C 490. "Expansión en Autoclave".
31. Norma ASTM C 266. "Tiempo de fraguado. Determinación del tiempo de espesamiento por el método de Gillmore".
32. Norma ASTM C 190. "Resistencia a la tensión".
33. Norma ASTM C 109. "Resistencia a la compresión".

34. Instituto Mexicano del Petróleo, "Manual para evaluación de materiales empleados en la Perforación de Pozos Petroleros". Publicaciones IMP-DPF 1 A DPF 9/F2, (1973).

TEMA V

HIDRAULICA DURANTE LA CEMENTACION

5.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Los fluidos no newtonianos presentan varios tipos de flujos:

1) FLUJO ESTABLE O PERMANENTE.- Se considera cuando las condiciones de flujo no varían con el tiempo y pueden presentarse como:

a) FLUJO LAMINAR.- En este tipo de flujo, el fluido se divide en capas laminares, las cuales se desplazan paralelas a la dirección de flujo y cada una moviéndose a una velocidad específica. Como se puede observar en la fig. 5.1 la velocidad es mayor en la parte central del conducto y va disminuyendo gradualmente a medida que el fluido se aproxima a la pared del conducto hasta alcanzar el valor de cero en la pared del mismo debido a la falta de resbalamiento.

b) FLUJO TURBULENTO.- Este se caracteriza porque se forman pequeñas corrientes en todo el volumen de fluido (fig. 5.2).

c) FLUJO TAPON.- Este tipo de flujo no es muy común y se caracteriza porque el fluido se mueve a lo largo del eje del tubo a una velocidad constante (como si fuera tapón), independientemente de la distancia que haya al eje del tubo (fig. 5.3). Algunas lechadas presentan dicho comportamiento.

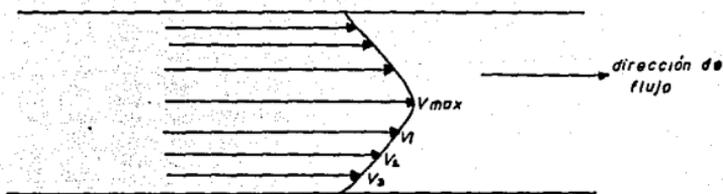


Fig. 5.1 Flujo laminar

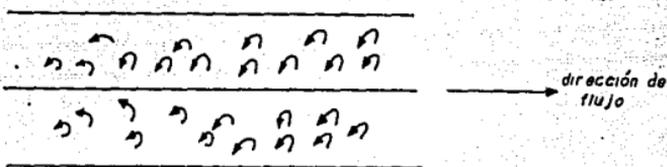


Fig. 5.2 Flujo turbulento

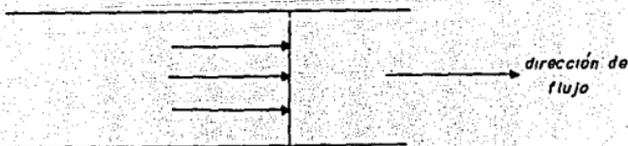


Fig. 5.3 Flujo tapón

2) FLUJO TRANSITORIO.- Este tipo de flujo ocurre justamente después de que las condiciones de flujo han sido modificadas y continúa mientras no se establezcan las nuevas condiciones permanentes de flujo. Se puede citar algunas circunstancias por las cuales ocurre:

- a) Iniciación de flujo.
- b) Cambio de la velocidad de flujo.
- c) Ensanchamiento o estrechamiento de la sección transversal del ducto, etc.

3) CAMBIO DE TIPO DE FLUJO.- Este depende de la velocidad promedio. Las siguientes situaciones pueden ocurrir, dependiendo de la velocidad de flujo promedio "V" con la que fluye un determinado fluido a través de un conducto cilíndrico recto de dimensiones dadas:

- a) En ausencia de flujo tapón (Fig. 5.4 Fluidos Newtonianos)
- b) En presencia del flujo tapón (Fig. 5.5 Fluidos no Newtonianos).

Aquí V_1 es la velocidad crítica para la cual termina el flujo laminar y V_2 es la velocidad crítica para un incipiente flujo turbulento.

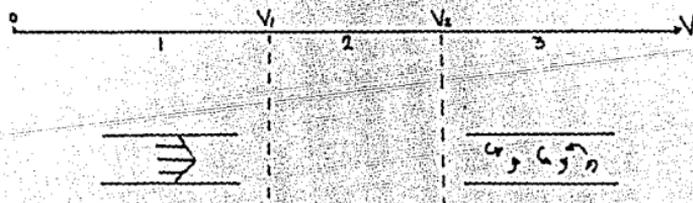


Fig. 5.4 Cambios en el tipo de flujo para fluidos Newtonianos

- 1) Flujo Laminar (estable)
- 2) Zona de flujo laminar-turbulento (transitorio)
- 3) Flujo Turbulento (promedialmente estable)

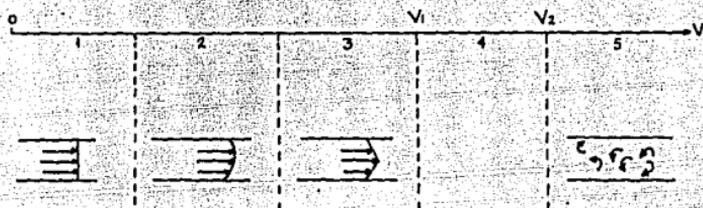


Fig. 5.5 Cambios en el tipo de flujo para fluidos no Newtonianos

- 1) Flujo tapón estable
- 2) Disminución del espesamiento de la muestra con el incremento de V (estable)
- 3) Flujo Laminar (estable)
- 4) Flujo laminar-turbulento (zona de transición)
- 5) Flujo Turbulento (Promedialmente estable)

5.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS REOLOGICOS

Los siguientes instrumentos se utilizan en el campo:

- a) Viscosímetro embudo Marsh. (Fig. 5.6)
- b) Viscosímetro Fann. (Fig. 5.7)

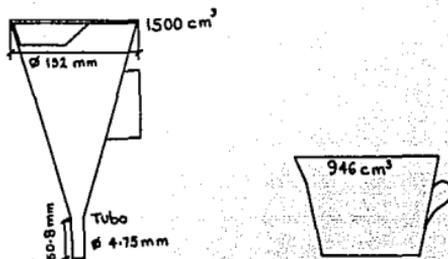


Fig. 5.6 Viscosímetro embudo Marsh.

PRINCIPIO

Este es un instrumento tipo estático. La variable medida es el tiempo, en segundos, para que una cantidad dada de lechada pase a través del tubo del instrumento: el tiempo de escurrimiento es simplemente una estandarización del embudo.

PROCEDIMIENTO

Tome el embudo en sus manos y tape el extremo del orificio con su dedo. Vacíe la lechada a través del cedazo, a este nivel corresponde un volumen de 1500 cm^3 .

Sosteniendo el embudo por su aza, tome el tiempo con un cronómetro y permita que la lechada caiga dentro de una copa graduada, hasta alcanzar el nivel de 946 cm^3 ($1/4$ de galón) en la copa graduada. El número de segundos marcados en el cronómetro corresponderá a la viscosidad Marsh de la lechada.

Por otro lado debe tomarse en cuenta, que el método no es tan rígido, ya que 1000 cm^3 de lechada pueden colectarse, o de otro

modo el embudo se llena con 500 cm³ se determina el tiempo requerido para vaciar el embudo. Sin embargo el procedimiento incluye reportar el volumen de lechada vertido dentro del embudo, como el volumen colectado en la copa.

CALIBRACION

El instrumento se calibra con agua pura. Los tiempos encontrados de esta manera se muestran en la tabla 5.1

Volumen de agua		Tiempos de escurrimiento (segundos para 20 °C)	
cm en el embudo	cm colectados		
1500	945	25	± 1
1500	1000	28	± 1
1500	500	14	

FUENTES DE ERROR

Los errores más comunes se deben a:

- a) Errores cometidos en la calibración del instrumento
- b) Extremo del instrumento bloqueado
- c) Se deja pasar demasiado tiempo desde el momento en que el embudo fue llenado y el momento de iniciar el escurrimiento.
- d) Errores de apreciación al leer el tiempo de escurrimiento.

El viscosímetro Fann (Fig. 5.7)

PRINCIPIO

Este instrumento es del tipo cilindro-coaxial rotatorio y

existen diferentes tipos según la velocidad de corte:

1) De dos velocidades de rotación (600 y 300 rpm). Existen en dos clases:

- a) Rotor operado manualmente (de manivela)
- b) Rotor operado mediante un motor eléctrico.

2) De seis velocidades de rotación (600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm) operados mediante motor eléctrico.

Tanto las dimensiones del cilindro del rotor, como las del bulbo vienen especificadas en la norma API RP 13B.

El esfuerzo de corte (escala de la lectura) se determina como una función de la velocidad de corte (a partir de la velocidad de rotación)

3) De velocidad variable.- Equipos en los cuales se registra continuamente el esfuerzo cortante contra la velocidad de corte aplicada.

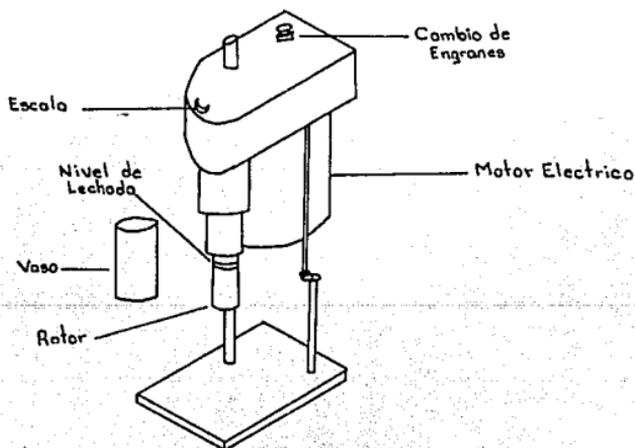


Fig. 5.7 Viscosímetro Fann

5.3 ECUACIONES A UTILIZAR CON VISCOSIMETROS CILINDRO-COAXIAL ROTACIONAL

Se introducen los siguientes símbolos:

r_i = radio interior del cilindro (mm)

r_e = radio exterior del cilindro (mm)

h = altura de inmersión del cilindro (mm)

C = torsión que actúa en el cilindro interior (Newton)

Ω = velocidad angular del rotor (rpm), definida por:

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$$

Donde N es la velocidad de rotación en (rpm)

El esfuerzo de corte que actúa en la pared del cilindro interior queda definido por la ecuación:

$$T_i = \frac{C}{2\pi r_i (h + E)}$$

Donde E es el término de corrección (tiene dimensión de longitud), introducido para tomar en cuenta los efectos finales.

La velocidad de corte que actúa en la pared del cilindro interior es:

$$\gamma_s = \frac{2\Omega}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} = \frac{4\pi N}{60 \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2\right)}$$

$$\text{si } \frac{r_i}{r_e} > 0.9$$

Aplicaciones para el viscosímetro Fann

El instrumento tiene las siguientes dimensiones:

$$r_e = 18.42 \text{ mm}$$

$$r_i = 17.25 \text{ mm}$$

$$h = 38.00 \text{ mm}$$

La torsión, proporcional a la deflexión de la escala, está definida por:

$$C = K \theta$$

Donde θ es la lectura de la escala y K la constante del resorte. para la mayoría de los resortes $K = 3.87 \times 10 \text{ N m /unidad de escala}$

Donde:

N = Newton

m = metro

Con la información anterior, ya es posible definir ecuaciones generales:

a) Esfuerzo cortante T_1 (pascales)

$$T_1 = \frac{K \theta}{2\pi r_i (h + E)} = 0.51 \theta \quad (5)$$

b) Velocidad de corte γ_1

$$\gamma_1 = \frac{4\pi N}{80(1 - (\frac{r_i}{r_e}))} = 1.7 N \quad (6)$$

La tabla siguiente muestra la relación entre N y γ_1

N (rpm)	600	300	200	100	6	3
γ_1 (s^{-1})	1020	510	340	170	15	5

PROCEDIMIENTO

La lechada se pasa a través de la malla del embudo Marsh, después de haberse agitado previamente durante 5 minutos y entonces vertido dentro del recipiente del viscosímetro.

Se sabe el recipiente del viscosímetro hasta que el cilindro coaxial queda sumergido en el fluido (para tal efecto el instrumento cuenta con un patín y una cremallera) hasta que la marca de referencia del rotor coincida con la superficie de la lechada.

El rotor se pone a funcionar a 600 rpm (colocado apropiadamente el selector de velocidad y el interruptor) y se lee la deflexión de la escala.

Sin parar el rotor se ajusta la velocidad de rotación siguiente en orden ascendente y se lee nuevamente la deflexión de la escala después de girar 20 segundos en cada velocidad.

Determinación de la viscosidad aparente

La viscosidad aparente se debe determinar tanto para la lechada de cemento como para los fluidos de perforación de acuerdo con el procedimiento establecido por el API RP 13B, para una velocidad de corte de 1020 s^{-1} , la cual corresponde a una velocidad de

rotación de 600 rpm. Si μ_m se expresa en pascal-segundo, se obtiene por combinación de las ecuaciones : (5) y (6).

$$\mu_m = \frac{T_1}{\gamma_1} = \frac{0.51 \theta_{600}}{1020} \quad (7)$$

Si se expresa en centipoises (un pascal-segundo es igual a 1000 cp), se tiene :

$$\mu_m = 0.5 \theta_{600} = \frac{\text{Lectura del Fann a 600 rpm}}{2} \quad (8)$$

Determinación de la tixotropía

La tixotropía puede estimarse observando los cambios con el esfuerzo que ocurre en el gel, como una función del tiempo.

Para las lechadas de cemento solamente se determina el esfuerzo gel de 10 seg. (gel inicial, G_0) y el esfuerzo gel de 10 minutos no se determina. Se emplea el siguiente procedimiento:

a) El rotor se pone en movimiento a 600 rpm, durante 30 seg. después de los cuales el motor es parado y la pequeña perilla estriada superior se coloca en su posición intermedia.

b) Se dejan transcurrir 10 seg. y posteriormente la perilla estriada grande, la cual esta colocada encima del instrumento se gira lentamente con la mano, en dirección contraria a las manecillas del reloj, hasta cerca de las 3 rpm.

c) La máxima deflexión de la escala se anota. Esta valor corresponde al esfuerzo gel inicial.

Si el viscosímetro Fann es de más velocidades se utiliza el mismo procedimiento pero la velocidad de 3 rpm se utiliza en

lugar de girar manualmente el rotor.

5.4 ECUACIONES REOLOGICAS

Fluidos Newtonianos.

El esfuerzo de corte de los fluidos Newtonianos es directamente proporcional a la velocidad de corte, si una variable se duplica la otra también se duplica. La ecuación reológica es:

$$T = \mu \dot{\gamma} \quad (9)$$

La representación gráfica en coordenadas cartesianas (Fig. 5.8) es una línea recta que pasa por el origen.

El fluido comienza a moverse tan pronto como se le aplique una fuerza diferente de cero. ejemplos clásicos de estos tipos de fluidos son el agua y la gasolina.

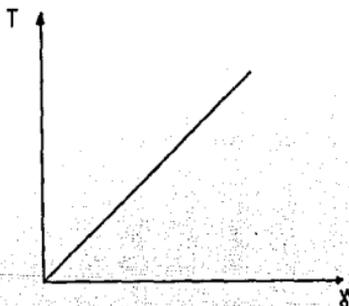


Fig. 5.8

En el caso de los fluidos Newtonianos, la relación $\mu = T/\dot{\gamma}$, la viscosidad es constante a una determinada presión y temperatura.

Fluidos No-Newtonianos

Únicamente se verán dos tipos de fluidos no-Newtonianos, los cuales son generalmente encontrados en las lechadas de cemento:

- a) Fluidos Bingham
- b) Fluidos Ley de Potencia

Fluidos Bingham

En los fluidos plásticos de Bingham, el esfuerzo cortante también varía linealmente con la velocidad de corte, pero a diferencia de los fluidos Newtonianos, una mínima fuerza debe aplicarse para impartirles movimiento. esta fuerza se conoce como el punto de cedencia o valor de cedencia.

Tales fluidos se caracterizan por las siguientes constantes:

a) Punto de cedencia o valor de cedencia (T_0) el cual corresponde a la mínima fuerza requerida para poner en movimiento a los fluidos.

b) La viscosidad plástica (μ_p) la cual es la relación entre el incremento en el esfuerzo de corte y el correspondiente incremento en la velocidad de corte, es decir se trata de la pendiente de la curva que se obtiene al graficar T como una función de $\dot{\gamma}$.

La ecuación teórica de flujo para estos fluidos es :

$$T = T_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (10)$$

La gráfica que se obtiene en coordenadas cartesianas, es una línea recta (Fig. 5.9)

Las curvas experimentales que se obtienen con un viscosímetro cilíndrico-coaxial de rotación no son rectilíneas estrictamente, son más bien como las que se muestran en la fig.

5.10

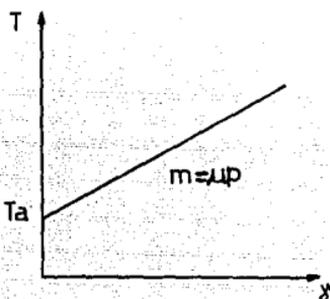


Fig. 5.9 Curva teórica de un fluido de Bingham

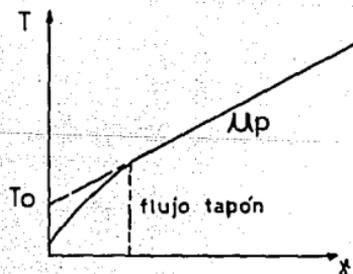


Fig. 5.10 Curva experimental de un fluido Bingham

La determinación tanto de la viscosidad plástica (μ_p) como del punto de cedencia (T_0) se llevan a cabo en el viscosímetro Fann de acuerdo al API RP 13B. Los valores a determinarse son : El esfuerzo de corte T_{1020} a una velocidad de corte $\dot{\gamma}_2 = 1020$ s⁻¹ (a 600 rpm) y el esfuerzo de corte T_{510} a la velocidad de corte $\dot{\gamma}_1 = 510$ s⁻¹ (a 300 rpm). Estos valores están ilustrados en la fig. 5.11.

Determinación de la viscosidad plástica μ_p

En unidades del SI, se tiene que:

$$\mu_p = \frac{T_{1020} - T_{510}}{1020 - 510} \quad (11)$$

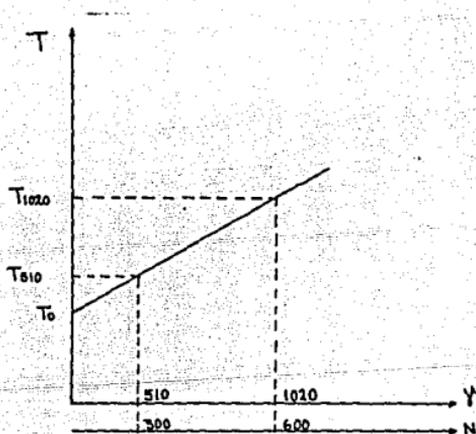


Fig. 5.11 Determinación de los parámetros reológicos de un fluido Bingham

Si μ_p se expresa en centipoises se tiene que:

$$\mu_p = \frac{0.5(\theta_{600} - \theta_{300})}{1020 - 510} 1000 = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (12)$$

es decir :

$$\mu_p \text{ (cp)} = \text{Lect. Fann 600} - \text{Lect. Fann 300 rpm}$$

Determinación del punto de cedencia T_0

De la fig. 5.11 se puede observar que :

$$T_0 = T_{1020} - 2(T_{1020} - T_{510}) \quad (13)$$

Si se desea obtener el T_0 en (lb/100pie) y μ_a y μ_p en (cp) se tiene :

$$\begin{aligned} T_0 &= \theta_{600} - 2(\theta_{600} - \theta_{300}) \\ T_0 &= \theta_{600} - 2\mu_p \\ T_0 &= 2(\mu_a - \mu_p) \end{aligned} \quad (14)$$

Fluidos pseudo-plásticos o ley de potencia.

Al igual que los fluidos Newtonianos, los fluidos pseudo-plásticos fluirán si se les aplica un esfuerzo, por muy pequeño que este sea. Pero en forma diferente ya que el esfuerzo cortante no es proporcional a la velocidad de corte, sino más bien a su potencia n ; de aquí el nombre de ley de potencia. Su ecuación de flujo es :

$$T = K \dot{\gamma} \quad (15)$$

Donde K es el índice de consistencia en Pa so en lb s/100piey n es el índice de comportamiento de flujo, el cual es adimensional y es igual o más pequeño que la unidad.

Si $n = 1$, la ecuación se transforma en aquella que tienen los fluidos Newtonianos y K sería equivalente a la viscosidad.

Las gráficas que se muestran en la Fig. 5.12 son curvas de flujo de un fluido de ley de potencia, en coordenadas cartesianas y logarítmicas respectivamente.

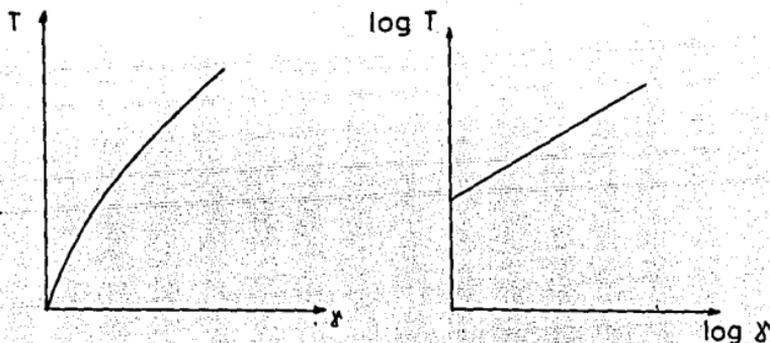


Fig. 5.12 Curva de flujo para un fluido ley de potencia

En coordenadas logarítmicas, la curva de flujo es una línea recta cuya ecuación es :

$$y = \log K + n \cdot x \quad (18)$$

Donde:

$$y = \log T$$

$$x = \log \gamma$$

Así, el índice de comportamiento de flujo n , representa la pendiente de esta línea, mientras que el índice de consistencia K , se obtiene mediante la intersección de la curva con el eje de las ordenadas.

Para $\gamma = 1$

$$n = \frac{\log T - \log T'}{\log \gamma - \log \gamma'} = \frac{\log T/T'}{\log \gamma/\gamma'} \quad (17)$$

La determinación del índice de comportamiento n y el índice de consistencia K es realizada en un viscosímetro Fann de seis velocidades (si no se cuenta con este se usa el de dos velocidades utilizando también G_0 , el cual se considera que representa una determinación a 3 rpm) se grafican en papel log-log, velocidades de corte (en s/en el eje de las abscisas y los esfuerzos de corte (en lb/100pie) en el eje de las ordenadas fig. 5.13 y de esta forma se obtiene la curva de flujo o también llamada reograma.

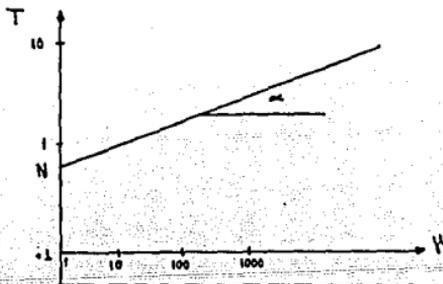


Fig. 5.13 Determinación de los parámetros reológicos de un fluido ley de potencia

Determinación de n

Se ha visto que :

$$n = \frac{\log T/T'}{\log \gamma/\gamma'} \text{ (adimensional)}$$

Si $\gamma = 2$ y se tiene que :

$$n = \frac{\log T/T'}{\log 2} = \frac{\log \theta/\theta'}{\log 2} = 3.32 \log \theta/\theta'$$

Ejemplo:

Si se determinan las mediciones para las siguientes velocidades de corte:

$$\gamma_2 = 1020 \text{ s} \quad (\text{Ca } 800 \text{ rpm})$$

$$\gamma_1 = 510 \text{ s} \quad (\text{Ca } 300 \text{ rpm})$$

se tiene que:

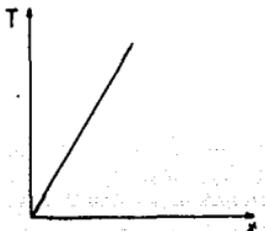
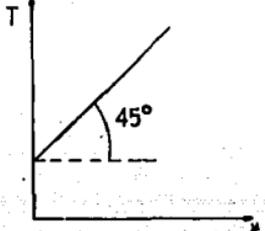
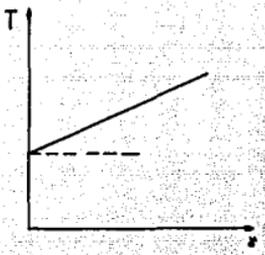
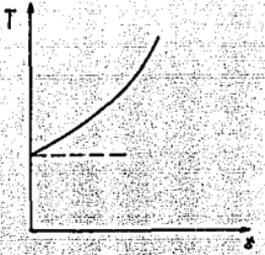
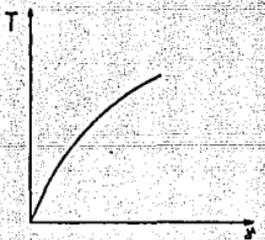
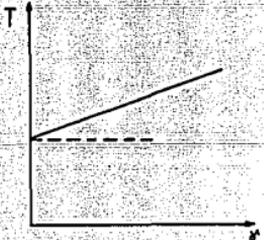
$$n = 3.32 \log \frac{\text{lectura del Fann a } 800 \text{ rpm}}{\text{lectura del Fann a } 300 \text{ rpm}}$$

Determinación de K

$$K = \frac{T}{\gamma} \quad \text{si } \gamma = 1 \quad K = T_1$$

Si T se da en lb/100pie y en esa unidad de K será lb s/100pie. Si T se da en Pa la unidad de K será Pa s (Recordando que una libra fuerza /100pie = 0.478984 Pa.

Breviario de las relaciones velocidad de corte-esfuerzo de corte

FLUJO	ECUACION REOLOGICA	CURVA DE FLUJO EN COORDENADAS CARTESIANAS	CURVA DE FLUJO EN COORDENADAS CARTESIANAS
NEWTONIANO	$T = \mu \dot{\gamma}$		
PLASTICO DE BINGHAM	$T = T_0 + \mu_p \dot{\gamma}$		
LEY DE POTENCIA	$T = K \dot{\gamma}^n$		

5.5 CAIDAS DE PRESION POR FRICCION

Determinación del tipo de flujo

El tipo de flujo de un fluido se caracteriza mediante el Número de Reynolds (Re), el cual a su vez se compara con un valor crítico.

En la tabla 5.2, se pueden ver las expresiones que se utilizan para el cálculo del Número de Reynolds, incluyendo sus valores críticos. Estas expresiones son las que generalmente son aceptadas y como se puede observar, las hay para varios fluidos de varios modelos reológicos que circulan, ya sea a través de tuberías o espacios anulares.

En la tabla 5.2 se puede observar que para un modelo ley de potencia, con $n=1$, sus ecuaciones se transforman a aquellas que tienen los fluidos Newtonianos.

En esta zona de transición, que se presenta cuando el flujo cambia de laminar a turbulento. Esto debido a que en dicha zona el flujo es muy irregular y las presiones en el fluido son altamente inestables.

La velocidad crítica V_c , es la velocidad en el Número de Reynolds crítico si $V \leq V_c$, el flujo es laminar.

TABLA 5.2

Modelo	Interior de tuberías	Espacios anulares
Newton	$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$ $Rc = 2100$	$Re = \frac{0.81D-DdV\rho}{\mu}$ $Rc = 2100$
Bingham	$Re = \frac{VD\rho}{\mu}$ $Rc = 2100$	$Re = \frac{0.81D-DdV\rho}{\mu}$ $Rc = 2100$
Ley de Potencia	$Re = \frac{VD\rho 4^n}{\mu 3^n + 1}$ $Rc = 3470 - 1370n$	$Re = \frac{0.81D-DdV\rho 3^n}{\mu 2^n + 1}$ $Rc = 3470 - 1370n$

Ecuaciones para el Número de Reynolds y Velocidad Crítica en función de los parámetros reológicos

Fluidos Newtonianos:

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad , \quad Vc = \frac{2100 \mu}{D\rho}$$

Fluidos Bingham (en tuberías de perforación):

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu_a}$$

Sustituyendo la expresión para μ_a

$$R_o = \frac{V D \rho}{\frac{T_o D}{8 V} + \mu_p} = \frac{8 V D \rho}{T_o D + 8 V \mu_p}$$

$$V_c = \frac{2100 \mu_a}{D \rho} = \frac{\mu_p + \frac{T_o}{8 V c / D}}{D \rho} 2100$$

Por lo tanto:

$$8 V_c D \rho - 16800 V_c \mu_p - 2100 T_o D = 0$$

De esta ecuación de segundo grado, V_c es la raíz positiva:

$$V_c = \frac{16800 \mu_p + [((16800 \mu_p)^2 + (8 D \rho 2100 T_o D))]}{16 D \rho}$$

$$V_c = \frac{16800 \mu_p + [((16800 \mu_p)^2 + (32 * 2100 T_o D \rho))]}{16 D \rho}$$

En el espacio anular:

De acuerdo con el procedimiento anterior:

$$R_e = \frac{0.8165 (D_e - D_i) V \rho}{\frac{T_o (D_e - D_i)}{12 V} + \mu_p}$$

$$R_e = \frac{9.8 (D_e - D_i) V \rho}{T_o (D_e - D_i) + 12 V \mu_p}$$

$$V_c = \frac{2100 \mu_0}{0.8185 (D_e - D_i) \rho} \quad \text{sustituyendo}$$

$$V_c = \frac{30864 \mu_p + [(30864 \mu_p) + 48 \times 2572 T_0 (D_e - D_i) \rho]}{24 (D_e - D_i) \rho}$$

Fluidos Ley de Potencia I (en tuberías de perforación)

Las ecuaciones para Re y Vc quedan como:

$$Re = \frac{V D \rho}{K \left[\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right]^{3n+1}}$$

$$Re = \frac{V D \rho}{K B \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^{3n+1}}$$

Si $Re = Rec = 3470 - 1370n$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_c = \left[\frac{(3470 - 1370n) K B^{n-1} (3n+1)^{4n}}{D \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}}$$

Para el espacio anular se tiene que:

$$Re = \frac{0.8185 V (D_e - D_i) \rho}{K 12 (2n+1)^{3n}}$$

$$V_c = \left[\frac{(3470 - 1370n)K^{1/2} (2n+1)^{3n}}{0.8165(D_o - D_i)^2 \rho} \right]^{1/(2-n)}$$

Cálculo de caídas de presión :

La ecuación general que determina la caída de presión ΔP entre dos puntos separados por una distancia L es:

$$\Delta P = \frac{2 f L V \rho}{D} \quad \text{para un tubo cilíndrico}$$

$$\Delta P = \frac{2 f L V \rho}{\theta} \quad \text{para el espacio anular}$$

Donde:

ΔP = Caída de presión en (Pa)

θ = Diámetro equivalente en espacio anular (m).

L = Longitud que separa a los dos puntos (m)

ρ = Densidad de la lechada (Kg/m³)

V = Velocidad de la lechada (m/s)

D = Diámetro interior de la sarta (m)

f = Coeficiente de fricción (adim.)

Este último factor varía :

a) con el tipo de fluido

b) con el tipo de flujo

c) con el Número de Reynolds

TABLA 5.3 Ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de presión

	Fluidos Newton y Bingham ($Re < 2100$)	Interior de tuberías	Espectos Anulares
		$f = \frac{16}{Re}$ $\Delta P = \frac{32 L \mu_0 V}{D^2}$	$f = \frac{16}{Re}$ $\Delta P = \frac{48 L \mu_0 V}{(D_e - D_i)^2}$
FLUJO LAMINAR	Fluidos Ley de Potencia ($Re < 3470-1370 n$)	$\Delta P = \frac{32 L \mu_0 V}{D^2} \frac{3n+1}{4n}$	$\Delta P = \frac{48 L \mu_0 V}{(D_e - D_i)^2} \frac{2n+1}{3n}$
FLUJO TURBULENTO	Fluidos Newton y Bingham ($Re \geq 2100$)	$f = \frac{0.05}{Re^{0.2}}$ $\Delta P = \frac{0.1 L f^{0.8} V^{1.8} \mu_0^{0.2}}{D^{1.2}}$	$f = \frac{0.05}{Re^{0.2}}$ $\Delta P = \frac{0.127 L f^{0.8} V^{1.8} \mu_0^{0.2}}{(D_e - D_i)^{1.2}}$
	Fluidos Ley de Potencia ($Re > 3470-1370 n$)	$f = \frac{C}{Re^b}$ $C = \frac{\log n + 2.5}{80}$ $b = \frac{1.4 - \log n}{7}$ $\Delta P = \left(\frac{2c L f^{1-b} V^{1-b}}{D^{1-b}} \right) \left(\mu_0^b \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^b \right)$	$f = \frac{C}{Re^b}$ $C = \frac{\log n + 2.5}{50}$ $b = \frac{1.4 - \log n}{7}$ $\Delta P = \left(\frac{2c L f^{1-b} V^{1-b}}{0.81(D_e - D_i)^{1-b}} \right) \left(\mu_0^b \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^b \right)$

5.6 EQUIPO DE BOMBEO

Las bombas de lodo, pueden utilizarse durante la cementación por lo tanto deben estudiarse con especial cuidado, debiendo determinar el tamaño y la presión de trabajo para una determinada velocidad de lechada. Las bombas de alta potencia, doble acción y/o triple acción son los tipos más comunes empleados actualmente.

Como bombas de alta potencia se entiende aquellas que se mueven por medio de un cigüeñal. Por doble acción se entiende que la lechada es bombeada por ambos lodos del pistón. Cuando el pistón hace una carrera, cierto volumen de fluido es bombeado, este volumen se determina por el diámetro del cilindro y la longitud de carrera, restando el volumen del vástago, para obtener el volumen por golpe o carrera.

Los grandes volúmenes manejados, las altas presiones y principalmente las altas temperaturas implican severas condiciones de operación de estas bombas. Consecuentemente, en la mayoría de los equipos se operan las bombas cerca de su máxima capacidad. Esto significa que, los ingenieros disponen de poca capacidad adicional en casos de problemas en el pozo y deben ayudarse a resolver estos problemas mediante principios hidráulicos y por los conocimientos de las propiedades de flujo.

La potencia suministrada a la bomba para su operación se llama energía recibida en caballos de fuerza y la potencia obtenida de la bomba se le llama potencia hidráulica.

La potencia obtenida siempre es menor a la potencia suministrada resumiendo: las bombas para cementación como para

lodos de perforación se fabrican en una gran variedad de tamaños y de potencia suministrada, proporcionan un gasto y una presión de descarga que son gobernados por cuatro factores:

- a) Velocidad de la bomba
- b) Diámetro de la camisa y del pistón
- c) Longitud de la carrera
- d) Eficiencia de la bomba.

La mayoría de las bombas operan aproximadamente a 85% de eficiencia mecánica y 100% de eficiencia volumétrica, una reducción del tamaño de la camisa permitirá elevar la presión de descarga pero reducirá el volumen.

Potencia Hidráulica

La capacidad de bombeo superficial esta limitada por:

- a) La potencia del equipo utilizado, es decir por:
 - * La potencia de los motores (varia de acuerdo a las condiciones superficiales
 - * El rendimiento de trabajo de la bomba.
- b) La eficiencia del equipo:

Si P_M es la potencia del motor y η_t la eficiencia de transmisión (puede variar entre 0.85 y 0.90, dependiendo si la instalación esta acondicionada con un convertidor de torsión), La potencia mecánica P_m a la entrada de la bomba es:

$$P_m = P_M \eta_t$$

Si la eficiencia mecánica de la bomba es η_m (aproximadamente es igual al 80%), su potencia hidráulica teórica será:

$$P_{oLn} = \eta_m P_m$$

Por lo general la eficiencia hidráulica varía entre 0.9 y 0.95 por ende la máxima potencia hidráulica será :

$$P_{ni \text{ max}} = \eta_v P_{nl} = \eta_v \eta_m \eta_t P_m$$

Esta potencia hidráulica es proporcional al producto del gasto Q por la presión de inyección P_i .

Q es el gasto medido en la boca de la succión, P_i es igual a la suma de las pérdidas de presión que ocurren en todo el sistema de circulación.

$$P_n = Q P_i = Q \Delta P$$

Por lo consiguiente se tiene que:

$$P_n = Q \Delta P$$

El gasto teórico varía con el diámetro de la camisa, la carrera del émbolo, diámetro del vástago y la velocidad de bombeo.

El fabricante de la bomba especifica una máxima presión de servicio, de acuerdo a un diámetro de camisa y a una velocidad nominal.

Por razones de economía, la potencia hidráulica utilizada no deberá ser mayor al 75% de la máxima potencia disponible.

$$P_{ni} = 0.75 P_{ni \text{ max}}$$

Como regla general, la máxima presión de servicio deberá ser el valor más pequeño, seleccionado entre la máxima presión de servicio en la bomba y la máxima presión de servicio en las condiciones superficiales.

MODELO LEY DE POTENCIAS MODIFICADO

$$a = \frac{\log n + 3.93}{58}, \quad b = \frac{1.78 - \log n}{7}$$

$$n = 3.32 \log \left[\frac{1600 - G_0}{1300 - G_0} \right]$$

$$k = \frac{1300 - G_0}{100^n}$$

$$R_1 = 4260 - 1370(n)$$

$$R_2 = 3478 - 1370(n)$$

flujo
por
TP

NO (por v.a.)

A

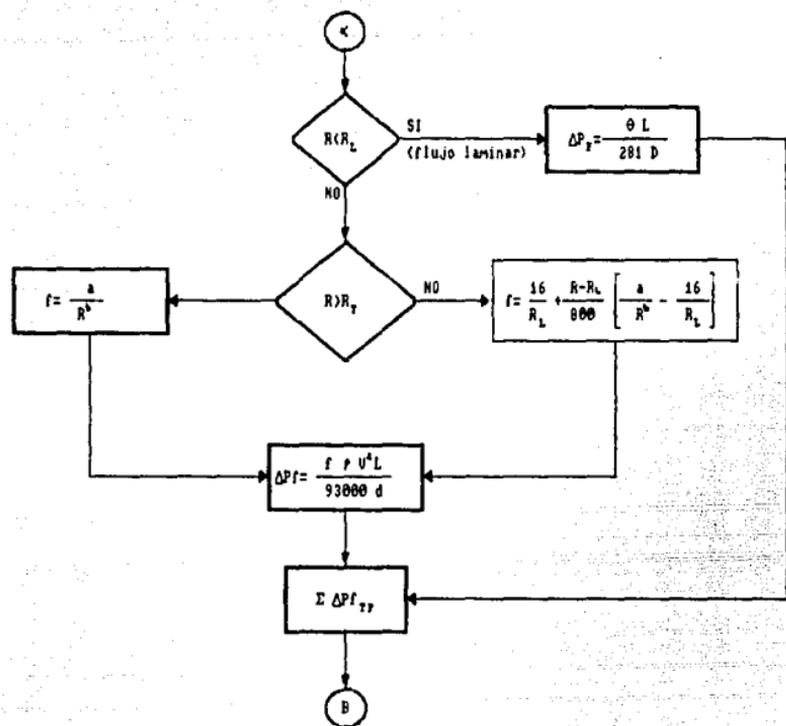
$$U_{TP} = \frac{34.51 Q}{d^2}$$

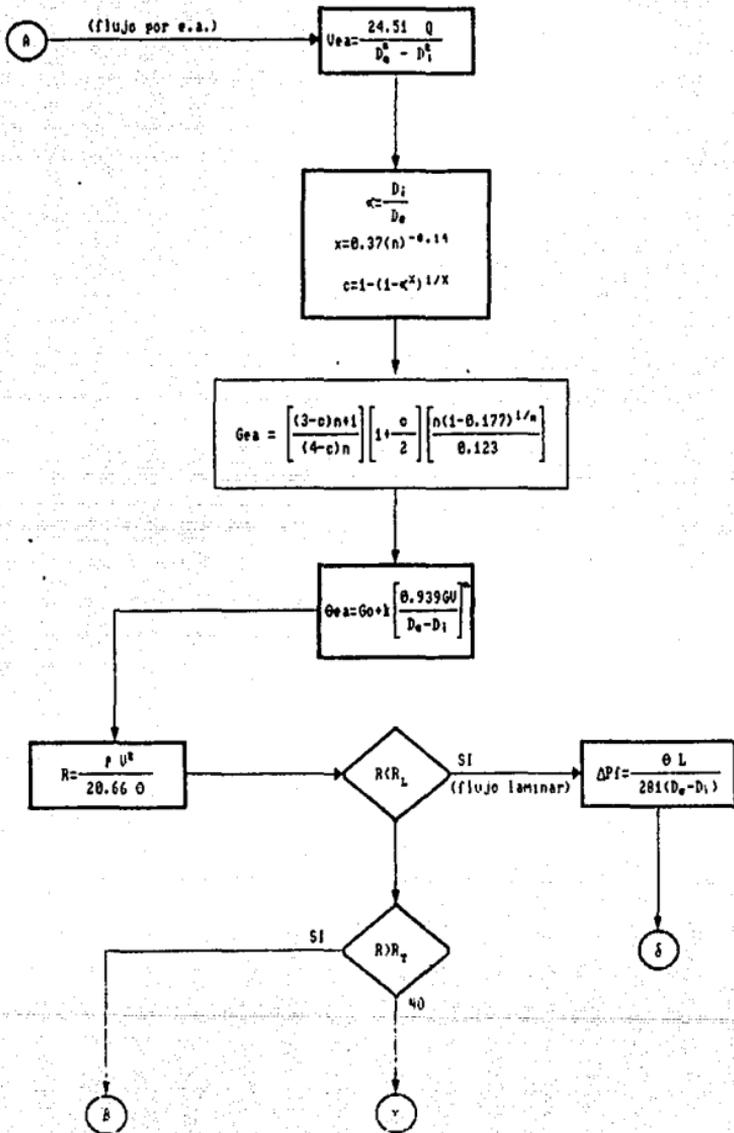
$$G_{TP} = \frac{3n+1}{4n} 0.12n(0.123)^{1/n}$$

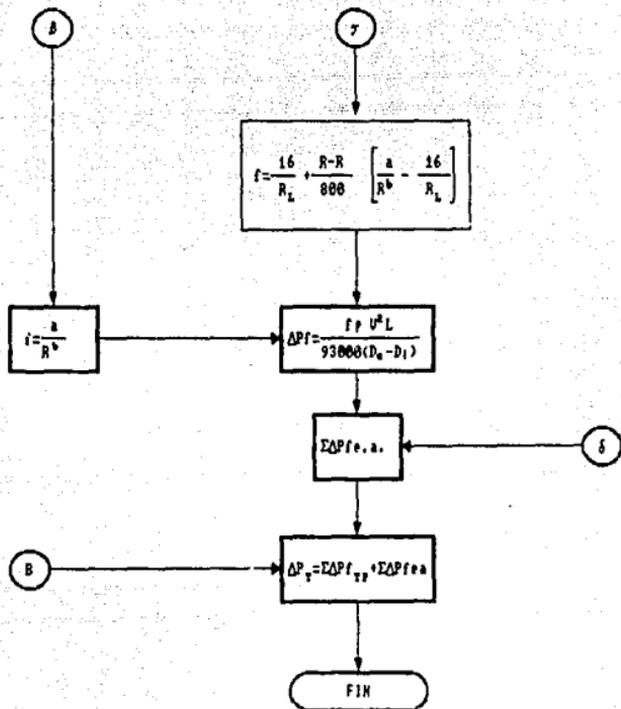
$$\theta_{TP} = G_0 + k \left[\frac{0.939 G U}{d} \right]^n$$

$$P = \frac{\rho U^3}{20.66 \theta}$$

<







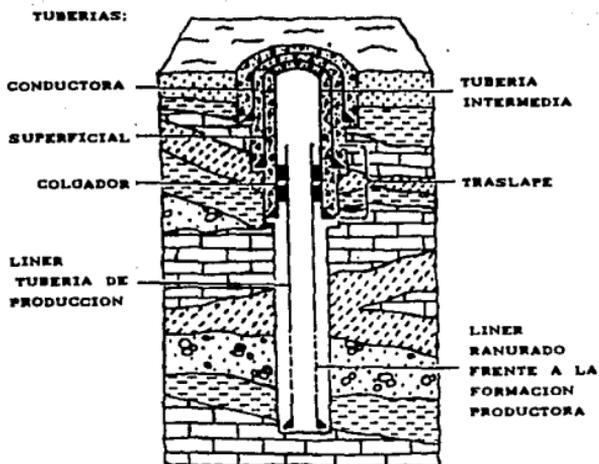
BIBLIOGRAFIA

1. Benitez Hernández Miguel A., Tecnología de la perforación, Facultad de ingeniería, UNAM
2. Alonso Cárdenas Ignacio, Terminación de pozos, Facultad de ingeniería, UNAM
3. Morales J.M., Herrera O., Arreola R., Construcción de un pozo geotérmico, Instituto de investigaciones eléctricas
4. Mendoza Esquivel Jorge H., Reparación y mantenimiento de pozos geotérmicos, Tesis profesional

TEMA VI TECNICAS DE CEMENTACION

Las cementaciones primarias son la etapa más importantes en la construcción de un pozo, ya que de ellas dependen las operaciones subsiguientes de perforación y terminación del mismo.

Como se menciono anteriormente las tuberías de revestimiento se clasifican como se muestra a continuación:



TUBERIAS DE REVESTIMIENTO EN UN POZO GEOTERMICO

6.1 TIPOS DE CEMENTACIONES

Existen dos tipos de cementaciones, las cementaciones primarias y las cementaciones secundarias.

6.1.1 CEMENTACIONES PRIMARIAS

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 T.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 anular entre la T.R. y el agujero, dicho espacio se conoce como espacio anular.

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

Por esto, antes de iniciar cualquier operación, el ingeniero responsable de la cementación, debe corroborar que el cemento por 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 principales funciones de la cementación primaria son:

- Soportar la T.R.
- Aumentar la resistencia de la T.R.
- Evitar la contaminación de acuíferos con fluido geotérmico y viceversa.
- Minimizar la corrosión de la T.R., reduciendo el contacto con los fluidos de las formaciones.

SOPORTAR 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 desprege pudiendo caer o "crecer" dilatarse excesivamente en la superficie.

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^2 , 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.

EVITAR CONTAMINACION DE ACUIFEROS CON FLUIDOS GEOTERMICOS

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 superficiales pues los fluidos de perforación y los

fluidos geotérmicos los contaminarian.

MINIMIZAR LA CORROSION 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.

MÉTODOS DE CEMENTACION PRIMARIA:

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:

CEMENTACION EN UNA ETAPA

Las tuberías generalmente se cementan en una etapa (operación continua) 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 figura 8.1 se presenta este método y se describirá más ampliamente en un párrafo siguiente.

CEMENTACION EN ETAPAS

Es aquella que se realiza en 2 ó 3 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 primer etapa; esto incrementa la posibilidad de canalización y disminuye la remoción del enjarre de lodo en las paredes del pozo. En la figura 6.2 se ilustra este método.

CEMENTACION CON TUBERIA 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 pequeño diámetro. En la figura 6.3 se presenta este método.

CEMENTACION INVERSA

Esta técnica se utiliza cuando no es posible bombear la lechada sin romper las formaciones débiles, ocasionando pérdidas de circulación durante la cementación. En este método se bombea la lechada por el espacio anular y se desplaza el lodo hacia el interior de la tubería, esto permite utilizar lechadas con alta densidad en el fondo del pozo y lechadas ligeras en la

superficie. En la figura 8.4 se describe este método.

CEMENTACION CON FRAGUADO RETRASADO

En teoría este método permite tener mayor uniformidad de cemento sana 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 requiere periodos largos de espesamiento, (entre 18 y 36 horas) y en consecuencia tiempo de espera muy grandes. En la figura 8.5 se muestra este método.

PROCESOS DE LAS CEMENTACIONES PRIMARIAS

El primer tramo de tubería que se introduce al pozo lleva una zapata guía, (tapa de protección) para evitar dañar la T.R. al introducir en el pozo, ver detalle "a" en la figura 8.6.

Para que la tubería quede bien colocada en el agujero, se colocan centradores "alternados" (en un tubo y en otro no). Al alcanzar el fondo con la tubería de revestimiento, se levanta la T.R. 4 ó 5 metros y se coloca el cabezal de cementación en la superficie (boca) de 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 detalles "b", y "c" en la figura 8.6. El equipo de cementación (alta presión) detalle "d" 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 tanques con el cemento ya dosificado y con el agua de mezcla; el número de estos 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 por la bomba y es enviada al pozo, ver detalle "h" en la figura 8.6.

Antes de iniciar el bombeo de lechada se introduce en la tubería un tapón limpiador (detalle "f") 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.

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 detalle "g" en la figura 8.6.

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.

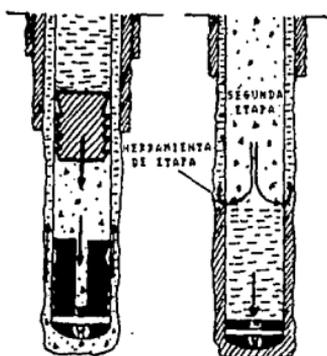
CEMENTACION DE TUBERIAS CORTAS O "LINERS"

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



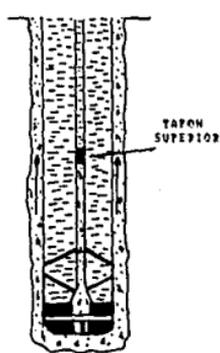
**METODO DE
DESPLAZAMIENTO
NORMAL**

FIG. 6.1



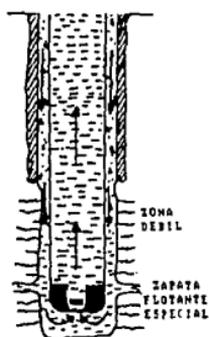
**METODO DE
CEMENTACION EN
DOS ETAPAS**

FIG. 6.2



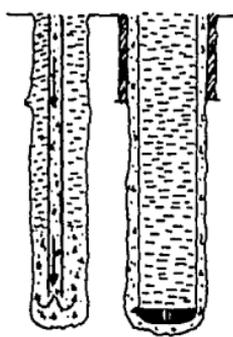
**CEMENTACION CON
TUBERIA INTERIOR**

FIG. 6.3



**CEMENTACION DE
CIRCULACION INVERSA**

FIG. 6.4



**CEMENTACION DE
FRAGUADO RAPIDO**

FIG. 6.5

METODOS PARA CEMENTACIONES PRIMARIAS

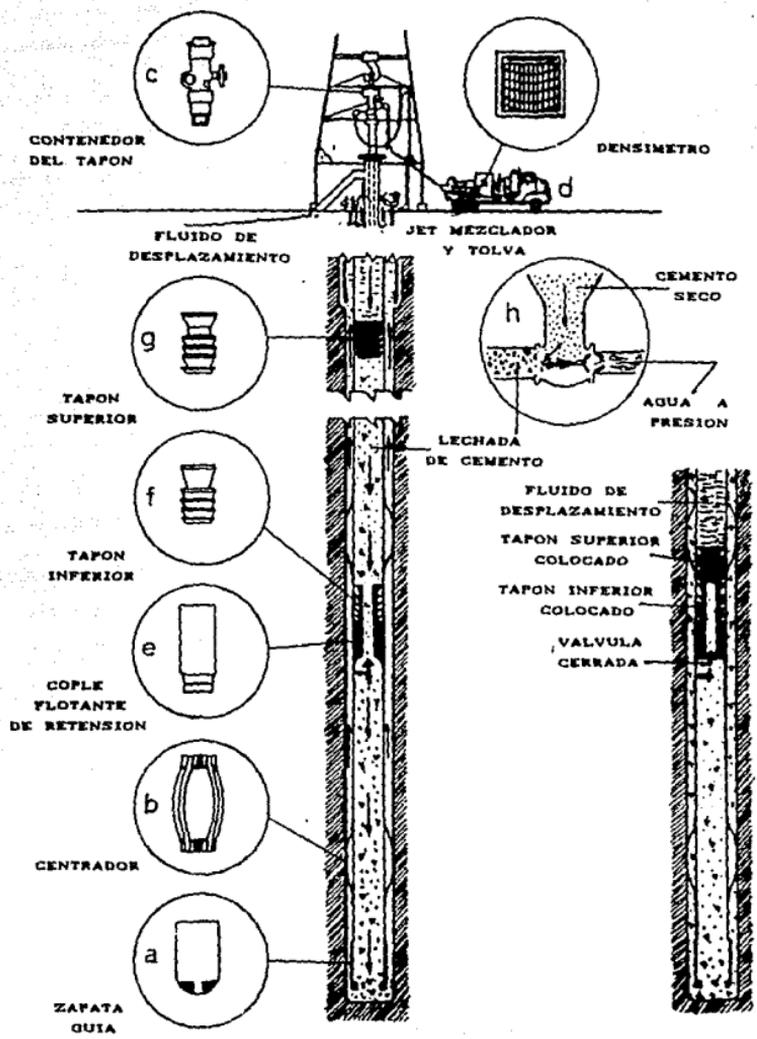


FIGURA 8.6 CEMENTACION PRIMARIA POR EL METODO DE DOS TAPONES

- Problemas durante la perforación del pozo (pérdidas de lodo, intentos de pegadura, etc.)
- Altas presiones al continuar perforando y tener que incrementar la densidad del fluido de control
- Límite 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.

TECNICA DE CEMENTACION DE UNA TUBERIA 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 limpiador y se bombea el cemento. 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 detenía 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 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.

6.1.2 CEMENTACIONES SECUNDARIAS O CORRECTIVAS

Las cementaciones secundarias, son cementaciones correctivas, en la figura 6.7 se presentan los siguientes ejemplos:

- Recementación en el espacio anular
- Cementaciones forzadas
- Tapones para sellar zonas de pérdida de circulación
- Tapones para abandonar pozos
- Tapones para iniciar perforación direccional.

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 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:

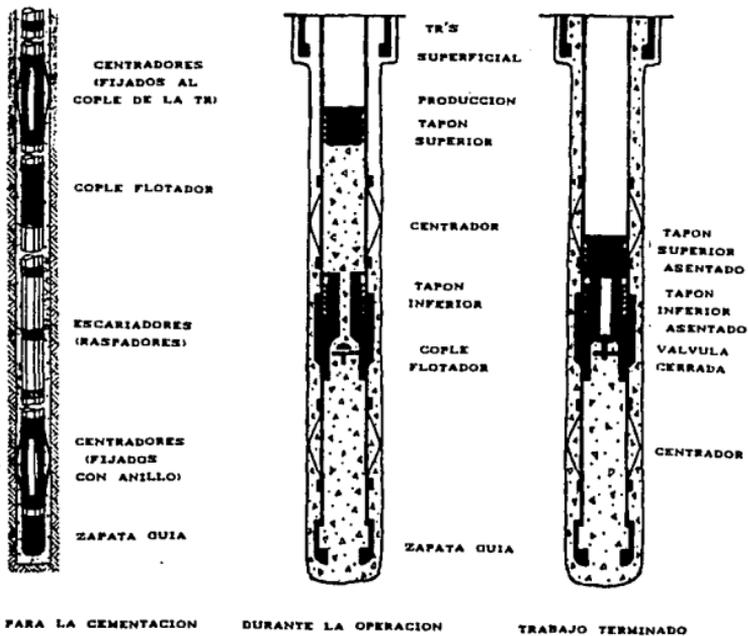


FIGURA 0.7

- Meter un tubing pequeño por el espacio anular y se inyecta la lechada a presión, esta recementación es muy difícil debido al espacio anular, ver figura 6.8.a.
- Cementación por gravedad empleando alta presión para reducir las bolsas de aire y/o fluido de perforación, ver figura 6.8.b.
- Aplicar por gravedad arena de sílice, que se suministra en forma intermitente para llenar el espacio anular que carece de cemento, 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.
- Una técnica más es 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 colapsos.

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 figura 6.8.c.

Por lo tanto el objetivo de una cementación forzada, es el

aislamiento de una área en el pozo o controlar el flujo de fluidos entre 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 (aislar).
- Abandono de zonas o de pozos agotados.
- Reparar una cementación primaria defectuosa.

La tecnología de la cementación forzada incluye conocimientos sobre 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 PERDIDA DE CIRCULACION

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, ver figura 6.8.d, 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 lechada en la T.P. y el exceso dentro del pozo.

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 lechada que se requiere esta 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 esta se mantiene entonces tuvo éxito la colocación del tapón. Si se pierde la presión se requiere colocar otro tapón repitiendo este proceso.

TAPONES PARA ABANDONAR POZOS

Quando 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 figura 6.8.e

TAPONES PARA INICIAR PERFORACION DIRECCIONAL

En algunos pozos se puede presentar el siguiente problema: Después de haberse caído un tramo de tubería que no se puede 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 figura 6.8.f.

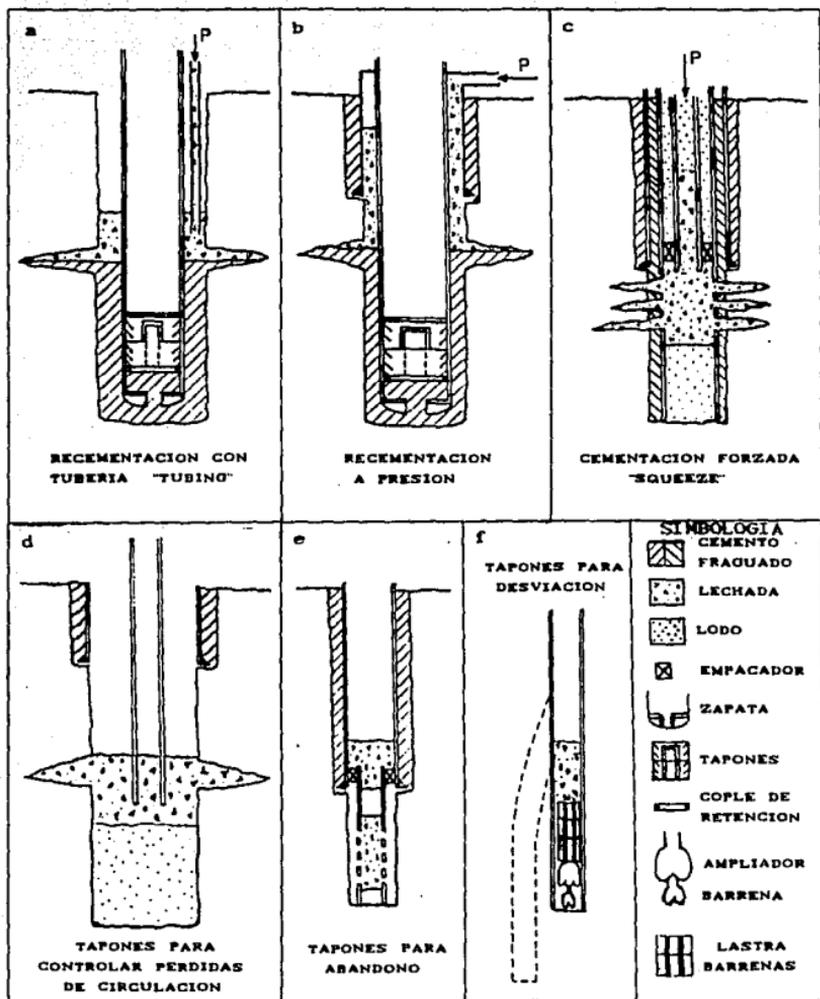


FIGURA 6.8 CASOS DE CEMENTACIONES SECUNDARIAS

6.2 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CEMENTACION DE POZOS GEOTERMICOS

De las observaciones efectuadas durante la perforación, terminación, mantenimiento y reparación de pozos en los campos de Cerro Prieto, Los Azufres y La Primavera (México), se detectaron los siguientes problemas:

- Mala adherencia del cemento a la T.R. o a las paredes del pozo.
- Pérdida de circulación durante la cementación.
- Determinación de la cima del cemento.
- Excesivo tiempo de fraguado en los cementos utilizados.
- Retrogresión de resistencia en pozos productores.
- Empleo del cemento de construcción sin aditivos.
- Empleo de salmuera en la preparación de la lechada.

MALA ADHERENCIA DEL CEMENTO

La falla de adherencia entre el cemento y la tubería de revestimiento o entre el cemento y 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 ocasionaran colapsos (ruptura de la T.R. por altas presiones), cuando se inicie la producción, además de proporcionar flujo de vapor a través del espacio anular. Ver figuras 6.9.a, 6.9.e y 6.9.f.

PERDIDA DE CIRCULACION DURANTE LA CEMENTACION

El problema "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 en la formación, entonces el cemento se pierde dejando desprotegida a la T.R.. Ver la figura 6.9.b.

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 esferolita, perlita expandida, glisonita, etc. Mediante el empleo de espaciadores a base de silicato de sodio es posible realizar cementaciones en columnas de 1,000 metros sin pérdida de circulación, como ha sucedido en varios pozos de Cerro Prieto.

DETERMINACION 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 figuras 6.9.b y 6.9.c.

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

EXCESIVO TIEMPO DE FRAGUADO EN LOS CEMENTOS UTILIZADOS

El excesivo tiempo de fraguado 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 figura 6.9.c.

RETROGRESION DE RESISTENCIA EN POZOS PRODUCTORES

La retrogresión de resistencia se presenta en los pozos con más de 3 años en producción; y es el proceso de destrucción del cemento (disminuye su resistencia y se incrementa su permeabilidad) por lo que este no cumple sus funciones. Ver en la figura 6.9.d entonces se presentan colapsos en secciones del pozo donde la tubería queda desprotegida como se muestra en la figura 6.9.e.

EMPLEO DEL CEMENTO DE CONSTRUCCION 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 las figuras 6.9.d y 6.9.e

EMPLEO DE SALMUERA EN LA PREPARACION 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 la figura 6.9.f.

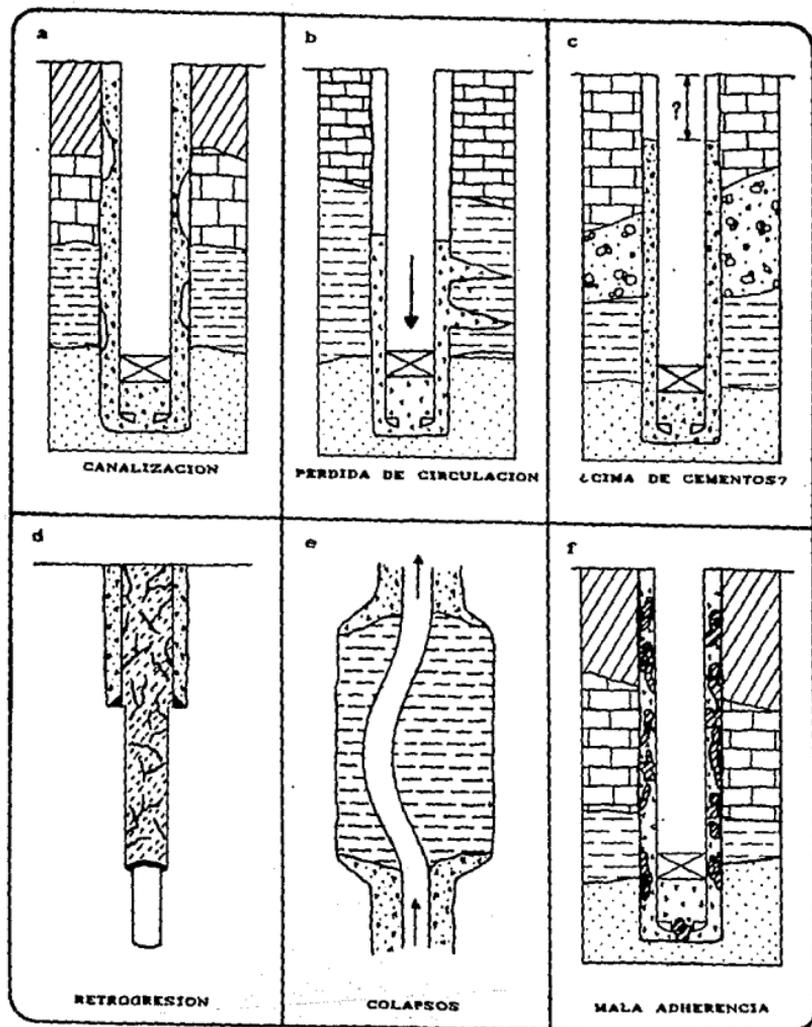


FIGURA 8.9 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS CEMENTOS GEOTERMICOS

BIBLIOGRAFIA

1. Morales J.M., Santoyo S., Pérez A., "Construcción de pozos Geotérmicos", Tecnología de Construcción en Pozos Geotérmicos, Simposio Parte II: cementaciones, Jun. 1990, Informe I.I.E., Cuernavaca Mor. México, Jun. 1990.
2. Alonso Cárdenas Ignacio, "Apuntes de Terminación de Pozos", Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México D.F., Abr. 1983.

TEMA VII VERIFICACION DE LA CALIDAD DE LA CEMENTACION

7.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presenta la evaluación de calidad en la cementación que debe asegurar un buen aislamiento entre las zonas de interés. Se proponen además, técnicas para evaluar el grado de corrosión ya sea por mediciones directas o bien por comparación entre un registro de referencia y corridas repetidas después de cierto intervalo de tiempo.

7.2 CONTROL DE CEMENTACION CBL - VDL

El registro sónico en la cementación CBL asociado con el registro de densidad variable VDL, ha sido durante muchos años el único método para evaluar la calidad de la cementación (fig. 7.1). Aunque este servicio permite obtener una respuesta clara en la mayoría de los casos, es importante recordar los fundamentos básicos del principio de estas mediciones, para entender la influencia de los diferentes parámetros de limitación y resolver los casos difíciles de interpretar.

PRINCIPIO DE MEDICION

El registro CBL se corre con las herramientas clásicas (registro sónico). Un pulso de energía acústica, con frecuencia aproximada de 20 KHz, es emitido periódicamente por un transmisor omnidireccional hacia la formación (fig. 7.2). La medición consiste en registrar la amplitud o atenuación de las ondas que

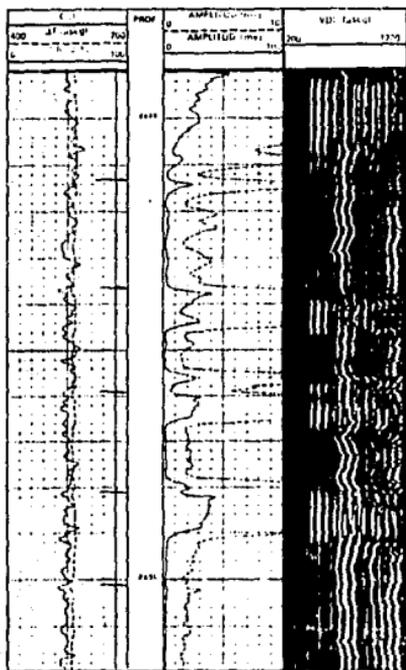


Fig. 7.1 Registro CBL-VDL.

se propagan axialmente a lo largo de la tubería; esto se logra mediante dos receptores ubicados en la sonda a una distancia de 3 y 5 pies respectivamente del transmisor. Dichas mediciones dependen del grado de acoplamiento mecánico (principalmente de cizallamiento) entre el cemento y la tubería.

Se ha demostrado que la cantidad de energía acústica transmitida por la tubería depende de la velocidad de propagación de una onda plana en ésta, de su densidad y del espesor de cemento. La distribución del cemento alrededor de la tubería afecta considerablemente la transmisión de la energía.

El receptor ubicado a 3 pies de distancia del transmisor mide la amplitud de la primera cresta de la onda acústica recibida, así como su tiempo de tránsito. El receptor a 5 pies recibe los trenes completos de onda, para la presentación de la densidad variable VDL.

En el tren de ondas registrado por el receptor de 3 pies, el primer eco El corresponde generalmente a la onda transmitida por la tubería, puesto que la velocidad de propagación es generalmente mucho mayor en el acero que en las formaciones o en los fluidos que llenan el pozo. La amplitud es máxima para una tubería sin adherencia de cemento y mínima cuando la cementación es buena. El análisis de amplitud constituye el principio fundamental de la medición (fig. 7.3).

A raíz de las características omnidireccionales del transmisor, se debe mantener una centralización perfecta de la sonda en la tubería, para obtener la máxima amplitud de señal. Una excentración de 1/4" reduce la amplitud aproximadamente en un 30%. La curva de tiempo de tránsito es útil para reconocer este

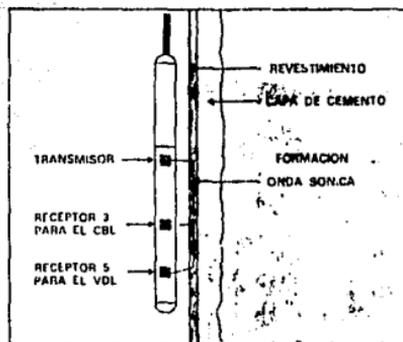


Fig. 7.2 Control de cementación con la herramienta de sónico compensado.

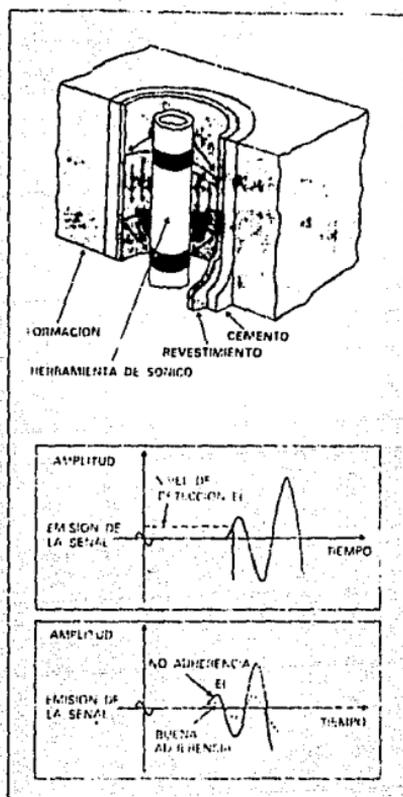


Fig. 7.3 Análisis de la señal de medición.

efecto así como las anomalías de detección que causan saltos de ciclos.

El registro de densidad variable VDL es un complemento muy útil del registro CBL para reconocer las condiciones poco comunes donde la interpretación del CBL se vuelve difícil, como formaciones de alta velocidad, microanillos o canales y mal acoplamiento entre cemento y formación.

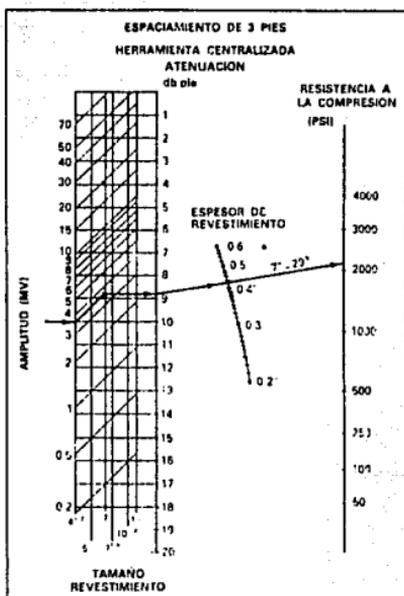
EVALUACION CUANTITATIVA

Mediante gráficas derivadas de fórmulas empíricas, se puede relacionar la amplitud de la onda acústica con la resistencia del cemento a la compresión. Sin embargo, es preferible expresar la amplitud en términos de atenuación de la onda (db/pie) o de "índice de adherencia".

La gráfica de la figura 7.4 permite, a partir de la amplitud, calcular directamente la atenuación de la onda. El índice de adherencia (B) se define como la relación entre la atenuación en un nivel considerado y la atenuación máxima calculada en un nivel bien cementado.

$$B = \frac{\text{Atenuación al nivel considerado}}{\text{Atenuación máxima}}$$

La experiencia adquirida, ha demostrado que, en condiciones normales de cementación, un índice de adherencia superior a 0.8 es suficiente para asegurar un buen aislamiento, a condición de que el intervalo sea lo suficientemente largo. Se han obtenido resultados satisfactorios para un índice de adherencia de 0.8,



**Fig. 7.4 Evaluación cuantitativa
del registro CBL.**

con un mínimo de 5 pies en tuberías de 5 1/2", 10 pies en tuberías de 7", ó 15 pies en tuberías de 9 5/8".

ANOMALIAS DEL REGISTRO CBL

Ciertas condiciones poco usuales pueden ser la causa de un comportamiento anómalo de las curvas del registro CBL. Para detectar estas situaciones, es necesario comparar cuidadosamente las curvas de tiempo en tránsito, amplitud y registro de densidad variable.

MICROANILLO

En ciertas condiciones, un pequeño espacio anular logra formarse entre la tubería y el cemento. Generalmente, se provoca por la contracción de la tubería después de soltar la presión al final de la cementación o después de un cambio importante de presión hidrostática en el pozo. Pero, también puede ser motivado por la condición física en la superficie de la tubería.

El efecto de microanillo aparece frecuentemente cuando se toma el registro CBL-VDL después de haber reemplazado el lodo de perforación (usado durante la operación de cementación) por un fluido más ligero (agua). El espesor del anillo así creado, es normalmente insignificante y no compromete al buen aislamiento hidráulico de los distintos intervalos productores (en el orden de 0.01").

Sin embargo, es suficiente para que cierta cantidad de energía acústica se transmita por la tubería, causando valores de alta amplitud. Por lo tanto, el registro CBL resulta pesimista ante la presencia de un microanillo. En el registro de densidad variable

se pueden apreciar reflexiones moderadas de tubería y ecos de formaciones relativamente fuertes.

FORMACIONES DE ALTA VELOCIDAD

En las formaciones cuyo tiempo de tránsito es inferior al tiempo de tránsito en el acero (carbonatos compactos, evaporitas), la medición de la amplitud del primer eco ya no es representativa de la calidad del cemento. Estas formaciones causan, generalmente, lecturas en la curva en tiempo de tránsito, inferiores a las del acero, fenómeno que se puede observar igualmente en la densidad variable. Las lecturas de amplitud, en cambio, dependen del modo de detección escogido durante el registro.

MAL ACOPLAMIENTO CEMENTO-FORMACION

Aunque la curva de amplitud muestre niveles bajos que indican buena adherencia entre tubería y cemento, el registro de densidad variable puede, en ciertos casos, carecer de señales de formación. Aquí existen varias interpretaciones:

-La misma señal de formación es débil. Se puede comparar con el VDL de pozo abierto, cuando exista.

-El cemento ejerce una buena adherencia con la tubería, pero no con la formación.

CANALIZACION

El efecto de canalización detrás de la tubería constituye una de las limitaciones mayores del registro CBL-VDL. Eso se debe a la característica omnidireccional de los transmisores y

receptores. La medición de la amplitud se relaciona con la adherencia promedio del cemento alrededor de la tubería y no permite distinguir entre un sello uniformemente pobre y un canal abierto en una masa homogénea de cemento.

Se pueden presentar las siguientes situaciones:

- a) Canalización a lo largo de la tubería
- b) Canalización detrás del cemento
- c) Canalización dentro de la formación

En el primer caso, la curva de amplitud indicará niveles relativamente altos, mientras que el registro de densidad variable mostrará reflexiones fuertes de la formación.

En el segundo caso, el canal podrá no ser detectado con el registro CBL-VDL, si el espesor de cemento es lo suficientemente grueso.

En el tercer caso, no será posible detectar la comunicación con el registro CBL-VDL.

Los métodos que permiten poner en evidencia el fenómeno de canalización cuando existen dudas sobre la calidad en la cementación, son los siguientes:

- Registro de temperatura o de ruido para detectar movimientos de fluido detrás del revestimiento.
- Pruebas de comunicación : se perforan intervalos pequeños para verificar si existe comunicación de presión entre ellos.

7.3 CONTROL DE CORROSION

El fenómeno de corrosión ya sea de origen químico o mecánico.

constituye un factor que puede reducir en forma notable el periodo de vida en un pozo. De acuerdo a las condiciones locales de producción, la corrosión se localizará eventualmente en determinados intervalos de la tubería o se generalizará en todo el pozo. Los factores que, determinan el avance de la corrosión, entre otros, la salinidad en agua de formación o de inyección, las condiciones de la cementación, los diferenciales de presión o gastos de producción son. con el fin de tomar acciones preventivas es conveniente realizar mediciones que permitan evaluar el progreso del daño con el tiempo. [Ref. 3].

Las mediciones de corrosión obtenidas por las herramientas ETT (espesor electromagnético) y PAT (análisis de tubería) ofrecen información cualitativa, tanto respecto al espesor de revestimiento, como sobre la presencia de daños en la superficie interior o exterior de las tuberías.

HERRAMIENTA ETT

La herramienta electromagnética de medición de espesor mide el cambio de fase ocasionado por la presencia de un revestimiento en un campo electromagnético (fig. 7.5). Una lectura tomada en el aire, sirve de referencia para un espesor metálico nulo. El cambio de fase varía linealmente con el espesor promedio del revestimiento. Los parámetros, tales como permeabilidad magnética del metal, frecuencia de la medición, resistividad y diámetro de la tubería, afectan igualmente el cambio de fase. Por lo general, estos parámetros pueden variar de un nivel a otro, lo cual impide una determinación cuantitativa del espesor metálico. Sin embargo, son esencialmente constantes en el tiempo y, mediante

registros tomados a determinados intervalos de tiempo, se puede determinar la evolución del desgaste.

CALCULO DEL CAMBIO DE FASE

El cálculo del cambio de fase real se efectúa de la siguiente manera:

$$\phi = \phi_c + (360^\circ - \phi_a)$$

donde

ϕ = Cambio real de fase debido a la presencia de metal.

ϕ_c = Lectura de la herramienta en la tubería.

ϕ_a = Lectura de la herramienta en el aire.

CALCULO DEL DESGASTE

Por comparación directa de los cambios reales de fase, se puede determinar el desgaste o pérdida de metal entre dos registros. Suponiendo que ϕ_1 es el cambio real de la fase calculado en el registro 1 y ϕ_2 el cambio calculado en el registro 2, la pérdida de metal ($\Delta\sigma$) se deriva de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\sigma = (\phi_1 - \phi_2) * d / \phi_1 = \Delta\phi * d / \phi_1$$

o

$$\Delta\sigma(\%) = \Delta\phi * 100 / \phi_1$$

Con

$$\phi_1 = \phi_{c1} + (360^\circ - \phi_{a1})$$

$$\phi_2 = \phi_{c2} + (360^\circ - \phi_{a2})$$

ϕ_{a1} = Lectura en el aire del registro 1

ϕ_{a2} = Lectura en el aire del registro 2

ϕ_{c1} , ϕ_{c2} = Lectura de la herramienta en los registros 1 y 2

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

d = Espesor nominal del revestimiento.

Quando el desgaste es inferior al 20% es difícil efectuar una evaluación cuantitativa, basada en un solo registro ETT.

La respuesta en un tubo determinado puede variar considerablemente y quedar todavía dentro de las especificaciones API; es imposible definir un solo valor del cambio de fase para la lectura ETT en una tubería de tamaño, peso y grado determinados. Por lo tanto, la técnica que consiste en comparar registros tomados a diferentes intervalos de tiempo es la única que permite efectuar una evaluación cuantitativa del desgaste.

Conviene aclarar que la herramienta ETT es sensible al espesor total del metal presente. En el caso de tuberías concéntricas el registro leerá un espesor total aparente. Que incluye los espesores de las diferentes tuberías. Por comparación con el registro PAT, es posible localizar anomalías en la tubería externa.

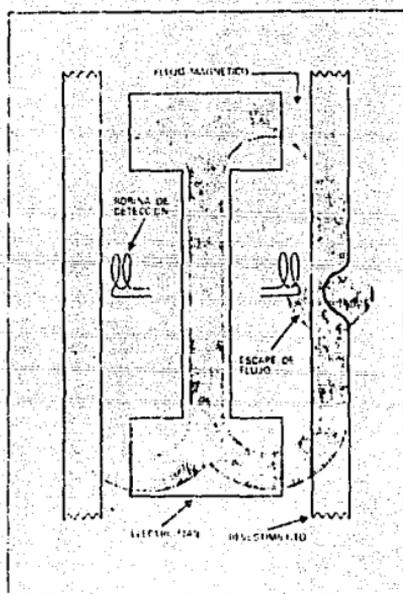


Fig. 7.6 Principio de la medición de escape de flujo.

HERRAMIENTA PAT

La herramienta PAT (anomalías de tuberías) es una herramienta más reciente que la ETT, diseñada para detectar pequeñas anomalías que no se pueden localizar con esta última.

Dos mediciones electromagnéticas son de interés para el diseño PAT: el escape de flujo magnético y la distorsión de corrientes parásitas.

ESCAPE DE FLUJO

Cuando los polos de un imán están colocados cerca de una lámina de acero, empezará a circular un flujo magnético dentro de la misma (fig 7.6). Las líneas de flujo son paralelas a la superficie de la lámina, mientras no existan irregularidades en la superficie. La forma en las líneas de flujo puede ser distorsionada ante la presencia de algún defecto o cavidad en la lámina. Las líneas de flujo tienden a levantarse sobre la superficie, en el sitio de la anomalía, en una proporción que depende de la magnitud del defecto. Este efecto se define como escape de flujo.

Por medio de una bobina, desplazándose a velocidad constante en la dirección del flujo magnético, se se puede detectar un voltaje inducido en el lugar sujeto a escape de flujo; mientras más grande la anomalía, mayor el voltaje. Conviene aclarar que el escape de flujo se produce a ambos lados de la lámina, sin tomar en cuenta la posición del defecto, lo que permite detectarlo con una pasada en un solo lado de la lámina. Cuando no existe distorsión de flujo no se produce ninguna señal.

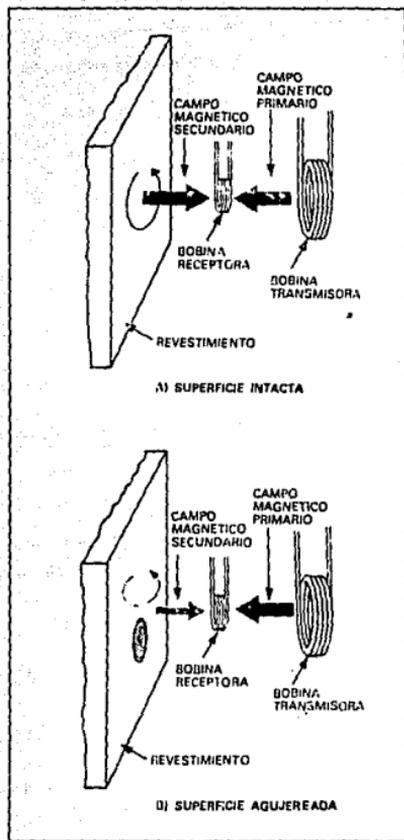


Fig. 7.7 Principio de medición de corrientes parásitas.

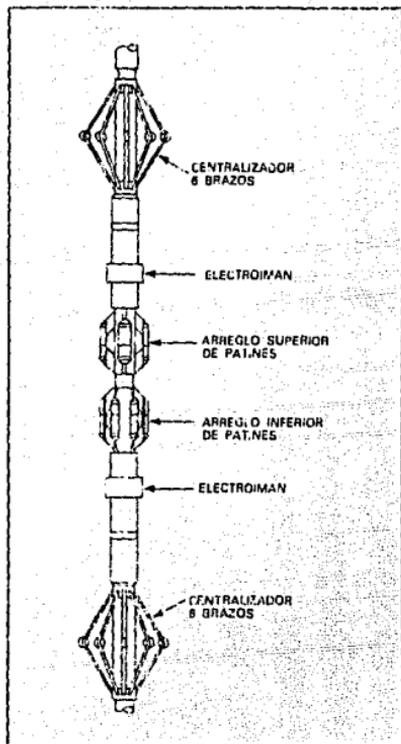


Fig. 7.8 Herramienta PAT.

CORRIENTES PARASITAS

Una corriente alterna de alta frecuencia, aplicada en una bobina, permite generar corrientes parásitas de superficie en una hoja metálica ubicada en su cercanía (fig 7.7). Las corrientes parásitas inducidas por el campo magnético, a su vez inducen un campo secundario que tiende a aplicar el campo aplicado. El campo total resultante es la suma vectorial de ambos. Por medio de una bobina receptora es posible detectar el voltaje inducido. La generación de corrientes parásitas a altas frecuencias es un efecto muy superficial. Si la superficie del metal cerca de las bobinas está dañada, la magnitud de las corrientes parásitas disminuye y por lo tanto el campo magnético total aumenta. Un defecto ubicado lejos de las bobinas no podrá ser detectado, ni tampoco agujeros dentro de la lámina, que estén a cierta distancia de la superficie.

MEDICION

Para efectuar los dos tipos de medición, la herramienta PAT está formada por un núcleo alargado de hierro, con los dos polos electromagnéticos situados en sus extremidades y doce sensores (patines) distribuidos en dos arreglos de seis patines, entre dichos polos (fig. 7.8).

Cada patín contiene un transmisor para generar las corrientes parásitas y dos sensores de medición (bobinados en sentido contrario) para el escape de flujo y corrientes parásitas.

Los dos arreglos de patines son idénticos y están desplazados angularmente, de manera que cubran la máxima parte de la superficie interna de la tubería. Los patines se mantienen en

contacto con la tubería por medio de resortes y el tamaño del electroimán puede ser seleccionado según el diámetro de la tubería. Las mediciones de escape de flujo y de corrientes parásitas se efectúan en cada arreglo y la señal máxima de cada uno es enviada al equipo de superficie para su procesamiento. Las cuatro señales (2 de escape de flujo, 2 de corrientes parásitas) se presentan en el registro (Fig. 7.9).

INTERPRETACION

Las mediciones de la herramienta PAT están sujetas a interpretaciones de tipo cualitativo. Los voltajes inducidos en las bobinas de medición dependen no solamente del tamaño de la anomalía, sino también de la permeabilidad magnética de la tubería, la velocidad del registro y la magnitud del defecto. Se recomienda para la detección de pequeños defectos en la tubería, tales como picaduras y agujeros. No se pueden detectar defectos como la disminución gradual del espesor del revestimiento. Será posible determinar, por comparación, si las anomalías están ubicadas en la superficie interior o exterior del revestimiento, dado que la medición de escape de flujo se verá afectada por anomalías ubicadas tanto dentro como fuera de la tubería y la distorsión de corrientes lo será únicamente por la condición interna de la tubería. Las mediciones por corrientes parásitas son insensibles a anomalías de diámetro inferior a 0.39", mientras que mediante el principio de escape de flujo se pueden distinguir hasta anomalías con 0.25". Para obtener una imagen completa del estado de la tubería es recomendable complementar esta medición con un registro ETT (fig. 7.10).

BIBLIOGRAFIA

1. M.A. Benitez Hernandez "Apuntes de tecnología de perforación 2a. parte. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. Abril de 1988.
2. Dumont A., J.B. Patin, G. Le Floch "A Single Tool for Corrosion and Cement Evaluation. Paper SPE 13140, 1984.
3. Schlumberger "Evaluación de Formaciones en México" , Septiembre de 1984.
4. Froelich B., Dumont A., Pittman D., Seeman B. "Cement Evaluation Tool: A New Approach to Cement Evaluation. Journal of Petroleum Technology, August 1982.

CONCLUSIONES

El presente trabajo es una recopilación de los procedimientos seguidos hasta la fecha en la técnica de cementación de pozos geotérmicos basada en los métodos aplicados en la ingeniería petrolera, siendo este el punto de partida para estudios posteriores que realicen innovaciones a los métodos existentes.

Las técnicas utilizadas en la cementación de pozos petroleros dan buenos resultados en un inicio al aplicarlas a pozos geotérmicos, sin embargo las condiciones como temperatura, corrosión, incrustación, etc., existentes en un yacimiento geotérmico son más severas. Es por ello que aunque el procedimiento de operación es prácticamente el mismo, existen diferencias en cuanto al diseño. Tales diferencias se marcan en este trabajo.

La importancia de este trabajo estriba en que la energía geotérmica ha tenido un gran auge en los últimos años, siendo una fuente alterna de energía con grandes perspectivas a futuro.