

F866
e.2

25 MAYO 1972
INGRESADO A INVENTARIO CON
ORD. No.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

**CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS
DE
REVESTIMIENTO**

TESIS DE GRADO

Que para optar el Título de

INGENIERO PETROLERO

Presenta:

Plinio David Freire Barroso

Guayaquil - Ecuador

1 9 7 2



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE I.G.M.P.

CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

T E S I S

De Grado que para optar el Título de

I N G E N I E R O P E T R O L E R O

P R E S E N T A:

PLINIO DAVID FREIRE BARROSO

Guayaquil - Ecuador

Febrero 22 de 1.972.

**El patrimonio intelectual de
esta Tesis de Grado pertenece
a la Escuela Superior Po-
litécnica del Litoral.**



BIBLIOTECA

PLINIO DAVID FREIRE BARROSO

Guayaquil, Febrero 22 de 1972

AUTOR

Rino Surbarso

DIRECTOR DE TESIS

[Signature]

PROFESOR

PROFESOR

PROFESOR

CON INFINITO AGRADECIMIENTO Y

RESPECTO A MIS PADRES:

EL SR. DAVID FREIRE CORTEZ

Y LA SEÑORA ANGELA BARROSO DE FREIRE

COMO UN PRESENTE A SUS INNUMERABLES

SACRIFICIOS POR DARME UNA PROFESION

FRATERNALMENTE A MIS

HERMANOS:

TITO, LILIA, EDWIN,

CHANENA, FULTON, YASMIN Y

GABRIEL

CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

INTRODUCCION

GENERALIDADES

- A) Objetivos
- B) Características de las formaciones
- C) Historia

I) MATERIALES Y EQUIPO COMUNMENTE EMPLEADOS

- I.1.- Tuberías
- I.2.- Cementos y aditivos
- I.3.- Equipo
 - I.3.1.- Equipo sub-superficial
 - I.3.2.- Equipo superficial

II) FACTORES QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO.

III) ACONDICIONAMIENTO DEL POZO Y DEL LODO DE PERFORACION

- III.1.- Colocación de la tubería de revestimiento
- III.2.- Programa de circulación

IV) DISEÑO DE LA CEMENTACION

- IV.1.- Técnica de cementación primaria convencional bajo régimen de flujo turbulento.
- IV.2.- Técnica de cementación primaria convencional bajo régimen de flujo laminar.
- IV.3.- Técnica de cementación primaria por etapas.

CONCLUSIONES

NOMENCLATURA

BIBLIOGRAFIA



BIBLIC

INDICE

| | PAG. |
|--|------|
| INTRODUCCION | 1 |
| GENERALIDADES | 3 |
| A) Objetivos | 3 |
| B) Características de las formaciones | 4 |
| C) Historia | 7 |
| CAPITULO I.- | |
| MATERIALES Y EQUIPOS COMUNMENTE EMPLEADOS: | 11 |
| I.1.- Tuberías | 12 |
| I.2.- Cementos y aditivos | 15 |
| I.2.1.- Cementos | 15 |
| I.2.2.- Aditivos | 24 |
| I.3.- Equipo de Cementación | 39 |
| I.3.1.- Equipo sub-superficial | 39 |
| I.3.2.- Equipo superficial | 52 |
| CAPITULO II.- | |
| Factores que se deben considerar en el Diseño de la lechada de cemento: | 56 |
| II.1.- Densidad ✓ | 58 |
| II.2.- Pérdida de Agua ✓ | 58 |
| II.3.- Tiempo de Espesamiento ✓ | 59 |
| II.4.- Viscosidad ✓ | 62 |
| II.5.- Resistencia a la Compresión ✓ | 65 |
| II.6.- Agua libre ✓ | 67 |
| II.7.- Consistencia ✓ | 68 |
| II.8.- Cálculo de la densidad de una lechada ✓ | 71 |
| CAPITULO III.- | |
| Acondicionamiento del Pozo y del Lodo de Per- foración: | 74 |
| Formulación de Programas | 75 |
| III.1.- Colocación de la Tubería de Revestimiento | 80 |
| III.2.- Programa de circulación | 93 |
| CAPITULO IV.- | |
| Diseño de la Cementación | 104 |
| IV.1.- Técnica de Cementación Primaria Convencio- nal Bajo un Régimen de Flujo Turbulento | 106 |
| IV.2.- Técnica de Cementación Primaria Conven- cional Bajo Régimen de Flujo Laminar | 116 |
| IV.3.- Técnica de Cementación Primaria por Etapas | 117 |

| | PAG. |
|---|------|
| CONCLUSIONES | 119 |
| NOMENCLATURA | 121 |
| BIBLIOGRAFIA | 122 |
| APENDICE I.- | |
| DETERMINACION DEL INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO (n') Y DEL INDICE DE CONSISTENCIA (k') | 123 |

INTRODUCCION

La cementación primaria de tuberías de revestimiento en pozos petroleros es una operación cuya importancia es indiscutible, ya que ello es base primordial, para llegar hasta la formación productora en las condiciones más favorables para la perforación, toda vez que constituye un medio indispensable de control del pozo. Esta operación se efectúa -- prácticamente desde la iniciación de la perforación, puesto que es necesario cementar una tubería para colocar las instalaciones superficiales del pozo. Durante la perforación se cementan tuberías intermedias para aislar formaciones que han provocado problemas. En la terminación del pozo se orienta, fundamentalmente, al control de la producción o inyección de fluidos en las formaciones de interés.

Para obtener resultados satisfactorios, la lechada deberá reunir ciertas características que generalmente no tiene una convencional, por lo que es necesario modificar sus propiedades mediante la adición de productos químicos con funciones específicas, siendo necesario conocer su comportamiento cuando se dosifiquen en forma variable, para obtener una que reúna las propiedades deseadas; las características que debe reunir una lechada de cemento se determinan con base en la información obtenida del pozo, a partir de la cual se definen los materiales que deben intervenir y las proporciones óptimas de ellas. Deberá diseñarse con anticipación a la operación una mezcla inicial en la que intervengan las proporciones que dice la práctica y especificaciones del fabricante, sometiéndola a pruebas de laboratorio para comprobar su comportamiento y remediar cualquier divergencia con las

condiciones requeridas; ya que, la intervención simultánea de los aditivos puede ocasionar efectos que conduzcan la lechada a un comportamiento indeseado, ya sea, entre otras cosas, aumentando el tiempo de fraguado a valores imprácticos o reduciendo excesivamente su viscosidad.

Se presentan, además, algunos gráficos necesarios para la determinación de factores que intervienen en los cálculos.

Se analizan las condiciones que deben satisfacer la lechada de cemento, el lodo de perforación y el pozo, para propiciar una buena cementación.

En el desarrollo de este trabajo, cuando se habla del equipo de cementación sección I.3 no se pretende llevar a cabo una completa descripción del mismo, sino más bien identificar sus funciones, usos y principios de operación.

Este breve estudio se dirigió hacia el establecimiento de una secuencia de cálculo simplificada para diseñar una cementación primaria. La secuela de cálculo aquí presentada es fácil de procesar con una regla de cálculo.

Los resultados que se obtienen de la aplicación del procedimiento son: la potencia requerida del equipo de bombeo, la presión máxima que se ejercerá sobre las formaciones de interés durante la colocación de la lechada, el gasto de desplazamiento, el volumen de la lechada de cemento y el tiempo de desplazamiento.

Una cementación primaria puede efectuarse según cualquiera de las técnicas siguientes: convencional, o en una sola etapa, bajo régimen de flujo turbulento; convencional bajo régimen de flujo laminar; y por etapas, que a su vez puede ser bajo régimen turbulento o laminar. Estas técnicas fueron ana

lizadas, presentándose el procedimiento de diseño para cada una de ellas.

También se incluye un procedimiento de cálculo para cuantificar las presiones que surgen en el fondo del pozo, como resultado del movimiento de la tubería y fluidos dentro del agujero, así como una solución gráfica, que sirve para determinar el tiempo mínimo de introducción, por tramo de tubería de revestimiento, requerido para evitar dañar las formaciones.*

En ciertas ocasiones se utilizaron los sistemas de unidades Métrico e Inglés por ser los que más se usan en esta rama de Ingeniería

El daño a las formaciones ocurre debido a las presiones que se desarrollan en el fondo del pozo, como consecuencia del movimiento de la tubería y fluidos dentro del agujero.

GENERALIDADES

A) OBJETIVOS.- Los objetivos básicos que se persiguen al cementar una tubería de revestimiento son varios, pudiendo anotar los siguientes:

1. PREVENCION DE DERRUMBES.- Durante la perforación la presión que el lodo ejerce sobre las paredes del pozo generalmente basta para detener las formaciones suaves evitando que se derrumben y atrapen la herramienta de perforación, sin embargo al aumentar la profundidad es necesario contar con un apoyo más firme para contener las formaciones deleznablees.

2. AISLAMIENTO DE ZONAS PERMEABLES.- El cemento actúa como un sello entre las tuberías y las paredes del agujero, evitando la migración de fluidos de una a otra zona o hacia la superficie.

3. CONTROL DEL POZO.- Ofrecen un apoyo seguro para instalar el equipo de control en la cabeza del pozo, ayudando a -

prevenir los reventones.

4. PROTECCION A LAS ZONAS PRODUCTORAS.- Es necesario evitar la contaminación de zonas productoras con agua, gas o fluidos de perforación, o que el gas se pierda en formaciones superiores de baja presión, disminuyendo la energía del yacimiento.

B) CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES.- La mayoría de las dificultades que se presentan en la cementación de tuberías de revestimiento de pozos, se deben al desconocimiento de las siguientes características de las formaciones expuestas en el agujero.

a.- Presión de los fluidos

b.- Permeabilidad

c.- Presencia de fracturas naturales o inducidas cuando se corren las tuberías de perforación o de revestimiento.

d.- Presión de fracturamiento.

Formaciones con baja presión, alta permeabilidad o fracturadas pueden provocar intensa deshidratación en la lechada de cemento que para condiciones extremas significa incrementar su densidad, reducir su bombeabilidad, disminuir el área efectiva del espacio anular e incrementar las pérdidas de presión por fricción. En consecuencia se aumenta el riesgo de perder circulación. Por otra parte, si durante la colocación de la lechada de cemento se excede la presión de fractura de una formación, parte o toda la lechada se perderá. Por lo tanto, es importante conocer las características de las formaciones antes mencionadas, a fin de tomar medidas tendientes a evitar los efectos aludidos.

La máxima presión que se alcance durante una cementación, deberá ser siempre menor que la presión de fractura de las -

formaciones expuestas en el agujero, de otra manera se inducirán pérdidas de fluido y circulación.

Comúnmente, la presión de fractura de una formación se relaciona con su profundidad, expresándola como un gradiente de presión de fracturamiento que es fácil de comparar con el gradiente de diseño de la cementación.

El gradiente de fracturamiento de las formaciones en un campo, no varía substancialmente. Su valor se estima a partir de:

- a.- Las presiones de ruptura registradas en las estimaciones.
- b.- Las presiones de ruptura alcanzadas en las cementaciones forzadas.
- c.- El gradiente del lodo cuando se presentan pérdidas de circulación durante la perforación.

Cuando no se aplique ninguno de los criterios anteriores, la presión de fractura puede obtenerse a partir de la ecuación siguiente, desarrolladas para rocas sedimentarias que yacen a profundidades mayores de 1000 m. (1) (3.281 pies)

$$P_f = \rho_r D \frac{2u}{1-u} + st \dots\dots\dots (1)$$

Para rocas comprendidas entre 1000 y 3000 m. (3281 y 9800 pies) de profundidad, el módulo de Poisson (u) varía de 0.18 a 0.27, la densidad (ρ_r) de 2 a 2.6 gr/cm³ y el esfuerzo de tensión (st) de (st) de 14 a 70Kg/cm². Tomando valores medios de cada uno de esos parámetros: u = 0.225, $\rho_r = 2.3$ gr/cm³ y st = 42 Kg/cm² y substituyendo en la ecuación (1) se obtiene:

$$f = 0.1334 D + 42 \dots\dots\dots (2)$$

Esta ecuación se representa gráficamente en la figura 1, observándose que para una profundidad dada, las presiones de cementación deben mantenerse inferiores a la presión de fractura correspondiente.

* Referencia al final

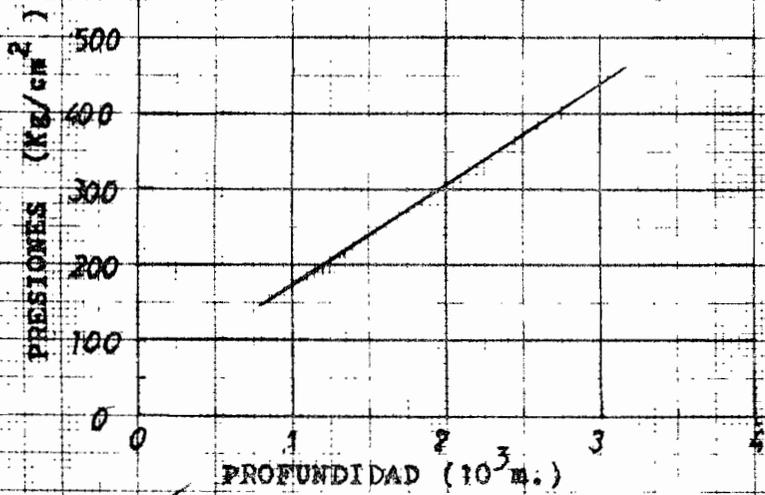


FIG. 1.- GRAFICO PARA DETERMINAR LA PRESION NECESARIA PARA INDUCIR FRACTURAS VERTICALES EN FORMACIONES QUE YACEN A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1000m.

C) HISTORIA.- Desde el nacimiento de la Industria petrolera uno de los problemas más graves que se han tenido al perforar y producir los pozos petroleros, ha sido el flujo de agua al pozo ya sea del mismo horizonte productor o proveniente de acuíferos de formaciones superiores.

Los primeros pozos no tenían tubería de revestimiento o conductora que atravesase las gravas superficiales, generalmente se usaba un tubo de hierro que se anclaba en la cima de la formación productora. A veces se tenía éxito en el aislamiento del agua, pero al efectuar una reparación había que sacarlo.

En las postrimerías de 1860 se empezó a usar el sistema de 2 tuberías, una de las cuales anclaba en la cima de la arena como tubería de revestimiento permanente y la otra de diámetro más pequeño era introducida hasta el fondo, utilizándose para la extracción del aceite. La tubería permanente de revestimiento fue un gran paso para solucionar el problema del aislamiento, pero su colocación era también un problema en cada pozo. Se ensayaron muchos métodos para asegurar su anclaje ya que se tenían problemas como el derrumbe de lutitas que se humedecían, cavernas que se formaban durante la perforación y dificultaban la introducción de la tubería o bien formaciones muy duras en las cuales se perforaban unos cuantos metros antes de meter la tubería.

John R. Hill patentó en 1871 el método avanzado para aislar los acuíferos encontrados en la perforación de pozos petroleros. En la patente se indicaba que "tan pronto como la perforación hubiese pasado los acuíferos, debería introducirse al pozo suficiente cantidad de cemento hidráulico que endureciese al contacto con el agua". El volumen de este material debía ser tal que sobrepase los niveles de los acuíferos, cuando

do el cemento hubiese endurecido se perforaría el agujero dejando el acuífero obturado con cemento. Este cemento no se usaba en combinación con tuberías.

El uso del cemento Portland junto con tuberías se inició propiamente en 1903 al emplearse la zapata de cementación. En el campo Lompoc en California, Frank F. Hill de la Union Oil Corporation de California mezcló 50 sacos de cemento Portland y lo soltó en el pozo con una cuchara de su diseño antes de sentar la tubería en el fondo. Después de esperar 28 días el fraguado, se perforó el cemento y el pozo quedó productor de aceite sin problemas de agua. Este tipo de cementación se propagó rápidamente y fue aceptado como práctica en todos los campos del área de California donde había dificultades para aislar los acuíferos superiores a la arena productora.

Al finalizar 1905, dos años después de ponerse en práctica el método anterior y al ver que no era todo lo satisfactorio que se esperaba, se procedió a modificarlo, bajando primero la T.R. (tubería de revestimiento) e introduciendo a continuación otra tubería de menor diámetro con un empacador hasta el fondo de la de revestimiento, se bombeaba el cemento, forzando una gran parte de él a subir por atrás de la T.R.; con este método se tenía una mayor probabilidad de obturar el agua y además el tener que perforar mucho cemento, sin embargo, tenía la desventaja de que frecuentemente el empacador se quedaba pegado.

En 1912 Baker inventó su primer cementador o retenedor de cemento. Era un cilindro de hierro fundido, de 30 cm. de longitud, con un sello de hule y con cuñas en la parte superior, tenía además una válvula de contrapresión. El cementador se conectaba en la parte inferior de la tubería de producción o perforación mediante una rosca izquierda y se bajaba hasta el último cople de la T.R., al aplicar tensión al cemen

tador, las cuñas se ajustaban contra la T.R. expandiendo el empaque de hule, después que se había bombeado el cemento, se desenroscaba la T.P. (tubería de producción) y se circulaba el exceso. No se usó ampliamente empleándose solo en casos en que la T.R. no llegaba al fondo. El adelanto más grande fue añadirle juntas de circulación allí por 1927 y además un segundo juego de cuñas en dirección opuestas operadas por presión hidráulica, lo cual hizo más versátil la herramienta.

Almond A. Perkins patentó en 1911 su sistema de dos tapones limpiadores, el primero, hecho en hierro fundido y con unos discos de lona, se enviaba antes de la lechada, hasta el fondo del pozo, saliendo de la zapata de la T.R. El segundo también era de hierro con discos de lona y cuero en la parte superior, servía para desplazar la lechada; entre los dos se colocaba un espaciador de 3 a 5 pies de longitud. Poco tiempo después cambió el hierro fundido por madera, haciéndolas en varios tamaños y en muchas formas. Fundó la primera compañía de cementaciones, dando servicio con bombas de vapor de alta presión, con mezcladores y empleando sus tapones.

Halliburton en 1920 fundó su propia compañía de servicio e introdujo el mezclador tipo jet para cemento así como su medidor de línea de alambre para comprobar la profundidad del tapón. Por esa misma época aparecieron en el mercado los tapones de hule casi en el mismo diseño que tienen actualmente.

En 1922 W.L. McLaine de la General Petroleum Corporation añadió una válvula de contrapresión de hierro fundido a la zapata guía, naciendo la zapata flotadora.

En 1926 Burch con la Barnsdall Oil Company construyó el primer cople flotador. Poco tiempo después Baker con licencia de Mc Laine y Burch incorporó al mecanismo la válvula de plástico.

Kenneth Writh y Bruce Barkis, Ingenieros petroleros, di-

señaron el primer raspador de acción recíprocamente para tubería de revestimiento, corriéndose los primeros raspadores comerciales en un pozo en California en 1939. Su uso se generalizó rápidamente, empleándose de 2 a 4 por cada tubo.

Los centradores no se usaron sino hasta unos 5 o 6 años después, aunque ya en 1930 Irvine, Steps y Hartman patentaron el primer centrador. Al adoptarse su uso surgieron muchos diseños.

Los raspadores rotarios fueron patentados por Carl W. Ristler Jr. y George Cannon, se usaron hasta después de 1946, cuando ya los reciprocantes eran empleados universalmente.

Se progresó también notablemente, en el conocimiento del cemento y su fraguado; durante los primeros 10 años, después de comenzarse a usar el cemento, el tiempo que se esperaba para que fraguara eran 28 días (sólo si se usaba algún acelerante se reducía a 7 días).

En los siguientes 10 años el tiempo de espera se redujo a 21 días llegando a 4 en la siguiente década de 1937 a 1947. Se consideró suficiente esperar solo 72 horas y a partir de 1947 se aprobó un tiempo de 28 a 36 horas.

La necesidad de cementar las tuberías a mayores profundidades y bajo grandes presiones y temperaturas, impulsó la creación de laboratorios de investigación que han desarrollado mejores cementos y nuevos aditivos, ampliando los conocimientos acerca de su comportamiento y perfeccionando nuevas técnicas para cementar con éxito los pozos petroleros.

CAPITULO I

MATERIALES Y EQUIPOS
COMUNMENTE EMPLEADOS

I.1.- TUBERIAS.- El material básico para una cementación de tuberías de revestimiento (T.R.) en un pozo petrolero, es desde luego, la tubería, y como a la vez es el que toma la mayor partída del presupuesto de la operación, se hace necesario dedicarle la mayor atención tanto en su manejo (transporte, estiba, introducción al pozo), como en su diseño (cálculo de la columna según esfuerzos que soporta.)

En los campamentos se almacenan en patios generales para tuberías; de estos patios se transportan al pozo donde se estiban en muelles colocados a un lado de la torre de perforación junto a la rampa de acceso de herramientas.

Allí son revisados y numerados por una cuadrilla de obreros encargados de esa operación, la cual también instala en ellas el equipo sub-superficial (zapatas, coples, centradores y raspadores). Es conveniente que la estiba se haga en no más de 3 o 4 filas de tuberías superpuestas y separadas entre sí por largueros de maderas, o a falta de estos por tramos del cable desechado del malacate de perforación.

También las estibas deberán formarse con tuberías del mismo grado y peso, conforme al orden en que se vayan a entrar al pozo.

Las calidades de acero así como algunas características mecánicas se mencionan en la siguiente tabla

Tabla 1. GRADOS DE T.R. (CASING)

| Grado | Limite Elastico | Elongación de un pedazo de muestra de 2 Pg. | Limite de ruptura |
|-------|---------------------|--|-------------------|
| | Lb/ Pg ² | % Mínimo | P si |
| F-25 | 25000 | 40 | 40000 |
| H-40 | 40000 | 27 | 60000 |
| J-55 | 55000 | 20 | 75000 |
| N-80 | 80000 | 16 | 100000 |
| P-110 | 110000 | 15 | 125000 |
| V-150 | 150000 | Elongación total 0.7 % | |

Las longitudes de las tuberías de revestimiento quedan comprendidos dentro de los siguientes rangos:

Tabla 2. RANGOS Y LONGITUDES DE T.R.

| Rango | Longitud del Rango | Longitud Mínima |
|-------|--------------------|-----------------|
| | Pies | Pies |
| 1 | 16-25 | 18 |
| 2 | 25-34 | 28 |
| 3 | 34 ó más | 36 |

Para el diseño de la columna de tuberías se toman en cuenta principalmente los siguientes esfuerzos: colapso (aplataamiento), tensión y presión interior (reventón). Los factores de seguridad empleados son los siguientes: 1.125 para colapso, 1.8 para tensión y 1.1 para presión interior, todos ellos con respecto a la resistencia mínima de la tubería

1.1.1.- CLASIFICACION.- En una forma amplia se ha tratado de clasificar las tuberías ordenándolas en los siguientes grupos:

1.- TUBERIAS CONDUCTORAS.- Generalmente son de diámetro grande (13 $\frac{3}{8}$ " hasta de 20 pulgadas) y se cementan a una profundidad que varía con la profundidad total a la que se va a perforar un pozo. Su objetivo primordial es servir de ancla para fijar los preventores - principalmente en los pozos de exploración en los que no se desconocen las formaciones que se van a atravesar y se necesita contar con un medio seguro para controlar el pozo en caso de que al seguir perforando y antes de cementar la siguiente tubería se presentan estratos superficiales (someros) con presiones elevadas inesperadas. Otro de sus objetivos es contener las paredes del pozo después de atravesar las formaciones superficiales, integradas por materiales deleznable tales como arenas, gravas, fango, etc., y que generalmente están poco consolidadas.

2.- TUBERIAS SUPERFICIALES.- Su longitud varía de acuerdo con las necesidades específicas de cada campo.

Sirven para proteger el pozo contra derrumbes, filtración, pérdidas de circulación; permitiendo así la perforación del agujero hasta la profundidad deseada, también impiden la contaminación de aguas potables, provenientes de formaciones superficiales y que pudieran utilizarse para usos domésticos. Además como se cementan en toda su longitud proporcionan un apoyo firme para la parte inferior del árbol de válvulas y para los preventores. Generalmente emplean en diámetros de 9 $\frac{5}{8}$ y 10 $\frac{3}{4}$ pulgadas.

3.- TUBERIAS INTERMEDIAS.- En algunas regiones no se coloca la columna intermedia, mientras que en otras se pueden usar una o más columnas. La función principal de la columna intermedia es la de proteger el pozo. Es decir, evitar que la pared del pozo se derrumbe, y así eliminar problemas en perforar a mayor profundidad. La columna intermedia con su cementación se usa para sellar formaciones como las zonas de agua a alta presión o aquellas en que ha habido pérdida de lodo de circulación y en las que no puede perforarse económicamente usando aditivos de lodo. Algunas veces esta columna se usa para sellar ciertas zonas que contienen fluidos altamente corrosivos, en las que no es posible sellar la formación con cemento por el método de etapas múltiples de la columna de producción. Ocasionalmente, las formaciones salinas o de anhidritas pueden contaminar el lodo a tal grado que es necesario asentar y cementar una columna intermedia antes de perforar a mayor profundidad. Esta columna con su cementación se usa para sellar zonas antiguas de producción en las que se perforan nuevos pozos a mayor profundidad.

4.- TUBERIAS DE EXPLOTACION.- Reciben este nombre porque generalmente se llevan hasta la zona o zonas productoras y son las más importantes en cualquier pozo.

Su objetivo es aislar las diferentes formaciones productoras, excluir las zonas de gas o agua que pudiesen afectar -

la producción e impedir la migración de fluidos a los estratos superiores al horizonte productor. Al cementar estas tuberías se procura cubrir con cemento todas las formaciones que hayan presentado manifestaciones de gas o aceite. El diámetro más utilizado es el de 6 ⁵/₈ pulgadas, aunque también se emplean de 5 ¹/₂ y 7 pulgadas.

Hay instalaciones especiales de la tubería de explotación en la que no se necesita una columna completa (liner). Por ejemplo, cuando la tubería intermedia puede asentarse a 8.000 (ocho mil) pies y la formación debe de producir a doce mil (12000) pies, la columna de explotación puede asentarse en la profundidad total extendiéndose solo de cien (100) a trescientos (300) pies encima de la zapata de la columna intermedia. En este caso, la columna de producción consistirá de un liner de 4300 (cuatro mil trescientos) pies asentada al fondo, y de ocho mil (8000) pies de tubería intermedia. Este procedimiento no es una regla, pero en algunos casos se ha usado con buenos resultados.

I.2. CEMENTOS Y ADITIVOS

I.2.1.- CEMENTOS

1.- HISTORIA Y DESARROLLO

a.- CEMENTO NATURAL.- La historia del cemento se remota a los tiempos en que el hombre empezó a usar arcilla aglutinante para mantener las piedras juntas. Al examinar los monumentos de épocas remotas se advierte que ya hace millares de años se utiliza cemento de uno u otro tipo. Los egipcios emplearon una mezcla de yeso calcinado impuro o sal hidráulica con arena u otros materiales para hacer morteros y ligar los grandes bloques de piedra de las pirámides construidas a lo largo del Nilo. Posteriormente durante los períodos griegos y romanos, se desarrollaron los cementos hidráulicos, usando mezcla de varias tierras volcánicas, calizas y otros mate-

riales naturales. Al ser calcinados y mezclados con agua, esos materiales producen un mortero que puede fraguar igualmente en el aire o dentro del agua.

En 1756, Juan Smeaton, Ingeniero Inglés, hizo un concienzudo estudio del cemento, con motivo de la construcción del faro Edystone, cuya obra dirigía. Llegó a la conclusión que las mejores sustancias para hacer cemento hidráulico eran ciertos tipos de piedras calizas con un alto porcentaje de arcilla.

b.- CEMENTO PORTLAND.- La creación del primer cemento Portland es acreditada a la investigación hecha por ingenieros y científicos europeos que culminó en una patente inglesa otorgada en 1824 a José Aspdin. Lo hizo calcinando en un horno una parte de arcilla y tres partes de piedra caliza y moliendo después el producto hasta convertirlo en fino polvo. Le dio el nombre de Portland a causa de su semejanza con una piedra que se obtenía de la isla de Portland. Desde entonces el término "Cemento Portland" ha venido siendo aplicado a cementos hechos por calcinación de mezclas adecuadas de calizas, aluminatos y silicatos.

El cemento Portland que conocemos en la actualidad, es el mismo que en, la época de Aspdin, sin embargo, los procedimientos de fabricación han sido tremendamente mejorados y se tiene un mejor conocimiento de la química con su producción y uso.

2.- MANUFACTURA

a.- DISCUSION GENERAL.- El proceso de elaboración es largo y bastante complicado. El cemento Portland es manufacturado por calentamiento a una mezcla específica de piedras calizas y arcillas. Esta mezcla finamente pulverizada se calienta a temperaturas tan altas que parcialmente se funde transformándose en un producto llamado "Clinker*". Este clinker se -

* Escoria de cemento

deja enfriar y después se muele hasta reducirlo a un polvo finísimo.

La mezcla de materiales introducidas en el horno es controlada para asegurar la correcta proporción de cada componente, y la temperatura del horno es conservada dentro de límites precisos. El clinker resultante es molido entre un rango específico de tamaño de partículas.

b.- COMPOSICION QUIMICA.- Los componentes esenciales del cemento Portland terminado son: Oxido de Aluminio (Al_2O_3), Oxido férrico (Fe_2O_3) y Dioxido de Silicio (SiO_2). Estos componentes se encuentran combinados en la siguiente forma:

Silicato Tricálcico ($3 CaO \cdot SiO_2$) que es el principal contribuidor para la resistencia en todas las etapas pero particularmente durante las primeras etapas de cura (arriba de los 28 días). El promedio de Silicato Tricálcico contenido es de un 45 a 65% con un máximo de 67% para cementos de alta resistencia inicial.

Silicato Dicálcico ($2 CaO \cdot SiO_2$) hidrata muy lentamente y es el componente que produce resistencia a largo plazo. El promedio de Silicato Dicálcico contenido es de 25 a 35% pero ha sido lento para hidratar y no tiene efecto en el tiempo de fraguado.

Aluminato Tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$) hidrata rápidamente y contribuye principalmente a el calor de hidratación, esta contribución ha sido cerca de 2cal/gr de cemento durante tres días por cada por ciento del compuesto presente. En un menor grado también contribuye a la resistencia y produce esa proporción de cemento que es más fácilmente atacada por las aguas sulfatadas. Las especificaciones A.P.I. permiten un máximo de 15% de Aluminato Tricálcico para tipos regulares de cemento de alta resistencia inicial y 3% para cementos resistentes a los sulfatos.

El fraguado rápido producido por este compuesto es controlado por la adición de cantidades convenientes de yeso ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) como un retardador.

Aluminato Férrico Tetracálcico $4(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ tiene un pequeño efecto sobre las propiedades físicas del cemento.

Cantidades pequeñas de óxidos de Sodio, Potasio, Magnesio, hierro, etc. son también agregados en cantidades no mayores del 5%.

c.- FRAGUADO.- Cuando los componentes del cemento se mezclan con agua, son sometidos a un proceso de hidratación y recristalización, del cual resulta un producto sólido. Antes de que esto ocurra, la lechada es bombeable pero al ir fraguando, ciertos componentes cristalizan endureciéndola. Este endurecimiento tiene lugar en un período de años (fraguado final) sin embargo puede empezar a endurecer en unas pocas horas (fraguado inicial).

El fraguado rápido o lento del cemento puede ser regulado mediante el control, durante su fabricación del grano de finura de la molienda. El tiempo de fraguado también puede ser variado por la adición conveniente de productos químicos al cemento seco o mezclándolos con el agua. El cloruro de Calcio - por ejemplo, se usa frecuentemente para acelerar el tiempo de fraguado, mientras que el yeso sin calcinar para retardar este tiempo. Con un cemento dado el tiempo de fraguado puede ser acortado o alargado, variando la cantidad de agua con que se mezcla; en estos casos los tiempos pueden ser proporcionados a la profundidad, temperaturas y presiones de fondo específicas de cada pozo.

3.- CLASIFICACION.- El cemento Portland es manufacturado para construcciones y usos industriales en conformidad con especificaciones dadas por la American Society for Testing Material (A.S.T.M), la cual establece tres tipos:

Cemento Portland de alta resistencia inicial.

Cemento Portland común

Cemento Portland de fraguado lento.

El amplio rango de condiciones encontradas en diferentes pozos petroleros ha requerido el desarrollo de cementos especiales con variedad en el tiempo de endurecimiento. Debido a que el fraguado se acelera al incrementarse la presión y la temperatura en pozos profundos el cemento debe ser modificado para obtener un fraguado más lento.

En pozos en que se necesita continuar lo más rápidamente posible la perforación, a fin de disminuir los tiempos de espera del equipo, se puede usar un cemento con alta resistencia inicial o de fraguado rápido.

Los sulfatos presentes en el agua de muchas formaciones subterráneas, atacan el cemento disolviendo la cal, esto provoca un debilitamiento y un incremento en la permeabilidad del cemento. Para contrarrestar este efecto, se pueden usar cementos tratados para darle alta resistencia a los sulfatos. Un método para clasificar los diferentes tipos y calidades de cementos para pozos petroleros ha sido desarrollado por el Instituto Americano del Petróleo (A.P.I.) La clasificación A.P.I. standard 10A incluye las siguientes clases de cemento Portland en el cual se sugieren las profundidades máximas a que deben usarse. Sin embargo, estas profundidades deben ser tomadas únicamente como valores aproximados, ya que se basan en experimentos de laboratorio, basados en las condiciones impuestas por las pruebas de simulación, a condiciones de pozo, de la cementación de la tubería de revestimiento.

CLASE A: Recomendado para emplearse desde la superficie hasta 1830 m. (6000 ft.) de profundidad cuando no se requieren propiedades especiales. Disponible únicamente en el tipo ordinario (similar al cemento tipo

1, A.S.T.M. C-150).

CLASE B: Para usarse hasta 1830 m (6000 ft) de profundidad. Disponible en dos tipos: tipo regular (similar al A.S.T.M. C 150 tipo II) para condiciones que requieren moderada resistencia a los sulfatos, y en el tipo con alta resistencia a los sulfatos.

CLASE C: Recomendado para usarse hasta 1830 m (6000 ft) de profundidad cuando se desea alta resistencia inicial. Disponible en el tipo regular (similar al A.S. T.M. C 150, tipo III) y el tipo de alta resistencia a los sulfatos.

CLASE D: Recomendado para emplearse de 1800 a 3050 m (de 6000 a 10000 ft) de profundidad bajo condiciones y temperatura moderadas. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

CLASE E: Recomendado para emplearse de 3050 a 4270 m (10000 a 14000 ft) de profundidad bajo condiciones de altas presiones y temperaturas. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

CLASE F: Recomendado para emplearse de 3050 a 4880 m (de 10000 a 16000 ft) de profundidad bajo condiciones de presiones y temperaturas extremadamente grandes. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

CLASE G: Recomendado para emplearse como un cemento básico desde la superficie hasta 2440 m (8000 ft) de profundidad. Puede emplearse con retardadores o aceleradores en un gran rango de profundidad y temperaturas. No se le adiciona otra cosa más que el Ca SO_4 o agua, o ambos, al mezclarse con el alinker durante su manufactura. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

CLASE H: Recomendado para emplearse como un cemento básico - desde la superficie hasta 2440 m (8000 ft) de profundidad. Puede emplearse con retardadores o aceleradores en un gran rango de profundidades y temperaturas. No se le adiciona otra cosa que sulfato de calcio o agua, o ambos al clinker durante su manufactura. Disponible solamente en el tipo de moderada resistencia a los sulfatos.

TIPOS DE CEMENTOS ESPECIALES

Numerosos tipos de cementos especiales están también en uso común. Algunos de los más importantes de estos son:

1.- **CEMENTOS PUZZOLANICOS.**- Cementos Puzzolánicos fueron usados extensamente por los constructores griegos y romanos y en este continente por la antigua civilización Azteca. Uno de los principales yacimientos se encuentra en Pozzuoli, Italia, de donde se ha derivado su nombre.

Este material es una ceniza volcánica altamente silicosa, que no posee en si misma cualidades cementantes, sin embargo, sus constituyentes al combinarse con cal Ca(OH)_2 en presencia de agua a temperaturas ordinarias forman compuestos estables e insolubles que si poseen propiedades cementantes. La hidratación del cemento Portland libera cantidades considerables de hidróxido de calcio, quedando este disponible para reaccionar con el material puzzolánico. El resultado de mezclas cemento-puzzolan es un producto fraguado más durable e impermeable. El puzzolan puede ser usado como un aditivo para un cemento ordinario o preparado como una cal puzzolan sin mezclarlo con el cemento tipo portland.

Hay dos tipos de puzzolanas: natural o escoria (origen volcánico) y sintético. Una forma común de los más recientes puzzolan sintético es el llamado Fly Ash (ceniza muy fina) - producido en plantas de fuerza que queman carbón, son usados

extensamente como aditivos en cementos de pozos de aceite. - Los pozzolans tienen gravedades específicas de 2.3 a 2.8, dependiendo de la fuente. Cemento Cal-Pozzolan ha prbado ser un cemento satisfactorio en pozos profundos.

Estos materiales se mezclan generalmente en proporción de 50 a 50 con cemento Portland común. La mezcla resultante puede acelerarse de igual forma que el cemento solo, reduci~~do~~do el tiempo de espera del fraguado, o bien retardándose para ser usados en pozos profundos.

Las ventajas de las mezclas de pozzolan-cemento clase A ApI son:

- a.- Reduce la pérdida de fluido
- b.- Incrementa el tiempo de bombeabilidad
- c.- Baja calor de hidratación
- d.- Mejores características para la perforación (a bala o a chorro)
- e.- Mayor resistencia al ataque de los sulfatos
- f.- Menor densidad, viscosidad y permeabilidad.
- g.- Incrementa la resistencia final a altas temperaturas
- h.- Menor costo de la cementación por producir lechadas de mayor rendimiento y más ligeras.

2.- SISTEMAS DE CEMENTOS DIACEL.- Esta designación se refiere a sistemas de cementos modificados por uno o más aditivos tales como Diacel D, LWL y A¹. Tales cementos tienen un amplio rango de densidad y tiempos de espesamientos, que les dan un amplio rango (aleance) de aplicabilidad. Arena fina (95% a través de 200 mallas) es algunas veces añadida para incrementar la resistencia inicial de la mezcla.

3.- CEMENTO LATEX.- Este es un cemento especial compuesto de latex*, cemento, surfactantes (agente de superficie activo), y agua. Ha probado ser útil en aplicaciones especializadas.

* Suspensión coloidal o emulsión de materiales orgánicos. - Ciertos latexes son a veces usados como...

extensamente como aditivos en cementos de pozos de aceite. - Los pozzolans tienen gravedades específicas de 2.3 a 2.8, dependiendo de la fuente. Cemento Cal-Pozzolan ha prbado ser - un cemento satisfactorio en pozos profundos.

Estos materiales se mezclan generalmente en proporción - de 50 a 50 con cemento Portland común. La mezcla resultante puede acelerarse de igual forma que el cemento solo, reducido el tiempo de espera del fraguado, o bien retardándose para ser usados en pozos profundos.

Las ventajas de las mezclas de pozzolan-cemento clase A Apl son:

- a.- Reduce la pérdida de fluido
- b.- Incrementa el tiempo de bombeabilidad
- c.- Baja calor de hidratación
- d.- Mejores características para la perforación (a bala o a chorro)
- e.- Mayor resistencia al ataque de los sulfatos
- f.- Menor densidad, viscosidad y permeabilidad.
- g.- Incrementa la resistencia final a altas temperaturas
- h.- Menor costo de la cementación por producir lechadas de mayor rendimiento y más ligeras.

2.- SISTEMAS DE CEMENTOS DIACEL.- Esta designación se refiere a sistemas de cementos modificados por uno o más aditivos tales como Diacel D, LWL y A¹. Tales cementos tienen un - amplio rango de densidad y tiempos de espesamiento, que les dan un amplio rango (aleance) de aplicabilidad. Arena fina - (95% a través de 200 mallas) es algunas veces añadida para incrementar la resistencia inicial de la mezcla.

3.- CEMENTO LATEX.- Este es un cemento especial compuesto de latex*, cemento, surfactantes (agente de superficie activo), y agua. Ha probado ser útil en aplicaciones especial-
* Suspensión coloidal o emulsión de materiales orgánicos. -
Ciertos latexes son a veces usados como aditivos de cementos.

les tales como trabajos de taponamientos para exclusiones de agua. Es especialmente resistente a contaminarse con aceite y/o lodo y exhibe una gran resistencia en el ligamiento con otros materiales (casing, rocas, etc). Lechadas con Latex-cemento tienen una baja pérdida de fluidos y tienden a resistir la contaminación por los fluidos del pozo.

4.-CEMENTOS DIESEL-OIL (DOC).- Mezclas de cemento portland, diesel oil (o kerosene), y un dispersante químico han sido útilmente establecidos en trabajos de reparación de pozos para sellar estratos que conducen agua. Este material no fragua hasta ponerse en contacto con el agua y tiene, además un tiempo ilimitado de bombeabilidad. También ha sido usado para prevenir pérdidas de circulación.

5.- EMULSIONES DE CEMENTOS ACEITE-EN-AGUA.- Cementos de baja densidad, baja pérdida de agua de adecuada resistencia y tiempo de espesamiento han sido preparados de la kerosene, agua, cemento y 2 a 4% de bentonita. Calcio lignosulfonado es usado como agente emulsificador y retardador. Tales cementos tienen aplicación en cementaciones primarias y reparación.

6.- CEMENTOS RESINOSOS.- Apropriadas combinaciones de resinas sintéticas, agua y cemento portland son a menudo usadas para proporcionar un mejor ligamiento entre formación-cemento en ciertas operaciones de reparación. Costos prohibitivos impiden usar este material en cementaciones rutinarias de casing (tuberías de revestimiento).

7.- CEMENTOS DE YESO.- Estas son mezclas especiales que tienen alta resistencia inicial y fácilmente controlables los tiempos de fraguado. El yeso es el ingrediente básico. Su uso principal es proporcionar tapones temporales durante pruebas y trabajos de reparación. La resistencia de este producto más de 2000 psi dentro de 2 horas después de ser mezclado. El cemento de yeso es también usado en combinación con el ce-

mento portland para acelerar el tiempo de fraguado.

La selección del cemento apropiado para un trabajo específico es una materia de conjetura y diferencias de opinión - existen entre los operadores del petróleo. En pozos muy profundos, altas temperaturas una mezcla especial puede ser hecha para un trabajo particular. Para pozos poco profundos, - temperatura moderada un ejemplar de los tipos de cementos an tes mencionados puede ser satisfactoria y la selección depen derá del costo y la preferencia personal basada en la experien cia.

¹ DIACEL D: tierra de diatomea especial. La función de - esta es reducir la densidad.

DIACEL A: silicato de sodio especial. Acelera el tiem po de fraguado.

DIACEL LWL: carboxy metil hidroxyetil celulosa calcio lig nosulfonado. Retardador, dispersante, emul- sificador.

I.2.2.- ADITIVOS. - Los aditivos tiene por finalidad mo dificar las propiedades de las lechadas de cemento a fin de - resolver problemas específicos presentes en algunos pozos. - Sin embargo, su uso requiere un control riguroso, porque modi ficar alguna propiedad en particular puede alterar otras, ta- les como resistencia a la compresión, viscosidad, pérdida de agua, etc. (3) La mayor parte de los aditivos están como pol vos sueltos que pueden ser mezclados en plantas para obtener distribución uniforme. Casi todos los aditivos pueden ser u- sados en mezclas de agua si las facilidades de las plantas mez cladoras no están disponibles. La mayor parte de los operado- res usan algún tipo de aditivo en el cemento, usualmente pa- ra uno o más de los siguientes propósitos:

- a.- Reducir o incrementar la densidad
- b.- Incrementar el volumen a reducida unidad de costo.
- c.- Acelerar o retardar el tiempo de fraguado.
- d.- Incrementar la resistencia
- e.- Incrementar o mejorar la durabilidad
- f.- Disminuir la pérdida de agua.
- g.- Prevenir la formación de puentes por pérdidas de circulación.

A continuación se presentan unas tablas en las que se analizan algunas propiedades del cemento.

TABLA 3.0. Muestra el efecto de algunos aditivos sobre las propiedades físicas del cemento.⁽¹⁾

| | | Bentonita | Perlita | Tierra de diatomeas | P. Uzzolán | Arena | Barita | Arsenoferrita | Cloruro de calcio | Cloruro de sodio** | Lignosulfonatos CMHEC (a) | Diesel Oil | Materiales de baja pérdida de agua | Materiales para el control de pérdida de circulación | Carbón activado |
|----------------------------|------------|-----------|---------|---------------------|------------|-------|--------|---------------|-------------------|--------------------|------------------------------|------------|---------------------------------------|---|-----------------|
| Densidad | Decrece | + | + | + | M | | | | | | | | | | |
| | Incrementa | | | | | + | + | + | M | M | M | | | | |
| Requerimien to de agua. | Decrece | | | | | | | | | | + | | | | |
| | Incrementa | + | M | + | X | X | M | M | | | | | | | M |
| Viscosidad | Decrece | | | | | | | | M | | | | | | |
| | Incrementa | X | M | X | X | X | M | M | | | + | | | | M |
| Tiempo de Espesamiento | Decrece | | | X | | | | | | | | | | | |
| | Incrementa | X | | | | | X | X | + | + | + | X | | | |
| Tiempo de Fraguado | Decrece | X | X | X | X | | | | | | | | | | |
| | Incrementa | | | | | | X | X | + | + | + | | M | | |
| Resistencia Inicial | Decrece | X | X | X | X | | | | | | | | | | |
| | Incrementa | | | | | | | | | | | | | | |
| Resistencia Final | Decrece | X | X | + | X | | X | | | | + | | | M | M |
| | Incrementa | | | | | | | | | | | | | | |
| Durabilidad | Decrece | X | X | X | | | | | | | | X | | | M |
| | Incrementa | | | | + | | | | | | | | | | M |
| Pérdida de agua | | + | | | | | | | | | X | + | X | + | M |
| | | | X | X | | | | | | | | | | | |

+ Un menor efecto es denotado por x; + denota mayor efecto y/o el propósito principal para lo cual el aditivo es usado.

** Pequeños porcentajes de cloruro de sodio aceleran el espesamiento, grandes porcentajes pueden retardar el cemento API clase A.

(a) Carboximetil hidroxietil celulosa

TABLA 4.- Resistencia a la compresión para cementos

Clases: A, B, C, D, E, F y G

(De: Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Junio, 1969).

| CEDULA N ^o | Curado a: Presión Kg/cm ² | T ^o C | Resistencia mínima a la compresión en Kg/cm ² para cementos clase: | | | | | | |
|--------------------------|--|------------------|---|------|-------|-------|-------|------|-------|
| | | | A | B | C | D | E | F | G |
| | | | E N 8 H O R A S | | | | | | |
| -- | atm. | 37.7 | 17.6 | 14.1 | 21.1 | -- | -- | -- | -- |
| 15 | 55.9 | 35.0 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 21.6 |
| 35 | 209.8 | 60.0 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 106.0 |
| 65 | 209.8 | 110.0 | -- | -- | -- | 35.5 | -- | -- | -- |
| 85 | 209.8 | 143.0 | -- | -- | -- | -- | 35.5 | -- | -- |
| 95 | 209.8 | 160.0 | -- | -- | -- | -- | -- | 35.5 | -- |
| | | | E N 24 H O R A S | | | | | | |
| -- | atm. | 37.0 | 126 | 106 | 140.6 | -- | -- | -- | -- |
| 45 | 209.8 | 76.7 | -- | -- | -- | 70.3 | 70.3 | -- | -- |
| 65 | 209.8 | 110.0 | -- | -- | -- | 140.6 | -- | 70.3 | -- |
| 85 | 209.8 | 143.3 | -- | -- | -- | -- | 140.6 | -- | -- |
| 95 | 209.8 | 160.0 | -- | -- | -- | -- | -- | 70.3 | -- |

* Datos obtenidos a partir de pruebas llevadas a cabo reproduciendo las condiciones correspondientes a las especificaciones A.P.I. (cédulas), mostradas en la primera columna. Se cuenta con una serie de aditivos, que según su función podemos clasificarlos en la siguiente forma:

- 1.- Aceleradores de fraguado
- 2.- Retardadores de fraguado
- 3.- Materiales para reducir el peso.

4.- Materiales para aumentar el peso.

5.- Reductores de fricción y de pérdidas de fluido.

1.- ACELERADORES DE FRAGUADO.- Como su nombre lo indica se utilizan para reducir el tiempo de espera del fraguado. Se usan principalmente en las cementaciones de tuberías de revestimiento conductoras y tapones de fondo a poca profundidad en donde se desea continuar las operaciones normales lo antes posibles. Ellos son generalmente usados en pozos que tienen temperaturas de fondo inferior a los 125^oF. Los productos más usados son:

COLORURO DE CALCIO.- Es el producto más usado debido a su efectividad, bajo costo y fácil obtención; este es disponible en grado regular 77% o como anhídrido 96% de grado. Normalmente se añade en proporción del 2.0% del grado regular o 1.6 % de anhídrido por saco de cemento, se logra apresurar el tiempo de espesamiento, acelerando el fraguado e incrementando la resistencia inicial. Se ha observado que 1.6 a 3.0% máximo de cloruro de calcio duplica aproximadamente la resistencia de un cemento portland standard, bajo temperaturas inferiores de 125^oF (50^oC) a las 24 horas. Si se incrementa el porcentaje de cloruro de calcio no se obtiene un mayor beneficio pudiendo actuar inclusive como retardante.

COLORURO DE SODIO. (sal común).- Este acelerante en concentraciones bajas acelera el tiempo de fraguado, pero actúa como un acelerador en concentraciones altas. Dos a cuatro por ciento produce el efecto máximo de aceleración en el tiempo de espesamiento de cementos clase A, B, y C A.P.I. El efecto de la sal común o cloruro de calcio varía con cada clase de cemento A.P.I. y calidad.

Se ha utilizado por muchos años para obtener adherencia en secciones masivas de sal, en las que las lechadas de agua dulce disuelven la interfase sal-cemento produciendo canaliza

ción. Se utilizó inicialmente (en México) para mejorar la adherencia frente a lutitas, en las que el contacto con el agua produce desintegración de las arcillas.

Las proporciones iniciales fueron de saturación del agua de mezclado. Análisis de laboratorio posteriormente indicaron que puede obtenerse óptima inhibición de las arcillas con el 18% de cloruro de sodio mejorando notablemente las características reológicas de la lechada y la resistencia a la compresión del cemento fraguado. La aplicación de este criterio ha mejorado notablemente las cementaciones primarias, en pozos en los que la columna atravesada está constituida por grandes espesores de lutitas, que dificultan la obtención de adherencia satisfactoria y desarrollo de areniscas arcillosas fácilmente dañables por el agua dulce de las lechadas convencionales.

El cloruro de sodio es compatible con todos los aditivos utilizados en los cementos modificados, si bien afecta a los reductores de pérdidas de fluidos, el problema se soluciona con el incremento del aditivo. Las ventajas que presenta el cloruro de sodio son las siguientes:

- a.- Protege las formaciones productoras, evitando la hidratación de las arcillas del cementante.
- b.- En relaciones mayores del 10%, retarda moderadamente el fraguado del cemento. La retardación es suficiente para colocar con toda seguridad, una lechada de cemento saturado de sal a 3.000 m. (10000 ft) y 110°C
- c.- Los cementos con cloruro de sodio presentan mayor expansión que los cementos normales. Un cemento normal tipo "A" tiene a los 28 días y 30°C una expansión lineal de 0.045% mientras que la del cemento saturado de sal es de 0.17%. Esta propiedad mejora la adherencia evitando la existencia de microanulares.

d.- La sal actúa como dispersante mejorando las propiedades reológicas de la lechada, reduciendo el gasto y la potencia para desplazar un flujo turbulento.

e.- Incrementa ligeramente la densidad y el volumen de la lechada. En condiciones de saturación, la densificación es del orden de 0.1 gr/c.c.

El cloruro de sodio debe mezclarse en polvo con el cemento para evitar la formación de espuma. Si no es posible hacerlo, podrá disolverse en el agua agregando un antiespumante.

CEMENTOS DENSIFICADOS.- Lechadas (de baja relación de agua) tienen una aplicación particular para tapones donde son necesarios una elevada resistencia inicial y un tiempo de bombeo rápido.

Una típica lechada de cemento Portland clase A contiene 0.75 a 1% de CFR-2 y con una relación de agua de 3.4 galones por saco, pesando 17.5 Lb/Gal. A temperaturas elevadas puede ser necesitado un retardador para proveer un tiempo suficiente de bombeabilidad. También un 2% de CaCl_2 puede ser usado con relaciones bajas para obtener un fraguado rápido y aumentaren la resistencia.

CAL-SEAL.- Tiene una elevada resistencia, es comúnmente usado por sí solo o en proporciones de 50-50 con cemento Portland para incrementar la durabilidad.

Otro acelerante es el agua de mar, esta contiene pequeñas cantidades de sodio, magnesio y cloruros de calcio (20000 a 40000 ppm); al utilizarla provee alguna aceleración.

2.- RETARDADORES DE FRAGUADO.- A medida que la profundidad de un pozo aumenta, la temperatura se incrementa y el cemento tiende a fraguar antes de llegar a su sitio. Para contrarrestar este efecto, se usan ciertos compuestos de calcio lignosulfonado, capaces de retardar hasta en unas 5 horas el fraguado del cemento, permitiendo bombear la lechada en condi

ciones de seguridad.

Los retardadores de calcio lignosulfonados son muy efectivos en los cementos A, B, y C A.P.I.

El CMHEC, es un producto de celulosa, puede ser usado como retardador con todas las clases de cementos A.P.I. y también es efectivo en la reducción de pérdidas de fluido en una lechada.

El calcio lignosulfonado también reduce la viscosidad, - tal es así que es útil en lechadas con altos porcentajes de - Gel*

Otros retardadores comúnmente usados incluye almidón, borax y azúcar.

Retardadores comerciales incluyen los de la Compañía Halliburton y son HR-4, HR-7 y HR-12.

HR-4, es un retardador de tipo lignina (Calcio lignosulfonado) para usarse con cementos portland clase A a temperaturas estáticas arriba de 260 a 290°F. El HR-4 no debe ser usado con cementos con elevadas cantidades de bentonitas -- (12 - 25%) puesto que no actúa como un dispersante.

HR-12, es una mezcla de HR-4 y un ácido orgánico. Es recomendado para usarse en cementos D, E, G ó H API y donde la temperatura estática del pozo es tan elevada como 260°F (126°C) HR-12 no es tan efectivo como el HR-4 en cementos clase A API.

HR-7 actúa como un dispersante y también como un retardador y debe ser usado con cementos con grandes cantidades de bentonita. El HR-7 puede ser sustituido por HR-4 donde la temperatura estática de la formación es menos de 260°F (126°C)

* Material gelatinoso formado por coagulación. Usualmente se refiere a Calizas Sodio-Bentonitas perteneciente a la clase de montmorillonitas.

3.- REDUCTORES DE PESO.- Para prevenir la pérdida de la lechada en formaciones de baja resistencia o fracturadas que ceden bajo el peso de columnas de alta densidad y reducir el costo de material de cementación aún donde las columnas de bajo peso no se requieren. Se emplean generalmente los siguientes materiales:

BENTONITA.- Bentonita o Gel ha sido usado como aditivos durante muchos años para formar lechadas de baja densidad y para reducir la separación de agua y el costo de la mezcla. Bentonita es un material arcilloso formado de la alteración de rocas ígneas. La adición de Bentonita en cantidades de 2 a 12% permite el uso de más agua en las lechadas obteniéndose lechadas de bajo peso, baja resistencia y baja unidad de costo. De acuerdo a sus proponentes las principales ventajas de este tipo de aditivo son:

- a.- La bentonita sostiene las partículas de cemento en suspensión.
 - b.- Lechadas con bajas densidades dan bajas presiones hidrostáticas.
 - c.- Baja resistencia da mejor penetrabilidad en perforación.
 - d.- Bajo costo por pies cúbico de lechada
- 3.- Baja pérdida de agua de la lechada.

Las principales desventajas son que la Bentonita baja la resistencia al ataque de agua sulfatadas y considerable pérdida de resistencia a la compresión incremento de la permeabilidad a temperaturas elevadas (retrogradación) sobre 230°F (110°C)

De acuerdo a Dunlap y Patchen la retrogradación a altas temperatura es eliminada en la cementación de pozos profundos por la adición de cantidades apropiadas de Silica finor y 4% por peso de CMHEC incrementando mayormente el tiempo de espesamiento de la lechada a temperaturas elevadas.

Cementos modificados incluyen esas lechadas conteniendo

de 12 a 15% de bentonita con 0.25 a 0.75% de calcio lignosulfonado por saco de cemento. Esas lechadas de cementación tienen propiedades similares a los cementos bentoníticos, excepto que el calcio Lignosulfonado actúa como un retardador y agente dispersante, dando a la lechada de cemento un largo tiempo de bombeabilidad bajo condiciones de elevadas temperaturas en el pozo. La mínima resistencia compresiva es 75 psi en 24 horas a 100°F.

Cementos salados de elevado Gel, consisten de cemento - portland, 12 a 35% de bentonita, 0.5 a 50% de sal (sodio o cloruro de calcio), y 0.1 a 1.5% de dispersante (calcio lignosulfonado). La sal actúa como un acelerador (particularmente el cloruro de calcio) y dispersante.

La mezcla cemento-bentonita presenta una superficie grande de reposo de modo que, al ser inyectada a través de figuras o cavernas va formando una barrera que impide el paso de fluidos, ayudando de este modo a reducir pérdidas de circulación en formaciones permeables y porosas.

Al mezclarse con la lechada le proporciona Tixotropia* - manteniendo en suspensión las partículas de cemento, aumentando la plasticidad y viscosidad. Así mismo el exceso de agua reduce la densidad.

El uso de altos porcentajes producen una reducción en la resistencia a la compresión y en el tiempo de espesamiento, - tanto en el cemento portland común como en el cemento de fraguado lento.

* Es la propiedad exhibida por ciertos sistemas de gelificación cuando están en un estado estático, entonces licúan cuando ^{están} sujetos a agitación.

TIERRA DIATOMACEA.- Es un material similar al pozzolana, con el uso de esta, hay un decrecimiento en el peso de la lechada debido a la baja densidad absoluta de la tierra diatomácea comparada con la del cemento portland (2.1 versus 3.14) y la gran cantidad de agua que puede ser añadida a la lechada sin la separación de sólidos. Esta dilación del cemento causa algún incremento en el tiempo de espesamiento y decrece en resistencia. Igual que con los otros pozzolanas, la sílica contenida en la diatomácea reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado cuando el cemento portland, fragúa. La acción pozzolánica de la tierra diatomácea produce un gel que llega a ser cementoso con la edad y temperatura.

PERLITA.- La perlita en su estado natural es una roca vítrea de gran dureza, que se ha formado al enfriarse rápidamente el material volcánico. Su estructura es esferoidal y contiene agua en cantidades de 1 a 6%. El proceso para expandirla y hacerla más ligera consiste en calentarla a altas temperaturas en hornos en donde se ablanda y el agua que contiene la roca vaporiza y forma pequeñas burbujas. Al enfriarse la masa resultante es quebrada en minúsculas esferas y pequeños fragmentos de una gran ligereza cuyo peso fluctúa entre 125 y 240 Kg/m³.

Al mezclarse la perlita con la lechada es necesario utilizar una cantidad mayor de agua debido a sus características hidrófilas, debe agregarse también un pequeño porcentaje de bentonita (2 a 6%) a fin de prevenir la segregación de las partículas de perlita y disminuir la separación de agua.

Con la adición de la perlita se reduce a la densidad de la lechada, se incrementa su volumen y en las formaciones fracturadas o porosas actúa como material obturante.

GILSONITA.- Es uno de los más recientes aditivos introducidos al cemento. La gilsonita es un hidrocarburo sólido perteneciente al grupo de asfaltos, con una gravedad específica

de 1.07 y cuando es preparado para usarlo en pozos de petró--
leos tiene una densidad total de 50 Lb/pies³. Tiene una es-
trutura no celular y cuando está sujeta a presión no absorve
agua de la lechada de cemento. Las propiedades originales de
la gilsonita tal como la gravedad específica, baja resistencia
a los fluidos corrosivos químicamente inerte, y bajo requeri-
mientos de agua resultando, baja pérdida de circulación en le-
chadas de cemento. De a Slagle y Carter, no hay diferencia -
entre tiempos de espesamientos de lechadas conteniendo de 0 a
50 Lb. de gilsonita por saco de cemento. La resistencia com-
prensiva de una lechada de cemento-gilsonita de 11 Lb/Gal, cu-
rada a 100°F por 24 horas excede los 500 psi. La alta resis-
tencia a la compresión relativa cuando comparamos con otros -
tipos de reductores de peso de las lechadas es debido a que -
el peso de la lechada es reducida por la gilsonita sólida más
bien que por la adición de cantidades de agua.

4.- MATERIALES PARA AUMENTAR EL PESO (DENSIFICANTES).-

El caso opuesto al anterior en que la formación no soporta
cargas hidrostáticas elevadas, es cuando el pozo tiene altas
presiones y para contrarrestarlas y evitar un reventón súbito,
es necesario aumentar el peso de la lechada; este peso debe -
ser por lo menos igual a el del lodo y de este modo reducir -
la tendencia del cemento a canalizar.

Un material pesado apropiado para el cemento debe tener
las siguientes características:

- a.- Bajo requerimiento de agua
- b.- No debe reducir la resistencia del cemento
- c.- No debe reducir el tiempo de bombeabilidad
- d.- El tamaño de la partícula debe ser uniforme.
- e.- Incremento mínimo del volumen de la lechada.
- f.- Debe ser químicamente inerte.
- g.- No interferir con operaciones posteriores del pozo.
(registros eléctricos, etc.,).

La mayor parte de los materiales pesados disponibles son: el mineral Hematita, mineral Ilmenita, Barita (sulfato de Bario, $BaSO_4$) y arena Ottawa; son usados para incrementar la densidad de la lechada de cemento donde lodos de densidades de 17 Lb/Gal o más grandes, son requeridas para controlar las altas presiones en zonas de aceite y gas durante la perforación. Para pozos de gran profundidad los materiales que reúnen las mejores características son la Ilmenita y la Hematita. Los aditivos patentados a base de estos minerales son el Hi-Dense-3, con los cuales pueden obtenerse lechadas hasta de 20 Lb/Gal (240 gr/c.c.)

La Ilmenita tiene una gravedad específica de 4.6, mientras que la Hematita tiene una gravedad específica de 5.05. Con ambos se pueden obtener lechadas de densidades arriba de 22 Lb/Gal. Ambos son químicamente inertes y requieren una pequeña cantidad de agua adicional.

La Barita tiene una gravedad específica de 4.2. El tamaño de las partículas es muy fina, de este modo requiere agua adicional. Con esta se pueden obtener lechadas de densidad hasta de 18 Lb/Gal. El empleo de barita está limitado por la necesidad de agregar agua extra, lo que tiende a reducir la resistencia a la compresión del cemento y a diluir el retardador disminuyendo el tiempo de fraguado inicial.

La arena tiene una gravedad específica de 2.65, y un bajo requerimiento de agua. El máximo peso de la lechada es de 17.5 Lb/Gal.

Lechadas de cemento saturadas con sal pueden agregarle de 0.5 a 1.0 Lb/Gal de densidad.

La Ilmenita y la fosforita tienen la desventaja de ser escasos y caros.

5.- REDUCTORES DE FRICCIÓN Y DE PERDIDAS DE FLUIDO.- Para establecer un flujo turbulento en una lechada convencional es necesario alcanzar altas velocidades anulares, lo que requiere una gran potencia del equipo de bombeo. Para solucionar este problema se diseñaron productos químicos, que actúan como dispersantes para reducir la viscosidad aparente de las lechadas evitando la separación de fluidos, con lo que se obtiene ahorro de energía y se hace más práctica la obtención de flujo turbulento.

Para que una lechada mantenga sus propiedades de viscosidad no deberá perder sus fluidos por filtración por lo que unido a la reducción de la fricción deberá reducir la pérdida de fluidos a valores mínimos.

Para cementaciones primarias es deseable y se obtienen por medio de productos químicos, valores de filtrado de 150 a 400 c.c. en una prueba de 30min. a 70 Kg/cm^2 .

En el mercado se utiliza un producto químico de la compañía Halliburton el CFR-2, este, reúne las propiedades de reductor de fricción y reductor de pérdida de fluido a altas temperaturas. Este aditivo es compatible con todos los tipos de cemento y reduce a menos del 50% las velocidades anulares necesarias para obtener flujo turbulento, reduciendo la pérdida de fluido a valores satisfactorios, principalmente en cementos con cloruros de sodio, en otros aditivos que para el mismo objeto, no funcionan eficientemente.

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran las propiedades físicas de algunos materiales de cementación

TABLA 5.0. Propiedades físicas de algunos materiales de cementación. (De: la revista Ingeniería Petrolera. Organismo de divulgación técnica e información de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México. Septiembre de 1969).

| M A T E R I A L | Peso Espec. (Kg/Lt) | Vol. ABS. Lt/Kg | Agua para Mezclar Lt/Kg. |
|------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|
| CEMENTO PORTLAND | 3.14 | 0.318 | 0.46 |
| GILSONITA | 1.07 | 0.934 | 0.33 |
| BENTONITA | 2.65 | 0.377 | 5.50 |
| HR-4 | 1.56 | 0.641 | CERO |
| HR-12 | 1.22 | 0.819 | CERO |
| HIDENSE - 2 (ILMENITA) | 4.67 | 0.214 | CERO |
| HIDENSE - 3 (HEMATITA) | 5.20 | 0.192 | CERO |
| BARITA | 4.23 | 0.236 | 0.20 |
| ARENA | 2.63 | 0.380 | CERO |
| HARINA DE SILICE | 2.63 | 0.380 | 0.40 |
| NaCl (Seco) | 2.17 | 0.460 | CERO |
| HALAD - 9 | 1.22 | 0.819 | CERO |
| CFR - 2 | 1.63 | 0.613 | CERO |

.- MATERIALES PARA CONTROL DE PERDIDAS DE CIRCULACION.-

El control y prevención de pérdidas de circulación de lechadas de cemento es un problema frecuentemente encontrado durante la cementación de pozos de aceite y gas. La pérdida por circulación puede ser definida como la pérdida a formaciones vacías, de fluidos de perforación o lechadas de cemento usada en perforación rotaria y complementación del pozo. Esta pérdida puede variar de una disminución gradual del nivel de lodo del hoyo, a una pérdida completa. La pérdida del lodo de perforación o cemento tiene como resultado pérdida en tiempo de circulación, taponamientos de zonas productivas y reventones. Un estudio muestra que los tipos de formaciones o condiciones de sub-superficie que son responsables para pérdida de circulación:

- 1.- Fracturas naturales
- 2.- Fracturas inducidas o creadas
- 3.- Formación de cavernas
- 4.- Formaciones no consolidadas o altamente permeables.

Los materiales para el control de pérdidas de circulación para el cemento pueden ser clasificados como sigue:

- a.- Los materiales granulares típicos son la Gilsonita y la cáscara de nuez. (Materiales fibrosos retardan el tiempo de fraguado y no son usados)
- b.- Materiales inertes laminados y en forma de escamas - son usados para sellar la cara de la formación. Pedazos de celofán son comúnmente usados.
- c.- Materiales semi-sólidos y cementos de fraguado instantáneo; estos espesan rápidamente por acción química o física para formar tapones. Tenemos cal-Seal y lechada de bentonita-diesel-oil.

Mediante pruebas de laboratorio se ha determinado que los materiales granulares trabajan mejores que en formaciones no consolidadas. Materiales de tipo laminado trabajan mejor para canales. Materiales semi-doblados o materiales de fraguado instantáneo trabajan mejor en fracturas.

La Gilsonita es el material granular más efectivo. Cantidades óptimas es cerca de 12 a 15 Lbs/saco de cemento.

Las cáscaras de nuez son usadas en cantidades de 2 a 8 - Lbs/saco.

Pedazos de celofán (con un tamaño 3/8") son usados en cantidades de 25 Lbs/saco de cemento portland (50 Lbs/saco comúnmente) para dar un tiempo de fraguado de 7 a 15 minutos. El cal-seal debe fraguar al mismo tiempo que se está moviendo dentro de la zona porosa.

La selección entre ellos dependerá de las condiciones del pozo, temperatura, presión, tipo de lodo, lugar de la pérdida,

etc.; por lo que deberá hacerse un estudio completo antes de elegir el material sellante más adecuado.

(*) .- ESTABILIZADOR PARA ALTA TEMPERATURA.- A través de pruebas de laboratorio se ha comprobado que el cemento sometido a temperaturas mayores de 115°C sufre una alteración en sus propiedades⁽⁴⁾ por el llamado efecto de retrogradación que consiste en una notable disminución en su resistencia a esfuerzo de compresión y un gran aumento de su permeabilidad. Para contrarrestar este efecto se cuenta con un material denominado Harina de Silice (Silice molida de malla 200), que por medio de una reacción química con el cemento a altas temperaturas estabiliza sus propiedades. Para temperaturas moderadamente altas, la práctica recomienda su uso en relaciones de 30 a 40 por ciento del peso del cemento. Para temperaturas extremas (pozos de inyección de vapor, combustión insitu, etc). La proporción óptima debe obtenerse de pruebas de laboratorio.

1.3.- EQUIPO DE CEMENTACION.- El equipo que se utiliza en las cementaciones primarias, se selecciona de acuerdo con las características de las formaciones, condiciones del agujero y técnica de cementación.

Con el propósito de facilitar el estudio del equipo requerido en las operaciones de cementación primaria, éste se clasificó en equipo sub-superficial y equipo superficial. En las secciones correspondientes a esta clasificación no se pretende llevar a cabo una completa descripción del mismo; sino más bien, identificar sus funciones y empleo durante las cementaciones.

1.3.1.- EQUIPO SUBSUPERFICIAL.- El equipo subsuperficial consiste en una serie de aditamentos que ayudan a guiar la tubería, flotarla, centrarla, limpiarla, etc., ellos son:

I.3.1.1.- ZAPATAS DE CEMENTACION.- Son piezas de material perforable que van colocadas en el extremo inferior de la tubería de revestimiento. Se fijan en la parte inferior de la tubería de revestimiento enroscándolas y soldándolas, aunque es aconsejable usar en vez de soldadura, algún pegamento especial, para roscas que no dañe el acero de alta resistencia de la tubería, al no provocar sobrecalentamientos como aquella. El usar la soldadura o el pegamento en la zapata, el cople y los tres primeros tramos, es una medida de seguridad para que cuando se entre con barrena y se perforen no se vayan a desenroscar. Las zapatas sirven para guiar la tubería de revestimiento y protegerla durante su introducción al pozo. Además dependiendo de su tipo, permiten o evitan el paso del lodo a través de ellas. Las funciones que desempeña la zapata, son de acuerdo a su diseño, los tipos más usados son la zapata guía, la zapata flotadora, la zapata diferencial o de control de flujo y la zapata empacadora.

ZAPATA GUIA.- Como su nombre lo indica, sirve para guiar la tubería ayudando a proteger con sus bordes inferiores el extremo de la misma. Se usa en la cementación de tuberías superficiales e intermedias.

ZAPATA FLOTADORA.- La zapata flotadora únicamente permite el paso de fluidos desde el interior de la tubería al espacio anular. Origina un efecto de flotación que reduce considerablemente el peso de la tubería sobre la torre o mástil de perforación. Su uso requiere como se verá posteriormente, que la tubería se corra sin sobrepasar una velocidad determinada (5) de acuerdo a las características de formación y condiciones del agujero. De lo contrario se desarrollan presiones que seguramente dañan las formaciones. Este tipo de zapata se usan en la cementación de tuberías intermedias, y en caso necesario para la cementación de tuberías de explotación.

Está formada por un cuerpo que es un cople del mismo diámetro que la tubería, el cual contiene una válvula de retención y puertas de descarga laterales que dan más agitación a la lechada. La válvula de retención permite el paso de fluidos desde el interior de la tubería de revestimiento hacia el espacio anular y lo impide en sentido opuesto, de esta manera la lechada no se puede regresar; esta válvula se fija al cuerpo de la zapata por medio de un material perforable (cemento, plástico) que debe tener gran resistencia al esfuerzo cortante.

ZAPATA DE CONTROL DE FLUJO O DEFERENCIAL.- Para eliminar los golpes de presión (presiones instantáneas) causadas por la tubería al bajarla con demasiada rapidez, se han ideado estas zapatas que permiten el paso del lado del exterior hacia el interior de la tubería de revestimiento T.R. conforme se va bajando, con lo que también se logra un ahorro en tiempo de llenado.

Hay varios dispositivos de las diferentes casas fabricantes de este tipo de zapata, uno de ellos consiste en dos válvulas, una de camisa y otra de charnela; la primera trabaja durante el descenso de la tubería permitiendo el paso de fluidos hacia el interior de la tubería; la de charnela empieza a actuar ya en el fondo del pozo al bombearse fluido mayor de 700 Lbs/Pg², esta válvula impide la regresión del cemento. Se emplea en la cementación de tuberías de explotación y de tuberías intermedias, principalmente en formaciones de presionadas, con alta permeabilidad o fracturadas.

ZAPATA EMPACADORA.- Esta zapata puede ser guía o flotadora durante la introducción de la tubería de revestimiento. Por su construcción, proporciona un sello entre la tubería de revestimiento y el agujero, evitando así que, tanto la lechada de cemento como la presión de circulación, se manifiesten por

debajo de ella.

Al llegar a la profundidad total la tubería de revesti-
miento, se opera soltando una bola de baquelita que se aloja
rá en el asiento inferior de la zapata, impidiendo el paso de
fluido a través de ella y permitiendo levantar la presión den-
tro de la tubería. Al aplicarse una presión 850 Lbs/Pg^2 rom-
pe sus pernos dando lugar a que esta zapata empaque con la pa-
red del agujero, accionando simultáneamente un mecanismo que
abre una junta de circulación colocada arriba de los hules co-
municando el interior de la tubería de revestimiento con el -
espacio anular. Por la comunicación establecida se desplazó
la lechada de cemento al espacio anular; una válvula superior
de bola impide el paso de cemento en sentido inverso.

Esta zapata se utiliza en formaciones que presentan pro-
blemas de pérdida de circulación o cuando se requiere cemen-
tar la tubería de modo que quede situada en la parte superior
de la formación productora. Fig. 2'

1.3.1.2.- COPLES DE CEMENTACION.- Constan aproximadamen-
te de las mismas partes de las zapatas y como ellas, pueden
ser flotadores diferenciales o simplemente de retención. Su mi-
sión principal es detener el o los tapones de desplazamiento
y cuando son flotadores actúan como una segunda válvula en ca-
so de que falle la de la zapata. Se distinguen dos tipos, los
empleados en una cementación primaria convencional y los utili-
zados en las cementaciones por etapas.

1.3.1.2.1.- COPLES PARA CEMENTACION CONVENCIONAL.- Tiene
por finalidad retener el o los tapones de desplazamiento. De-
pendiendo de su función, se clasifican en: Cople de retención
y cople flotador y diferencial.

El cople de retención, flotador y diferencial permiten -
el paso de los fluidos en igual forma que la zapata guía flota-
dora y diferencial respectivamente. Se emplean en los mismos



(a)



Puertas de cementación

(b)

Fig. 2'.- a) ZAPATA EMPACADORA

b) COPLE DE CEMENTACION POR ETAPAS.

casos que estas zapatas, pero evitando combinar cople flotador con zapata diferencial o zapata flotadora.

El cople de retención o el cople flotador se coloca un tramo de tubería arriba de la zapata de cementación a profundidades menores de 6000 ft cuando se utilizan dos tapones de desplazamiento, y dos o más tramos arriba* cuando solo se utiliza un tapón de desplazamiento y a profundidades mayores, ya que la película de lodo 0.03 pulgadas (0.75 mm de espesor aproximadamente) adherida a la pared interior de la tubería y que va desplazando el tapón de hule, después de un recorrido de 10.000 pies (3050 mts.) en tubería de revestimiento de 7 pulgadas, alcanza un volumen aproximado de 14 pies cúbicos suficiente para llenar dos tramos de T.R., existiendo el peligro de que el lodo contaminado se sitúe alrededor de la zapata en la parte en que mejor debería quedar cementada la tubería.

I.3.1.2.2.- COPLES PARA CEMENTACION POR ETAPAS.- Los cople para cementación por etapas están provistos de un mecanismo que permite comunicar el interior de la tubería de revestimiento con el espacio anular. Son diseñados de modo que dejan pasar los tapones de desplazamiento utilizados para la colocación de la lechada en las etapas inferiores. Estos cople aseguran una menor circulación a través del área de cementación y reducen la posibilidad de pérdida de circulación, debido a excesiva presión hidrostática. Esta herramienta es instalada en el lugar deseado en la sarta de entubado en la parte inferior del intervalo, que se quiera cementar, después que el cemento ha sido colocado alrededor del fondo del casing, el cople de cementación por etapas es abierto por un tipo de bomba a través del fluido desplazante que es detenida

* El cálculo de la distancia necesaria entre cople y zapata se presenta en tapones de desplazamiento.

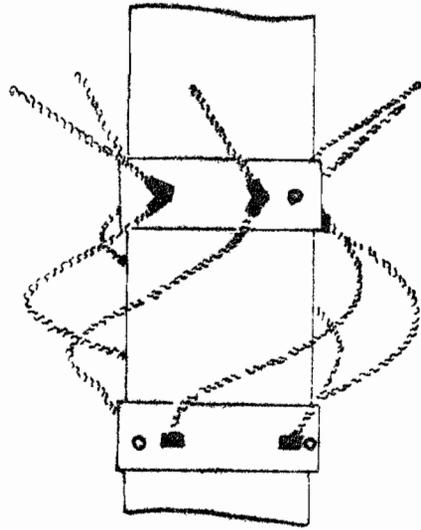
por el cople, lo que permite elevar la presión ocasionando - que se deslice una camisa y abra las puertas del cople de cementación por etapas y se establezca la comunicación al espacio anular. Una vez que se ha abierto el cople puede efectuarse la etapa correspondiente de cementación. El tapón que va colocado entre la lechada de cemento y el fluido desplazante, al llegar al cople, ajusta en una segunda camisa que se desliza al aumentar la presión que actúa sobre el tapón, cerrando la comunicación previamente establecida.

El número requerido de coples de este tipo en una operación, es igual al número de etapas programadas menos una, ya que la primera etapa se realiza análogamente a una cementación primaria convencional. Fig. 2'

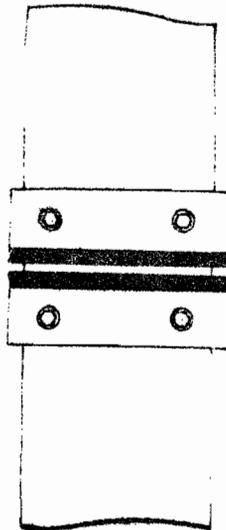
1.3.1.3.- RASPADORES O LIMPIADORES DE PARED.- Se utilizan para desplazar el enjarre del lodo de las paredes del agujero, procurando así una mejor adherencia del cemento. Se clasifican en dos tipos. El primero trabaja con el movimiento vertical de la tubería, desplazándose entre anillos topos o collarines de retención; el segundo se fija a la pared de la tubería, accionándose con el movimiento rotatorio de la misma

Los raspadores comúnmente usados consisten de un anillo metálico en el que se han montado tangencialmente una serie de alambres (escobillas), con el propósito de limpiar las paredes del pozo de la película de lodo. Existe otro tipo de raspador que en lugar de alambres está provisto de cables de acero dispuesto en la forma indicada en la fig. 2. Estos raspadores cuando se introducen con la tubería, están expuestos a una acción abrasiva menos intensa que los raspadores de alambre, además presentan la ventaja de adaptarse fácilmente al diámetro real del agujero, sin ofrecer restricciones al flujo.

Debe tenerse presente que, aunque al eliminar la pelícu-



(a)



(b)

FIG.2.- a) RASPADOR DE PARED PROVISTO DE CABLES PARA REMOVER LA PELICULA DE LODO.

b) UNIDAD SELLANTE.

la de lodo se mejora la adherencia entre cemento y pared del agujero, en el caso de formaciones con alta permeabilidad la eliminación del enjarre puede ocasionar pérdidas de fluido - que, en casos extremos, darán lugar a pérdidas de circulación.

La operación de los raspadores o limpiadores de pared se limita a cubrir los intervalos de interés, accionándolos durante la última etapa de circulación, el desplazamiento del dispersante de arcillas y la colocación de la lechada de cemento.

Aparte de sus funciones de limpieza del enjarre y agitación del lodo, los raspadores junto con los centradores y collarines tope sirven como refuerzo para la tubería de revestimiento (T.R.) y como armadura para el cemento. En la operación de disparo de las pistolas se originan impactos de cerca de 80000 libras que muchas veces rajan la tubería y desquebrajan el cemento propiciando la canalización del agua contenida bajo el estrato productivo, lo anterior no sucede si se ha usado un número conveniente de centradores y raspadores en esa zona.

La distribución de los raspadores se determina de acuerdo al desplazamiento que se dé a la tubería en el movimiento vertical. Por ejemplo, si el desplazamiento máximo de la tubería es de un tramo, la distribución será:

En el primer tramo, tres raspadores separados con dos collarines topes colocados a $1/4L$ y $1/2L$; del segundo tramo hasta dos tramos arriba de la zona de interés se colocarán dos raspadores, separados con un collarín colocado a $L/2$, siendo L , la longitud de un tramo.

Si el desplazamiento de la tubería durante el movimiento vertical es menor que la longitud de un tramo, la distribución anterior se modifica aumentando un raspador y un collarín por

tramo. Los collarines, en el primer tramo, se colocarán a $1/4L$, $1/2L$ y $3/4L$, y en los demás tramos a $1/2L$ y $2/3L$.

I.3.1.4.- CENTRADORES.- Partiendo del hecho de que es casi imposible perforar un agujero perfectamente vertical, la tubería de revestimiento tenderá a recargarse sobre un lado del agujero, haciendo que el cemento se distribuya irregularmente, en mayor cantidad de un lado y poco o casi nada en el opuesto, dando lugar a canalizaciones y consecuentemente a una cementación defectuosa.

Para evitar lo anterior se han diseñado los centradores que son unos cuerpos de metal constituidos por varios flejes de acero curvados, que van unidos en sus extremos a dos orillas o bandas los cuales rodean a la tubería de revestimiento, unidas por una bisagra y un clavo.

La función principal del centrador es desde luego, centrar la tubería dentro del agujero, manteniendo un espacio anular uniforme en toda la longitud del intervalo a cementar y de esta forma disminuir el área de contacto con las paredes del pozo, prever la canalización del cemento, e igualar la presión hidrostática en el espacio anular, con lo cual se nulifica la presión diferencial causante de las pegadas de tubería, además el lodo puede circular mejor más libremente.

Existen en el mercado centradores de diseño especial, provistos de flejes que desvían y aceleran el flujo, propiciando el establecimiento de régimen turbulento. En esta forma se logra desplazar el lodo arrastre en su camino ascendente los recortes, parte del exceso de enjarre formado y desplazar el lodo que ha quedado depositado en cavidades o ensanchamientos locales del agujero.

La distribución de los centradores se determina en función del diámetro de la tubería y desviación del agujero. Se considera que para agujeros relativamente rectos, o sea, con

desviaciones menores de dos grados, una separación de 89 pies entre centradores es satisfactoria.

La distribución de centradores en agujeros desviados se presenta en la tabla 6.0 (6).

Por razones de seguridad, en agujeros relativamente rectos, la distribución de centradores se modifica, colocando un centrador por tramo para cubrir 200 pies arriba y abajo de la zona de interés. En ciertas ocasiones se acostumbra a poner 2 centradores en el primer y segundo tramos y del tercer tramo en adelante un centrador, con la consiguiente modificación en la distribución de raspadores y collarines topes.

TABLA 6.0.- SEPARACION ENTRE CENTRADORES PARA AGUJEROS -
DESVIADOS

| Diámetro de la Tubería: | 5 1/2" | | 6 5/8" | | 7" |
|-------------------------|----------------------------|-------|--------|-------|-------|
| Diámetro del agujero: | 7 7/8 | 8 3/4 | 8 3/4 | 8 3/4 | 9 7/8 |
| Desviacion en Grados | S E P A R A C I O N (Pies) | | | | |
| 2 | 92.0 | 101.9 | 72.0 | 62.0 | 110.0 |
| 4 | 78.1 | 88.0 | 59.5 | 50.0 | 91.0 |
| 6 | 71.2 | 78.1 | 49.8 | 43.0 | 82.0 |
| 8 | 66.0 | 72.1 | 46.4 | 37.9 | 75.1 |
| 10 | 62.0 | 68.2 | 43.3 | 35.1 | 70.0 |
| 20 | 52.0 | 55.9 | 33.5 | 26.1 | 54.8 |
| 30 | 46.0 | 50.8 | 29.0 | 22.0 | 44.7 |
| 40 | 42.0 | 47.0 | 26.1 | 19.0 | 42.8 |

1.3.1.5.- TAPONES DE DESPLAZAMIENTO.- Se emplean para evitar la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación. Durante la cementación se utilizan dos tipos de tapones. El primero limpia la fina película de lodo de la pared interior del casing, depositándola debajo del cople de cementación y quizás en el anulus. No es de sorprenderse que de 15 a 20 pies de cemento contaminado es a menudo encontrado debajo del cople cuando el tapón de fondo no es usado.-

El segundo separa la lechada de cemento del lodo de perforación.

Los tapones de desplazamiento se colocan en la cabeza de cementación. El primero ha sido construido para permitir la circulación de fluidos por medio de un diafragma, que se rompe al incrementar la presión cuando este se asienta en el cople. Este tapón se emplea adelante del fluido-dispersante de arcillas. El segundo tapón, construido de un material perforable, se emplea para separar la lechada de cemento del fluido desplazante.

En toda cementación primaria, en que la longitud de la tubería a cementar es mayor de 3200 pies (1000 mts), es conveniente usar los dos tapones. Si se emplea únicamente el segundo tapón, será necesario colocar el cople de retención a una distancia suficiente de la zapata, de modo que todos los residuos desplazados por el tapón queden dentro de la tubería. Estos residuos contaminan la parte inferior de la lechada de cemento, formando una mezcla de lodo y cemento que fragua dentro de la tubería, y que posteriormente, hay que limpiar. Por lo tanto, a mayor distancia requerida entre cople y zapata, mayor tiempo de perforación para limpiar el cemento fraguado dentro de la tubería, lo que significa un mayor costo en la cementación.

El método de cálculo, para la determinación de la posición del cople de retención cuando solo se utiliza un tapón de desplazamiento, se ilustra en el ejemplo siguiente:

EJEMPLO 1.- Se desea determinar la distancia necesaria entre cople y zapata, para cementar una tubería de 6 $\frac{5}{8}$ " N-80, de 32 Lb/pies en agujero de 8 $\frac{3}{4}$ " a 9843 pies (3000m) de profundidad. Considérese que se emplea solo el segundo tapón de desplazamiento y que en la pared interna de la tubería existe una película de lodo de 0,0394 pulgadas de espesor.

Datos:

Tubería: 6⁵/₈" , N-80, 32 lb/pie

Diámetro exterior: 6,625 pg.

Diámetro interior: 5,675 pg.

Capacidad de la tubería: 5,693 pies/pie³

Longitud de la tubería: 29.5 pies

Capacidad del espacio anular: 5,693 Pies/pie³

Solución:

El volumen de residuos desplazados es:

$$V_{mc} = 5.45 \times 10^{-3} \cdot h_{mcl}$$

$$V_{mc} = 5.45 \times 10^{-3} (5,675 + 5,5961)(5,675 - 5,5961) \cdot 9843$$

$$V_{mc} = 5.45 \times 10^{-3} \cdot 11.27 \times 0.0789 \times 9843$$

$$V_{cm} = 47,9 \text{ pies cúbicos}$$

La longitud equivalente de tubería es:

$$V (\text{pie}^3) \times \text{capacidad de tubería pie-pie}^3$$

$$5,693 \frac{\text{pie}}{\text{Pie}^3} \times 47.9 \text{ pie}^3 =$$

272 pies.

Número de tramos requeridos.

$$\frac{\text{Longitud equivalente de tubería}}{\text{Longitud de tubería por tramo}}$$

$$\frac{272}{29.5}$$

. . N^o de tramos 10

Como el tapón desplaza 47.9 piés cúbicos de película de lodo que ocupa una longitud de 272 pies de tubería, el cople de retención se debe colocar 10 tramos arriba de la zapata. Se hace notar que los 10 tramos representan únicamente el volumen de residuos desplazados; sin embargo, conforme la película de lodo es desprendida de la pared de la tubería, se mezcla con la parte final del cemento, formándose una zona de cemento contaminado que aumenta el volumen de los residuos. Es vista que no es conveniente colocar cemento contaminado en el espacio anular, la distancia entre cople y zapata debe in-

crementarse hasta alcanzar el volumen igual al de la zona con-
taminada.

Si se colocase el cople de retención en el primer tramo, 43 pies cúbicos de residuos pasarán al espacio anular, alcan-
zando un nivel de 242 pies (73.7 m.) arriba de la zapata, lo
que conduciría a una mala cementación en la parte inferior de
la tubería.

I.3.1.6.- UNIDADES SELLANTES.- Como el fraguado del ce-
mento es un proceso exotérmico, la tubería de revestimiento -
sufre una dilatación y posteriormente (una vez que el cemento
ha fraguado y se restituye las condiciones normales de temp-
ratura dentro del pozo) una contracción. Este fenómeno pro-
voca que falle la adherencia entre el cemento y la tubería (6),
propiciando la canalización de los fluidos o inyectados*. Pa-
ra evitar el paso de fluidos a través del espacio anular así
formado, se emplean dispositivos denominados unidades sellan-
tes, fig. 2 b, se aseguran a la tubería de revestimiento por -
medio de prisioneros ocultos. Las unidades sellantes no pre-
sentan ningún obstáculo a la cementación, ya que su espesor es
igual al de los coples. Están provistas de capas de hule, que
sellan contra las paredes del cemento, evitando el paso de -
los fluidos. Deben instalarse a 16 o 20 pies arriba y abajo
de la formación productora.

I.3.2.- EQUIPO SUPERFICIAL.- El equipo superficial usado
comúnmente en las operaciones de cementación primaria de tube-
rías de revestimiento, constan de los siguientes elementos:

Cabeza de cementación

Unidad de cementación

Mezclador de cemento

Bombas del equipo de perforación.

* Experimentalmente se ha comprobado la separación de la tu-
bería del cemento, a pesar de que se libere la presión den-
tro de la tubería de revestimiento después de que el segun-
do tapón de desplazamiento llega a su posición.

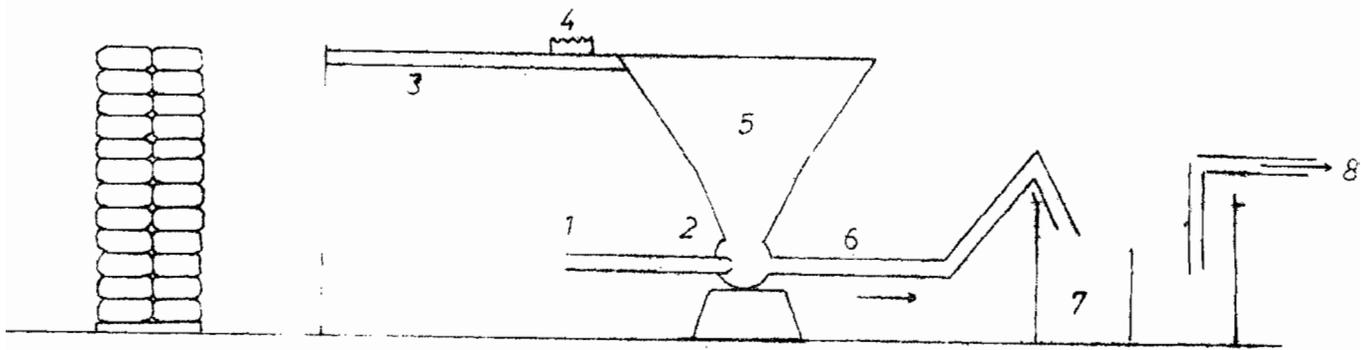


FIG. 3.- MEZCLADOR DE CEMENTO POR CHORRO DE AGUA.

1.3.2.1.- CABEZA DE CEMENTACION.- Consiste de un niple de longitud variable según el número de tapones que se usen - (uno ó dos) el cual va enroscado en la parte superior de la - tubería de revestimiento. Está provisto de entradas laterales, en las cuales se unen por medio de uniones rápidas un - juego de conexiones que conducen; la lechada de cemento proveniente de la unidad cementadora y el lodo utilizado para el - desplazamiento enviado desde las bombas de perforación.

En toda cementación primaria se debe utilizar cabeza de cementación de igual diámetro interior a la tubería que se va a cementar, con el objeto de asegurar la correcta operación - de los tapones de desplazamiento.

1.3.2.2.- UNIDAD DE CEMENTACION.- La unidad de cementación está constituida por dos bandas de alta potencia capaces de levantar presiones de hasta 14.000 psi. (1000 kg/cm²) que - son accionadas por motores diesel de gran potencia, también - se cuenta con dos tanques o depósitos, que se miden y proporcionan el volumen de agua utilizado durante la cementación. Una de las bombas succiona el agua de los depósitos y alimenta al mezclador, proporcionándole el agua necesaria para obtener la lechada de cemento. La otra bomba succiona la lechada y - la envía al pozo a través de las líneas que unen la unidad cementadora con la cabeza de cementación. Todo lo anterior se encuentra montada generalmente en un camión. El control de - las bombas y motores se hace desde un tablero colocado en la parte posterior del camión, 2 manómetros fácilmente visibles indican las presiones de bombeo. Las válvulas de succión y - descarga de los tanques son accesibles también desde este lugar.

1.3.2.3.- MEZCLADOR DE CEMENTO.- En este dispositivo se efectúa la mezcla agua-cemento por medio del flujo turbulento del agua. Su forma es semejante a la de un embudo con la parte

te ancha hacia arriba en el cual se vierte el cemento. Está provisto en la base de dos uniones que permiten conectar la línea de alimentación de agua y la línea de descarga de lechada. La primera línea ~~se~~ une a una de las bombas de la unidad cementadora y la segunda línea descarga la mezcla de cemento a un depósito, del que es succionada por la otra bomba y enviada al pozo.

La mezcla por chorro de agua se realiza según se muestra en la fig. 2. El agua es inyectada a través de la línea (1) que termina en un estrangulador (2) los sacos de cemento son colocados sobre la mesa (3) y rasgados por la cuchilla (4), el cemento cae dentro de la tolva (5) y es mezclado con el agua debido a la alta velocidad con que esta sale del estrangulador, es descargado por (6) a un tanque de succión (7). El flujo turbulento mantenido desde el momento de la mezcla hasta su descargue en el tanque de succión es suficiente para dar una lechada más o menos uniforme. Otra bomba de alta presión, efectúa la succión de la lechada por medio de la línea (8) y la descarga en el pozo a través de una línea de alta presión.

Con el propósito de controlar la densidad de la lechada, esta se determina periódicamente tomando muestras del depósito mencionado; o bien, se registra en forma continua, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que desplaza la lechada al pozo.

1.3.2.4.- BOMBAS DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN .- Se consideran como parte del equipo de cementación, debido a que generalmente, en toda cementación primaria se emplean para desplazar la lechada al espacio anular, usando lodo de perforación como fluido desplazante. En el capítulo IV se describe el procedimiento para calcular la velocidad de desplazamiento.

Es conveniente disponer de instalaciones que permitan operar estas bombas y para desplazar la lechada de cemento al espacio anular bajo las condiciones determinadas en el diseño de la cementación.

CAPITULO II

FACTORES QUE SE DEBEN
CONSIDERAR EN EL
DISEÑO DE LA LECHADA
DE CEMENTO .

En los pozos petrolíferos, se emplea el cemento portland en sus distintos tipos, para las operaciones de cementación.

Todos los cementos son básicamente iguales, sin embargo, pequeñas alteraciones en su composición química, pueden alterar grandemente los resultados que uno espera, es por esto que es conveniente probar las lechadas a condiciones de pozo, para determinar sus propiedades físicas, tales como de espesamiento, esfuerzo a la compresión y tensión, etc., las cuales son funciones de la composición del cemento, de su fineza (muy fino, resistencia rápida y fraguado rápido, menos finos - cementos retardados), de la relación agua-cemento, de la presión y temperatura.

El A.P.I. recomienda profundidades y temperaturas a las que se debe emplear un cemento determinado, basado en la composición y propiedades de las lechadas. En la composición química, son de primordial importancia el aluminato, tricálcico y el silicato tricálcico. En propiedades de la lechada como ya se mencionó, el tiempo de espesamiento es primordial, ya que debe ser suficiente para mantener fluida la lechada mientras se la coloca en el lugar programado, con adecuado factor de seguridad por cualquier problema imprevisto.

Otra propiedad es el esfuerzo a la compresión. Las lechadas deben desarrollar suficiente consistencia para permitir las operaciones siguientes a las cementaciones, en un tiempo reducido. Actualmente se consideran suficientes 500 Lbs./Pg² de esfuerzo a la compresión o 7 Lbs/Pg² a la tensión.

Otros factores básicos que indica el A.P.I. son el agua empleada, el peso de la lechada, su resistencia a los sulfatos, corrida de la tubería de revestimiento, cantidades y tipo de materiales (esto varía con las condiciones del pozo.)

Otros factores pueden ser el tipo y cantidad de unidades necesarias para la operación, equipo accesorio, técnicas a em

plearse y experiencia del personal.

De lo visto anteriormente, se puede considerar, que la selección de un cemento, se determina en función de las características de las formaciones y del tiempo de cementación requerido según la técnica de diseño seleccionado, y tomando en cuenta los siguientes factores:

II.1.- DENSIDAD. - Deberá ser tal que permita efectuar la cementación sin exceder el gradiente de fractura de la formación. Con el propósito de mejorar el desplazamiento del lodo del espacio anular, se recomienda que la densidad de la lechada sea mayor que la densidad del lodo de perforación, con una diferencia mínima de 0.25 gr/cm^3 (2.08 Lbs/Gal.)

II.2.- PERDIDA DE AGUA. - El empleo de aditivos para reducir la pérdida de fluidos es benéfica para obtener buenas cementaciones. Para cementaciones primarias se recomiendan lechadas que, sometidas en un filtro prensa a 1000 Lbs/Pg² de presión diferencial durante 30 minutos mantengan una pérdida de agua entre 150 y 400 cm³ (6) y a la temperatura de circulación del caso.

Con una pérdida de fluido baja, las lechadas permanecen fluidas mientras se bombean, esto normalmente reduce la presión de bombeo, reduciendo los problemas de pérdidas, además de ofrecer un tiempo de espesamiento más estable por mantenerse la relación agua-cemento relativamente constante.

Lechadas de cemento con pérdidas apreciables de agua originan: incremento en la densidad, reducción en la bombeabilidad, reducción en el área efectiva del espacio anular y por consiguiente un incremento en las pérdidas de presión por fricción. La pérdida de agua se controla a fin de evitar la deshidratación de la lechada, sobre todo cuando se presume la presencia de formaciones muy permeables o de baja presión.

El empleo de aditivos retardan la deshidratación prematura, arbitrariamente se buscan valores de 550 y 400 cc. La pérdida de fluido en 30 minutos. El empleo de la lechada de baja pérdida de fluido, dañan menos las formaciones (resultantes del filtrado agua-cemento), al no reducir tanto la permeabilidad, no hinchar tanto las arcillas. Cuando el agua es pérdida a una formación, a menudo causa daño tanto como reducción o taponamiento de la permeabilidad. Cuando una formación contiene arcillas sensitivas al agua, el filtrado agua-cemento perdido dentro de la formación puede nichar las arcillas dañando la permeabilidad.

Lechadas de cemento con pérdidas apreciables de agua originan: incremento en la densidad, reduciendo la bombeabilidad, reducción en el área efectiva del espacio anular y por consiguiente un incremento en las pérdidas de presión por fricción. La pérdida de agua se controla a fin de evitar la deshidratación de la lechada, sobre todo cuando se presume la presencia de formaciones muy permeables o de baja presión.

Casos de extremos de pérdidas de agua desde una lechada de cemento puede resultar en un fraguado instantáneo (flash-set). Los fraguados instantáneos no suceden a menudo pero pueden resultar costosos en trabajos de reparación si se ha dejado mucho cemento en el casing este debe ser perforado. Otro problema con el fraguado instantáneo es que el llenado del espacio anular no puede ser suficiente para ser aceptable, necesitando perforación en el casing y trabajo de recementación. Lechadas con bajas pérdidas de agua reduce la posibilidad de un fraguado instantáneo.

II.3.- TIEMPO DE ESPESAMIENTO.- El tiempo de espesamiento de una lechada se define como el tiempo requerido por la lechada para alcanzar 100 unidades de consistencia Ue y deberá permitir el desplazamiento de la lechada de cemento, hasta

el lugar predeterminado, teniendo en cuenta que el espesamiento se acelera con: el incremento de temperatura, presiones mayores de 5000Lbs/Pg², la presencia de componentes inorgánicos y la pérdida de agua.

En el laboratorio el grado de espesamiento de 100 Uc es equivalente a una porción de 2080 gr-cm, aplicada a las paletas de la flecha del probador del tiempo de espesamiento. En este momento la lechada se solidifica y no es posible moverla con el equipo común. En el campo el tiempo de espesamiento - se traduce en tiempo de bombeo o sea, el tiempo disponible para mover la lechada desde los aparatos de mezcla hasta un lugar predeterminado en el pozo: el consitómetro se adoptó en - 1962 cuando se reconoció la importancia del flujo turbulento, se cambiaron las revoluciones del aparato de 50 a 150 r.p.m. en 1965. El 1967, en lugar de la unidad de consistencia, se adoptó el poise, éste es un cambio muy importante pues elimina los errores de tratar a las lechadas de cemento como fluidos newtonianos, siendo No-Newtonianos.

El incremento gradual de temperatura para llegar a la estática en el fondo del pozo, puede reducir el tiempo de espesamiento y este factor debe considerarse si se necesitan varias horas para bombear la lechada. El A.P.I. ha propuesto - cédulas para cementar pozos a varias profundidades (1000 a 20000 pies) y para varios tipos de operaciones (cementación de T.R., forzados y liner). La mayor diferencia en los tipos de operaciones, consecuentemente en las cédulas, son los tiempos a - que se aplica la temperatura y la presión, además de las máximas que se le aplican a las lechadas.

En la cédula se aplica un gradiente promedio de temperatura de 80°F más 1.5°F por 100 pies de profundidad, esto proporciona una temperatura estática a cualquier profundidad. La máxima temperatura registrada (llamada temperatura de circulación) en cualquier cédula es igual al 63 a 90% de temperatu-

ra estática del fondo del pozo. Las cédulas están basadas en condiciones promedio de tamaño T.R., velocidad de desplazamiento, temperatura del fondo del agujero y algunos otros factores.

Las especificaciones A.P.I. dan tiempo de espesamiento para cada tipo de cemento. El tiempo de espesamiento especificado, da una guía para las profundidades a las que se debe emplear un cemento determinado, sin embargo estos datos son para el cemento neto y prácticamente todos los aditivos empleados comúnmente afectan el tiempo de espesamiento de las lechadas.

La prueba en el laboratorio se hace en la siguiente forma: se prepara la lechada, se mezcla en la licuadora waring, para simular la mezcla inicial con fuerte acción cortante, agitando a 10000 r.p.m. durante 35 segundos. (se sabe que la agitación en laboratorio no es igual a la del campo, pero si que influye en el tiempo de espesamiento, por ejemplo, para una lechada agitada durante 35 segundos en waring, se obtuvo un tiempo de espesamiento de dos horas 44 minutos y agitando la misma lecha en agitador Howart, durante 5 minutos, a 140 r.p.m se obtuvo un tiempo de 5:12 horas). Se la pone en el consistómetro en una celda. Se toma la densidad con la balanza Baroid. Se anota el voltaje al iniciar la operación y a los 20 minutos y mediante tablas de término la consistencia en poises. Esto se hace con el fin de graficar consistencia versus tiempo y saber que consistencia va a tener a determinada hora.

La prueba se sigue hasta que alcance un voltaje de 10 voltios y que según calibración del consistómetro tenemos una consistencia de 100 poises. El lapso de tiempo desde que empieza a trabajar el aparato hasta que se obtienen 10 voltios, se reporta como tiempo de espesamiento del cemento empleado y para la cédula aplicada. Para cédulas en las que la tempera

tura es de 199°F (93°C) o más, se permite parar la prueba - cuando se tienen 700 Uc y determinar el tiempo 100 Uc por extrapolación.

El tiempo que generalmente se toma para una prueba es 4 horas, pero este puede variar según concentraciones de aditivos, relación agua-cemento, etc. Se reporta el tiempo que demoró la prueba se ve si es suficiente para realizar una cementación en el campo, sino es así se la desecha y se hacen otras pruebas con otras concentraciones de aditivos y relaciones agua-cemento. Tiempo mayor de 4 horas no es recomendable.

MEZCLEO EN EL CAMPO.- En el campo, la mezcla inicial ocurre cuando el chorro es un mezclador de chiflón la acción vigorosa de mezcleo dura unos cuantos segundos, la lechada resultante, pasa por medio de una centrífuga a una bomba de alta presión que la inyecta al pozo. La acción cortante sobre la lechada durante esta acción es muy severa pero de muy corta duración, el resto de la agitación, la recibe la lechada dentro de la T.R. y es muy relativa.

II.4.- VISCOSIDAD.- Deberá mantenerse cerca pero siempre mayor a la del lado de perforación. Con esto se facilita el desplazamiento del lodo y se reducen las pérdidas de presión por efecto de viscosidad.

La viscosidad óptima de una lechada de cemento es de 5 a 11 poises. La relación agua-cemento influye poderosamente en las propiedades físicas de la lechada y del cemento en su etapa inicial de fraguado, por lo que es importante que la mezcla se proporcione. Si se agrega agua en exceso, se reduce la viscosidad de la lechada, lo que si bien facilita su bombeo, produce los siguientes inconvenientes:

La lechada tendrá asentamiento de material

Mayor tiempo de fraguado lo que exige tener cerrado el pozo más tiempo.

Separación del exceso de agua en bolsas, formando cavida

des dentro del cemento fraguado.

Reducción de la consistencia final del cemento fraguado.

En cambio una lechada con baja relación agua-cemento - con más de 11 poises es de alta viscosidad y por consiguiente difícil de bombear debido a su alta fricción y se necesitarán bombas de muy alta presión además del problema del aire que atrapa; y también difícil de producir flujo turbulento al salir de la zapata, lo que se traduce en una canalización a través del lodo. Por otra parte es susceptible deshidratarse rápidamente originando un fraguado prematuro del cemento antes de ser colocado en su sitio. El control de la viscosidad se efectúa variando la cantidad de agua empleada, o utilizando aditivos, cuando se emplean estos debe vigilarse que no se reduzca tanto la viscosidad que se presenten asentamiento o agua libre en exceso.

Recientemente se han desarrollado varios procedimientos que utilizan aditivos para solucionar los problemas de la densidad de la lechada y la pérdida de agua.

Uno de estos aditivos es el Diacel (D), elaborado a base de una arcilla diatomacia especial, que permite usar más agua en la mezcla, reduciendo la densidad de la lechada sin menguar sus características. Con el Diacel "D" se consiguen densidades tan bajas como 1.25 gr/c.c; como resultado, se pueden formar columnas más largas de cemento sin tener que recurrir a la cementación por etapas, y sin tener pérdidas de circulación.

Para controlar la pérdida de agua y el tiempo de espesamiento de la lechada, se usa el Diacel "LWL" que es un derivado de la celulosa.

Bastan cantidades pequeñas de este aditivo para reducir las pérdidas de fluido a cifras tan bajas como 0.05 cm. en 30

minutos, en contraste con la lechada de cemento normal cuya pérdida de agua es de 0.4 a 1.0 c.c. en 30 minutos.

Se ha desarrollado un cemento en el que se emplea una mezcla especial de latex y cemento portland. La lechada contiene latex, portland (tipo 1, o cemento de fraguado lento), agua y un surfactante. Las propiedades físicas de la lechada con cemento-latex son semejantes a las del cemento con el cual se preparan, es decir la misma viscosidad y los mismos períodos de bombeo y fraguado ofreciendo además mayor elasticidad y una mejor calidad sellante. Otra ventaja es su poco encogimiento mientras fragua.

Al ser forzado contra una formación porosa, las partículas de latex penetran en los pequeños espacios porosos formando un enjarre interno. El latex se aglutina por efecto del calor y la presión, formando una cubierta en la interfase cemento-formación. Esta tenaz película semejante al hule, es impermeable al aceite y al agua, sella eficazmente la formación y evita la migración de los fluidos.

El surfactante presente en la lechada, combinado con el latex contribuye a darle a este sus excelentes características sellantes. En superficies mojadas de petróleo, la lechada de portland común entra en contacto incompleto con la superficie. El surfactante de la lechada de latex, al hacer contacto con superficies mojadas de aceite tiende a convertirlas en mojadas de agua, permitiendo que la lechada desplace la película oleosa y penetre en la formación.

En comparación con una lechada ordinaria, la de cemento latex encoge muy poco, debido a que retiene casi todo el fluido en el material ya fraguado. Esta retención se debe al latex el cual sella el agua dentro del cemento fraguado.

Aunque el cemento latex es ideal para cementación de pozos petroleros, consideraciones económicas han limitado su u-

so.

II.5.- RESISTENCIA A LA COMPRESION.- La resistencia de un cemento, es aquella que opone a ser destrozado. Después de colocar la lechada de cemento en el espacio anular, es necesario esperar hasta que esta adquiera una consistencia capaz de sostener a la tubería de revestimiento, antes de continuar con la perforación o terminación del pozo. Se considera que una resistencia a la compresión de 500 psi (35 Kg/cm^2) es adecuada para soportar la tubería. Por lo tanto, el tiempo de espera puede determinarse experimentalmente, simulando las condiciones de cementación en un aparato de construcción especial y midiendo a continuación la resistencia del cemento.

El mínimo tiempo de espera puede estimarse por medio de la ecuación (3), desarrollada por R.F. Farris. La expresión mencionada se obtuvo relacionando el tiempo necesario para obtener la consistencia requerida por el cemento, con el tiempo en que se alcanza la máxima presión dentro de la tubería de revestimiento.

$$t_{woc} = 1.5 t_{max} \dots \dots \dots (3)$$

En la cementación de tuberías de explotación se emplea, generalmente, un tiempo de espera de 24 horas. Se ha demostrado que este tiempo proporciona una seguridad apropiada, como puede observarse de los datos reportados en la tabla 4, donde se presentan las resistencias a la compresión, para los cementos clase A,B,C,D,E,F, y G. Estas resistencias se alcanzaron después de 8 y 24 horas de haberse efectuado la mezcla

Obtener una lechada, para condiciones satisfactorias de bombeo y tiempo de fraguado, presenta dificultades cuando se trata de cementar intervalos considerablemente grandes y profundos. En estos casos, la mezcla se diseña procurando que la cima y base del cemento en el intervalo en cuestión, adquieran la misma resistencia al mismo tiempo.

En el laboratorio el A.P.I. acepta las pruebas A.S.T.M. probando cubos de 2 plg. curadas bajo agua o presiones atmosféricas de 3000 Lbs/Pg²(210 Kg/cm²). El cemento curado a presión generalmente tiene mayor resistencia a la compresión que el cemento curado a la presión atmosférica. Si la temperatura también es alta, es más pronunciado este efecto. Por ejemplo, 72° F (27° C) la resistencia casi no aumenta con la presión, pero subiendo la temperatura a 199° F (93° C) la resistencia sube un 25%.

Generalmente todas las resistencias aumentan debido a la acción de la presión hasta de mil libras/pulgadas cuadradas (70 Kg/cm²) y presiones adicionales causan incrementos no apreciables.

Basados en tal realidad y por conveniencia en las pruebas, el A.P.I. tiene como límite de curado 210 Kg/cm²(3000 psd) suficiente para simular las presiones extremas hasta de 1550Kg/cm² (22000 Psi) a las que está sujeto el cemento en pozos muy profundos.

Después de curar durante el tiempo y temperatura deseada, los cubos se rompen en una máquina hidráulica. Debe hacerse notar que la rapidéz con que se aplique la carga, puede alterar los resultados. La carga que se debe aplicar es de 1000 a 4000 Lbs/Pg²(70 a 280 Kg/cm²) por minuto.

La resistencia de un cemento está también relacionada con la relación agua cemento, alto volumen de agua dará menor resistencia. Aunque no es general, algunos cementos a temperatura de 199° F (93° C) o más, reducen su resistencia con el tiempo. Esta retrogresión dura de 5 a 15 días; antes de este tiempo el cemento mantiene casi una misma resistencia. Este fenómeno está acompañado por un aumento en la permeabilidad mientras baja la resistencia.

Como nota final se debe considerar que se debe obtener

la resistencia de 500 Lbs/Pg² en el menor tiempo posible para facilitar se continúen las operaciones normales de un pozo.

II.6.- AGUA LIBRE.- Agua libre, en una prueba de laboratorio, es el agua que se acumula en la superficie de una columna de lechada de cemento cuando esta se deja estática. Un exceso de agua libre se considera perjudicial porque pueden provocarse agrietamientos cuando la lechada ha sido bombeada y está estática, el agua libre tiende a subir provocando asentamientos dentro de la lechada, como hay asentamiento de partículas se tiende a producir puentes; justo abajo de las zonas puenteadas se agrieta el cemento por falta de partículas cementantes, estos agrietamientos se agravan con el tiempo por efecto de la presión y sus zonas potenciales que causarán canalizaciones.

Actualmente se acepta que el agua libre es indeseable, con la excepción al utilizar cementos tipo G y H, en los cuales el A.P.I. tolera hasta 1.4% (?), para los otros tipos de cemento, como regla arbitraria se debe tener cero de agua libre y nunca más del 1%.

La prueba A.P.I. nos indica que es la cantidad de agua liberada, medida en mililitros al poner 250 ml. de lechada en una probeta graduada y dejarla estática durante dos horas, no debe exceder de 3.5 ml. para los cementos tipo G y H y 2.5 ml. para los otros tipos, el procedimiento indica además los métodos específicos de mezclar, agitar y remezclar. La prueba debe hacerse a 80°F (27°C) ya que a mayor temperatura el agua libre es mayor, es recomendable, si se puede efectuar, hacer la prueba también a la temperatura de circulación del caso.

El empleo de aditivos para obtener flujo turbulento reducen la consistencia de las lechadas, pero debe vigilarse porque pueden provocar asentamiento y exceso de agua libre.

en algunos casos esto ha provocado que se destruya la fuerza de gelatinosidad de la lechada y el agua libre suba hasta 15 ó 20%. Por esta razón, al emplear este tipo de aditivos, debe hacerse la prueba de agua libre, si esta no da valores correctos, debe disminuirse la cantidad de aditivos o si no es posible hacerlo emplear bentonita.

II.7. CONSISTENCIA.- Es una propiedad reológica de la materia la cual es relativa a la cohesión de las partículas individuales de un material dado, su habilidad para deformar y su resistencia al flujo.

La consistencia se la determina en el consistómetro Halliburton que es un instrumento de laboratorio o campo aceptado a través del mundo para probar lechadas de cemento, que se van a usar en cementación de pozos de aceite.

El provee un principio práctico de campo o laboratorio:

Para evaluar un cemento hidráulico+ para un tipo particular de operación de cementación de un pozo de aceite.

Para una comparación directa de dos cementos diferentes bajo idéntica condiciones de temperatura y agitación.

Para estudio de las características de fraguado de varios cementos relativos a su uso en la cementación de pozos de aceite.

EJEMPLO 2.- Vamos a determinar la consistencia y la cantidad de agua libre en varias lechadas de cemento tipo G. Se van a analizar tres muestras:

| Muestra | gr. de cemento | % de agua por peso de cemento | ml. de H ₂ O |
|---------|----------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | 826 | .37 | 324 |
| 2 | 792 | .44 | 348 |
| 3 | 704 | .53 | 376 |

La relación agua-cemento se escoge pero generalmente se toma igual a 44%.

La cantidad de muestra que se prepara tiene que ser suficiente para las pruebas que se van hacer.

Se procede de la siguiente manera:

- 1.- Se prepara la lechada y se la agita en licuadora: a 70 r.p.m. durante 15 segundos y a 130 r.p.m. durante 35 segundos.
- 2.- Se pasa el consistómetro (a una celda) a una temperatura de 80°F (27°C); aquí se somete a una agitación de 35 rpm. durante 20 minutos.

* Un cemento que endurece o fragúa bajo el agua.

Se chequea constantemente que la temperatura del consistómetro no sobrepase los 80°F puesto que, si esto llegare a ocurrir el agua en la lechada se evaporaría y la lectura de la cantidad de agua libre sería falsa.

- 3.- Pasado los 20 minutos se saca la muestra y la agito en la licuadora Waring a: 4000 r.p.m. durante 15 segundos y a 10000 r.p.m. durante 35 segundos. Se pasan 250 ml. a una probeta graduada y se deja estática durante dos horas. Parte de la muestra se le determina la densidad con la Balanza Baroid, también se la puede calcular analíticamente.

Una vez hecha todas estas operaciones tabulamos los resultados.

| Tiempo de Entrada (min.) | Tiempo de Salida (min.) | Lectura+ | Consistencia en Poises | Agua libre ml. | Densidad, gr/cc | % de agua por peso de cemento |
|--------------------------|-------------------------|----------|------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|
| 10:48 am. | 11:08 am | 2.8 | 14.0 | 1.5 | 2.00 | .37 |
| 10:58 am. | 11:18 am | 1.9 | 10.0 | 4.0 | 1.90 | .44 |
| 1:10 pm. | 1:35 pm | 0.9 | 5.6 | 12.5 | 1.80 | .53 |

* Con las lecturas obtenidas en el consistómetro se determina la consistencia del cemento en poises según curva de calibración del aparato.

Graficando estos datos: agua libre-vs-% de agua por peso de cemento y consistencia-vs-% de agua por peso de cemento una sola gráfica. Fig. 4.

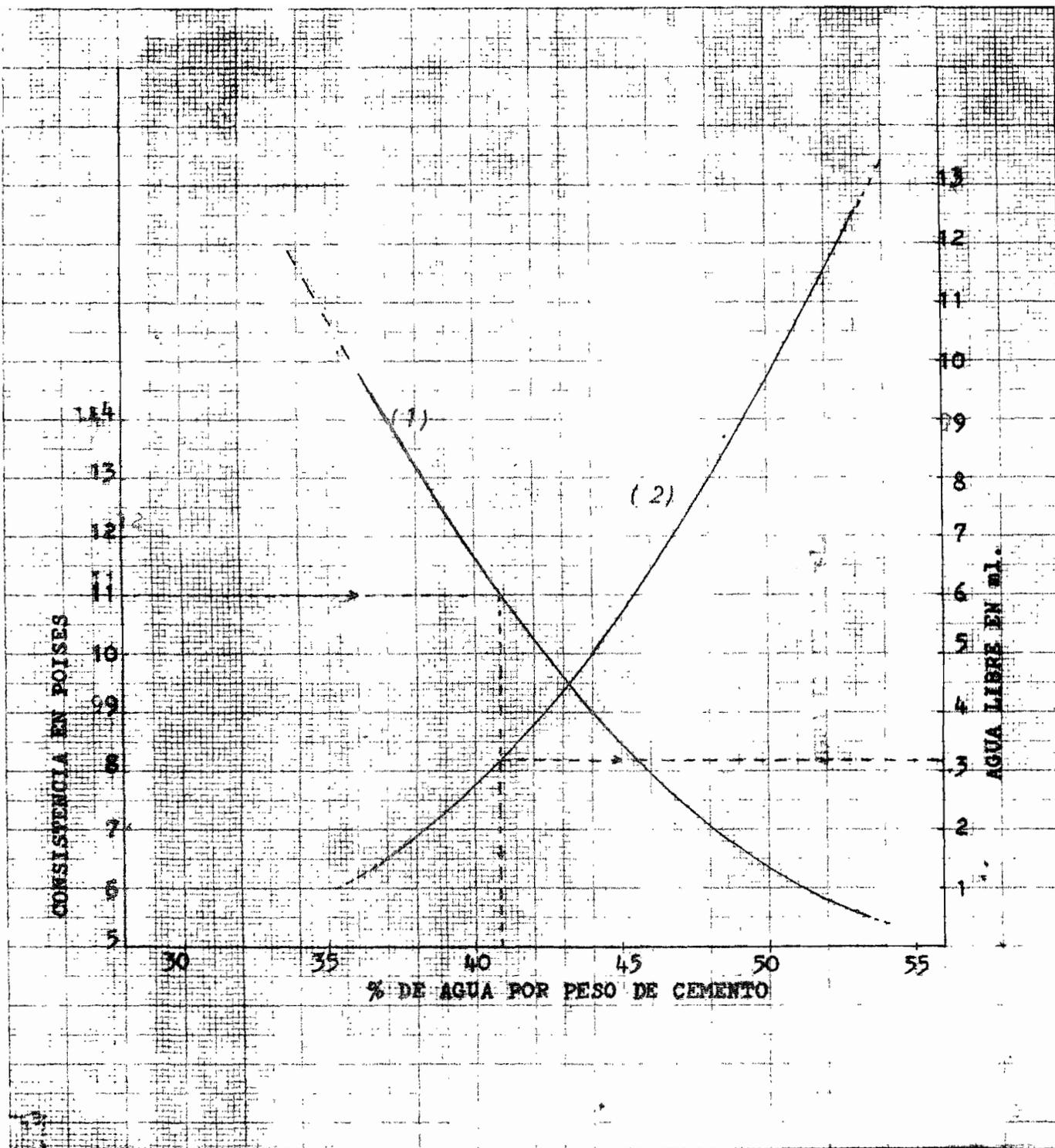


FIG. 4.- DETERMINACION DE LA CONSISTENCIA, AGUA LIBRE Y % DE AGUA POR PESO DE CEMENTO OPTIMOS A PARTIR DE VARIAS LECHADAS DE CEMENTO.

CONCLUSIONES.- Observando la curva (1) se ve que conforme disminuye el % de agua por peso de cemento aumenta la consistencia y viceversa. Extrapolando para el eje de las ordenadas se observa que para un 28% de agua por peso de cemento la consistencia alcanza un valor máximo. Extrapolando para el eje de las abscisas se observa que para una consistencia de 5 poises aumenta el % de agua alcanzando un valor máximo.

Observando la curva (2) se ve que conforme aumenta el % de agua por peso de cemento aumenta la cantidad de agua libre sobrepasando el valor de 1.4% que para este tipo de cemento tolera el A.P.I., o sea, para este caso 3.5 mililitros.

Una vez hechas todas estas observaciones se procede a la determinación de la consistencia en poises, cantidad de agua por peso de cemento y agua libre óptima para una lechada.

A partir de estas curvas se toma una consistencia óptima de 11 poises*, se determina el % de agua por peso de cemento y cantidad de agua libre en ml. óptimos, en este caso 40.8% y 3.18 ml. respectivamente.

II.8.- CALCULO DE LA DENSIDAD DE UNA LECHADA.- El cálculo de la densidad de la lechada o "peso" es basado en la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de la lechada} = \frac{\text{gr. cemento} + \text{gr. agua} + \text{gr. aditivo}}{\text{cm}^3 \text{ cemento} + \text{cm}^3 \text{ agua} + \text{cm}^3 \text{ aditivo}} \quad (4)$$

Para este cálculo veamos un ejemplo de aplicación.

EJEMPLO 3.- Determinar las densidades de una lechada de cemento con Puzzolan (Fl y Ash y Escoria) y otra de cemento solo.

* Según especificaciones A.P.I. un cemento es de buena calidad cuando la consistencia es de 11 poises.

DATOS

| Componentes | Absoluta Lb/pie ³ | Bruta Lb/pie ³ | Gravedad Específica $ca = \frac{abs.}{bruta}$ |
|--------------|---------------------------------|------------------------------|--|
| Fly Ash | 153.5 | 64 | 2.46 |
| Escoria | 154.7 | 84 | 2.80 |
| Cemento Puro | 195.8 | 62.4 | 3.14 |

Tomamos una relación agua cemento igual a 44%

Lechada de cemento con 50% de puzzolan por peso de cemento empleado.

Agua requerida para la lechada = 90% de H₂O por peso de puzzolan

1.- Densidad de la lechada de cemento con Fly Ash.

Preparar 1000 gramos de muestra (50% cemento + 50% de - puzzolan).

$$\frac{\text{Agua}}{\text{cemento}} = .44$$

La cantidad de agua para el puzzolan:

$$500 \times 0.90 = 450 \text{ ml.}$$

Para el cemento

$$500 \times 0.44 = 220 \text{ ml.}$$

La densidad de la lechada (L) será:

$$P_L = \frac{\text{gr.cemento} + \text{gr puzzolan} + \text{gr.H}_2\text{O cemento} + \text{gr.H}_2\text{O puzzolan}}{\text{cm}^3 \text{ cemento} + \text{cm}^3 \text{ puzzolan} + \text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cemento} + \text{cm}^3 \text{H}_2\text{O puzzolan}}$$

$$\text{gr H}_2\text{O cemento} = 220 \text{ cm}^3. \quad 1 \text{ gr/cm}^3 = 220 \text{ gr}$$

$$\text{gr H}_2\text{O puzzolan} = 450 \text{ cm}^3. \quad 1 \text{ gr/cm}^3 = 450 \text{ gr}$$

$$\text{cm}^3 \text{ cemento} = \frac{500}{3.14} = 159.23 \text{ cm}^3$$

$$\text{cm}^3 \text{ puzzolan} = \frac{500}{2.46} = 203.25 \text{ cm}^3$$

Reemplazando valores en la Ec. (4) se tiene:

$$P_L = \frac{500 + 500 + 220 + 450}{159.3 + 203.25 + 220 + 450}$$

$$\rho_L = 1.617 \text{ gr/cm}^3$$

2.- Densidad de la lechada de cemento con escoria.

$$\text{cm}^3 \text{ de puzzolan (Escoria)} = \frac{500}{2.80} = 178.57 \text{ cm}^3$$

Aplicando la Ec. (4) se obtiene:

$$\rho_L = \frac{500 + 500 + 220 + 450}{159.23 + 128.57 + 220 + 450}$$

$$\rho_L = 1.657 \text{ gr/c.c.}$$

3.- Densidad de la lechada para cemento solo.

Se escoge cualquier cantidad de muestra, por ejemplo - 800 gr de cemento,; también se escoge una relación agua-cemento.

$$\frac{\text{Agua}}{\text{cemento}} = .44$$

Con estos datos determino la cantidad de agua por peso de cemento:

$$\frac{352 \text{ cm}^3}{800 \text{ gr}} = .44$$

Volumen de agua por peso de cemento + 352 cm³

Mediante la ecuación (5) calculo la densidad:

$$\rho_L = \frac{\text{gr cemento} + \text{gr H}_2\text{O}}{\text{cm}^3 \text{ cemento} + \text{cm}^3 \text{H}_2\text{O}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{cm}^3 \text{ de cemento} = \frac{800}{3.14} = 254.7 \text{ cm}^3$$

$$\text{gr de H}_2\text{O} = 352 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ gr/cm}^3 = 352 \text{ gr.}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (5) se tiene:

$$\rho_L = \frac{800 + 352}{254.7 + 352}$$

$$\rho_L = 1.89 \text{ gr/cm}^3$$

Como se puede observar el aditivo puzzolan disminuye la densidad del cemento.



BIBLIOTECA

C A P I T U L O I I I

A C O N D I C I O N A M I E N T O D E L P O Z O
Y D E L L O D O D E P E R F O R A C I O N

FORMULACION DE PROGRAMAS.- Antes de acondicionar el pozo y el lodo de perforación debemos formular un programa adecuado de cementación, deben estudiarse concienzudamente el registro de microlog, así como los reportes de perforación y geológicos del pozo, si este es de desarrollo en una área ya conocida. Las cementaciones anteriores de los pozos vecinos pueden servir de referencia, sin que ello indique que todos los pozos de un mismo campo, deban programarse igual, basándose en patrones establecidos en un principio como se acostumbra en algunos casos.

Si el pozo es de exploración, deberán extremarse los cuidados a fin de asegurar una buena cementación.

El programa comprende los tipos, grados y pesos de tuberías a usarse, la calidad y clase de cemento y sus aditivos si lleva, el tipo de zapata y cople, el número de centradores y raspadores y por último la profundidad y duración de las circulaciones que han de hacerse.

La elección de tuberías se hace por medio de monogramas de fácil lectura, los cuales, conocida la profundidad total a que se va cementar la tubería, el diámetro de esta y el peso del lodo, nos dan el grado y peso, y la longitud máxima de cada tipo de tubería que se puede introducir con seguridad, sin que falle ni por tensión, ni por colapso (aplastamiento) o presión interior. A continuación se presenta un ejemplo de un programa de cementación.

EJEMPLO 4

Profundidad total del pozo... 9840 pies (3000 m)

TUBERIAS DE REVESTIMIENTO Y ACCESORIOS.-

PRIMERA OPERACION.- Diámetro del agujero 17 $\frac{1}{2}$ " hasta 984 pies.

T.R. 13 $\frac{3}{8}$ ", J-55, 54.5 Lbs/pie, cople corto de 0 a 984 pies

Equipo de flotación: zapata guía 13 $\frac{3}{8}$ "

10 centradores 13 $\frac{3}{8}$ " x 17 $\frac{1}{2}$ "

Cemento normal 27.5 Tons.

Lodo 10.43 Lb/Gal.

OBJETIVO DEL REVESTIMIENTO.- Instalar conexiones superficiales de control.

SEGUNDA OPERACION.-

Diámetro del agujero: 12 $\frac{1}{4}$ " hasta 6232 pies.

T.R. 9 $\frac{5}{8}$ ", N-80, 43.5 Lbs/pie, cople largo de 0 a 6.232 pies.

Equipo de flotación: zapata flotadora 9 $\frac{5}{8}$ ", cople flotador 9 $\frac{5}{8}$ ", 30 centradores de 9 $\frac{5}{8}$ " x 12 $\frac{1}{4}$ "

Cemento sin modificar 20 Tons.

Lodo 12.09 Lbs/Gal.

OBJETIVO DEL REVESTIMIENTO.- Aumentar el peso específico del lodo para continuar perforando y evitar pérdidas de circulación.

TERCERA OPERACION.-

Diámetro del agujero 8 $\frac{5}{8}$ " hasta 9840 pies.

T.R. 5 $\frac{1}{2}$ ", N-80, 20 Lbs/pie, cople largo de 0 a 1640 pies.

T.R. 5 $\frac{1}{2}$ ", N-80, 17 Lbs/pie, cople largo de 500 a 6560 pies.

T.R. 5 $\frac{1}{2}$ ", N-80, 20 Lbs/pie, cople largo de 6560 a 9840 pies

Equipo de flotación: zapata guía 5 $\frac{1}{2}$ ", cople diferencial 5 $\frac{1}{2}$ ".

30 centradores de 5 $\frac{1}{2}$ " x 8 $\frac{5}{8}$ "

90 raspadores de 5 $\frac{1}{2}$ " x 8 $\frac{5}{8}$ "

30 collares tope de 5 $\frac{1}{2}$ "

Cemento modificado 10 Tons.

Lodo: 13,34 Lbs/Gal.

Cubrir los horizontes productores y terminar el pozo.

Para calcular la densidad se procede como se anotó en el capítulo II Ejemplo 3. El volumen de cemento se determina como se verá en el capítulo IV inciso J. Es pertinente recalcar que este volumen de cemento debe calcularse para cada pozo en particular y no seguir la práctica de standardizar una determinada cantidad de sacos para todos los pozos de un mismo campo. La cuantiosa inversión hecha al perforar un pozo, muy bien justifica el estudio que se le haga para su cementación, ya que aunque aparentemente sea igual a los circunvecinos, siempre variará su diámetro y condiciones y la cantidad de cemento establecida puede muy bien alcanzar a cubrir las zonas deseadas e inclusive llegar mucho más arriba, o por el contrario ser insuficiente para el propósito. Lo anterior es para tuberías de explotación, las superficiales, así como las cortas (liners) se acostumbra a cementarlas en toda su longitud.

La elección de la zapata y el cople dependerá de las condiciones del pozo por lo general en las tuberías de explotación y de tuberías intermedias se usan zapatas de control de flujo o diferencial y cople de retención, principalmente en formaciones de presionadas, con alta permeabilidad o fracturadas; en la intermedia se usan zapatas flotadora y cople de retención o también cople diferencial y zapata guía. En casos necesarios se pueden utilizar para cementación de tuberías de explotación zapata y cople flotadores o zapata y cople diferencial. En la tubería superficial únicamente zapata, o zapata y cople dependiendo de la profundidad a que se va a realizar la cementación.

Los centradores y raspadores deben programarse en número suficiente a fin de que cubran todas las probables zonas productoras, teóricamente los centradores debería colocarse a lo largo de toda la columna cubierta por cemento para lograr

un anillo de espesor uniforme, sin embargo en la práctica no se hace así y únicamente se cubre con ellos 60 m (200 ft) arriba y abajo de la zona productora. La distribución de ellos se muestra en el diagrama anexo.

Algunas personas se muestran renuentes a usar los raspadores en zonas en que se han tenido pérdidas de circulación durante la primera perforación sin embargo hay que recordar que sello se forma del pozo hacia la formación, y como la acción limpiadora de los raspadores debido al ángulo de los alambres, alcanza únicamente las paredes del agujero sin penetrar en la formación, desprende solo el enjarre grueso, siendo este sustituido inmediatamente por una delgada película de lodo nuevo que es comprimido por la presión hidrostática, de ahí que no se presente el peligro de una nueva pérdida de circulación.

En las tuberías intermedias es conveniente dotar cuando menos los primeros 100 m (328 pies) con centradores y raspadores a fin de asegurar un buen armado en esta parte que es la más expuesta a los esfuerzos de torsión resultantes del par que provoca la barrena al perforar el cople, la zapata y el cemento que ha quedado entre ellos, llegando muchas veces a resquebrajar el cemento exterior y en algunas ocasiones hasta desconectar el primer tramo originando problemas muy difíciles de resolver por la imposibilidad de pescar el tubo o la zapata, teniendo que desviar el pozo e inclusive perderlo.

OPERACION.-

Una vez elaborado el programa de cementación y habiendo previamente revisado, medido, clasificado y numerado la tubería, se procede a instalar en ella los accesorios subsuperficiales, zapata, cople, centradores, raspadores y collares (collarines) tope, verificando su correcta distribución e instalación. Se revisan todas las partes del equipo de perforación, malacate, cable, bombas, etc., y se realizan los preparativos necesarios para la introducción de la tubería de re-

vestimiento, como la colocación de andamios, cambio de elevadores, etc.

Teniendo el agujero y el lodo en las mejores condiciones posibles, se comienza la introducción de la T.R. (para esta descripción consideremos la de explotación 6 $\frac{5}{8}$ "ⁿ). Los tres primeros tramos junto con la zapata y el cople es necesario conectarlos firmemente, para ello se utiliza un pegamento especial para roscas; los demás tramos únicamente van enroscados.

La operación se desarrolla en la siguiente forma: los tubos estibados en los muelles son rodados hacia la plataforma central, de donde, por medio del cable de maniobras son llevados al piso de la torre con el cople hacia arriba. Un collarín suspendido por medio de un cable de acero del ancho de la polea viajera, levanta el tramo hasta que queda sobre el cople del tubo que se encuentra ya dentro del agujero, suspendido de la mesa rotaria por unas cuñas de tijera, para enroscarlo se pueden utilizar 2 sistemas; en el primero que casi no se utiliza, se emplea un cable y dos llaves de quijada que son accionadas por el cable del retorno del malacate, el segundo usado extensamente por las grandes ventajas que presenta sobre el primero, se emplea una llave motriz independiente accionada hidráulica o neumáticamente, con esta llave se consigue apretar uniformemente todas las conexiones de la tubería según especificaciones A.P.I., se ahorra tiempo y es menos peligrosa para los operarios.

Una vez que ha quedado enroscado el tubo, se baja con un elevador sencillo, hasta que quede su cople unos 2 pies arriba de la mesa rotaria, en donde permanece sostenido listo para recibir el siguiente tramo.

Al llevar metidos unos 50 o 60 tramos, se hace el cambio de las cuñas de tijera por un bloque de cuña más resistente

te; el elevador sencillo también se subituye por uno más fuerte y de mayor capacidad de carga, provistos de cuñas que son las que van a soportar ahora el peso de la tubería al ir la bajando, liberando así al cople de ese esfuerzo.

La introducción se continúa en igual forma, revisando cada tubo, lubricando las roscas con grasa, llenando completamente con lodo la tubería cada 20 tramos cuando se utiliza zapata flotadora, etc.

El acondicionamiento del pozo y el lodo comprende las operaciones siguientes: limpieza de las paredes del agujero del enjarre del lodo; colocación de la tubería de revestimiento a la profundidad deseada, sin dañar las formaciones, y homogeneización del lodo, hasta dejarlo en condiciones para efectuar la cementación. La corrida de tubería en el pozo y el programa de circulación de lodo, se consideran puntos claves para el acondicionamiento del pozo y lodo de perforación.

III.1.- COLOCACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.-

Durante la colocación de la tubería de revestimiento la presión que actúa en el fondo del pozo es alterada substancialmente. Esta alteración se debe al movimiento simultáneo de la tubería y lodo de perforación dentro del agujero. Las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del pozo, al bajar la tubería, pueden originar pérdidas de circulación de fluidos y que la tubería se pegue debido a la sedimentación de las partículas sólidas.

El aumento de presión es función directa de la velocidad alcanzada por la tubería, que a su vez dependerá del tiempo empleado en su introducción. Por lo tanto, existirá un tiempo mínimo que permita meter la tubería al pozo sin peligro de dañar la formación productora.

La presión total instantánea que actúa en el fondo del pozo, al introducir la tubería de revestimiento, es igual a -

la suma de: la carga hidrostática debido al peso de la columna de fluidos en el espacio anular, las pérdidas de presión - debidas a la fricción entre la tubería y los fluidos (considerando que tanto la tubería como los fluidos están en movimiento) y la presión que es necesaria comunicar a los fluidos para vencer su inercia y permitir su desplazamiento. El lodo es desplazado y derramado en la superficie debido al volumen ocupado por la tubería.

Las velocidades alcanzadas al bajar un tramo de revestimiento, en un tiempo de 10 segundos, se representan gráficamente por la curva (1) que aparece en la fig. 5, la cual puede considerarse representativa para el caso de colocación de tuberías de 6⁵/₈" a profundidades mayores de 5000 ft (1500 m). La curva (2) muestra las aceleraciones correspondientes a las velocidades aludidas. Se observa que la aceleración máxima - se alcanza inmediatamente después de iniciado el movimiento. Las disminuciones bruscas en la curva de aceleración son debidas a que el operador aplica sucesivamente el freno del equipo, ocasionando cambios en la velocidad. La velocidad sigue aumentando hasta alcanzar un máximo a los cuatro segundos, instante en que, por efecto del freno, la aceleración pasa por - valores negativos, dando lugar a que la velocidad se reduzca hasta la detención total del movimiento al cabo de 10 segundos.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO.-

A continuación se indica, en forma de pasos, el procedimiento para determinar las presiones de fondo instantáneas de sarrolladas durante la colocación de la tubería (9)

a.- Calcúlese la velocidad crítica del fluido de perforación en el espacio anular, mediante la ecuación siguiente:

$$V_c = \frac{8.07 u_p + 8.07 \sqrt{u_p^2 + 1.65 Y_b \rho' (d_h - d_o)^2}}{\rho' \text{ de}} \quad (6)$$

Donde:

$$de = dh - do \quad (7)$$

Esta velocidad es máxima que puede imponerse al lodo de perforación dentro de un régimen de flujo laminar.

b.- Por medio de la ecuación (6), determínese la velocidad equivalente del fluido en el espacio anular y c compárese con la velocidad crítica determinada en el paso anterior, con el propósito de definir el tipo de flujo prevaleciente.

$$Ve = vt \left(\frac{do^2}{dh^2 - do^2} + \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

Si: $Ve > Vc$, el régimen de flujo se considera turbulento.

Si: $Ve < Vc$, el régimen de flujo se considera laminar.

La ecuación (8) se utiliza para cuantificar la velocidad ascendente de un fluido en el espacio anular, cuando la pared interna que define dicho espacio está en movimiento descendente.

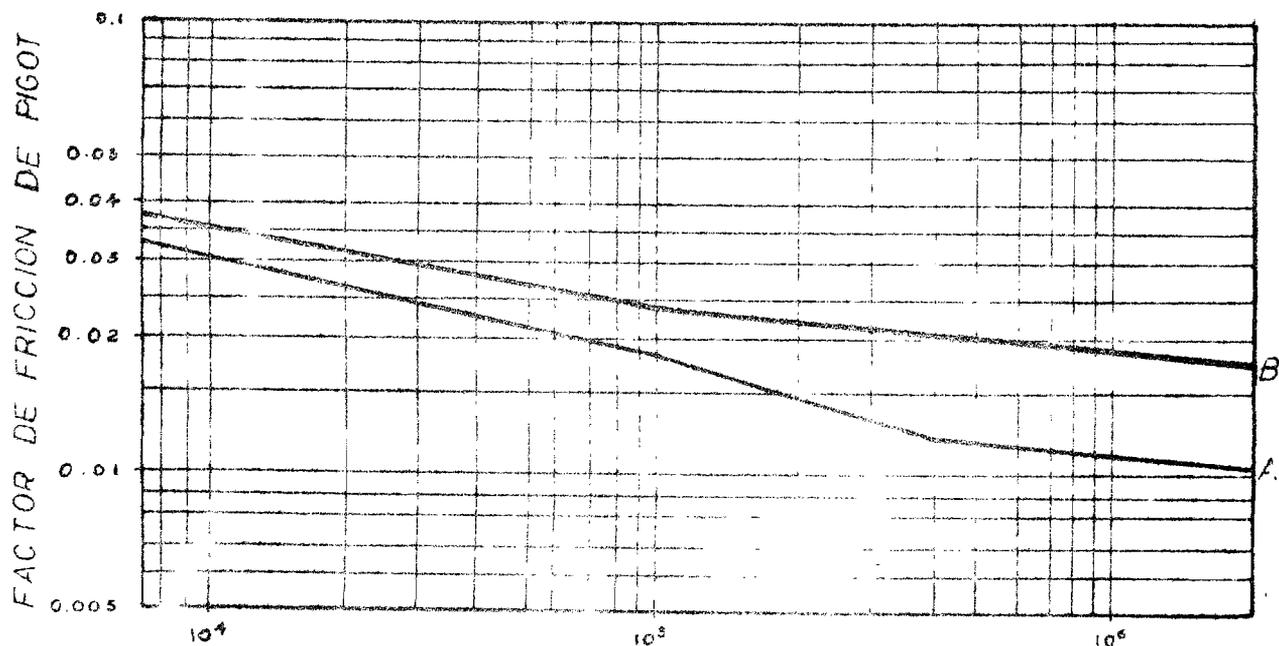
Si el régimen de flujo prevaleciente es turbulento continúese con el inciso (c); si es laminar, continúese con el (d)

c.- Si el flujo es turbulento, calcúlese el número de Reynolds para la velocidad de la tubería, empleando la ecuación (9).

$$N_{Re} = \frac{396 de \rho' vt}{\mu_p} \left[\frac{Dt}{Lt Aa} + \frac{Ap}{Aa} + 0.181 \right] \quad (9)$$

Con el número de Reynolds obtenido y por medio de la fig. 6 (8) obténgase el factor de fricción correspondiente.

d.- Calcúlese las pérdidas de presión por fricción para el régimen de flujo prevaleciente por medio de las ecuaciones siguientes:



NUMERO DE REYNOLDS



BIBLIOTECA

A.- EN LA TUBERIA

B.- EN EL ESPACIO ANULAR

FIG. 6.- FACTOR DE FRICCION -VS-NUMERO DE REYNOLDS.

(11)

PARA USARSE CON LA ECUACION DE PIGOTT EN FLUJO TURBULENTO

(D

(DE : DRILLING AND PRODUCTION PRACTICE A.P.I., 1941, R.J.S.

PIGOTT.)

Para flujo turbulento:

$$p'f = \frac{1296 \times 10^{-6} \rho_L \rho^2 Vt^2}{d_e} \left[\frac{Dt}{LtAa} + \frac{Ap}{Aa} + 0.181 \right]^2 \dots(10)$$

Para flujo laminar:

$$p'f = \frac{LYb}{225d_e} + \frac{\rho_p Lvt}{1500(dh-d_o)^2} \left[\frac{Dt}{LtAa} + \frac{Ap}{Aa} + 0.46 \right] \dots(11)$$

e.- Calcúlese la presión necesaria para vencer la inercia del lodo de perforación, utilizando la ecuación siguiente:

$$Pac = 2155 \times 10^{-7} \rho^2 L a_t \left[\frac{Dt}{Lt Aa} + \frac{Ap}{Aa} \right] \dots\dots\dots(12)$$

f.- Cuantifíquese la carga hidrostática debida al peso de la columna de fluidos en el espacio anular empleando la ecuación:

$$Pha = 0.007 \rho^2 D^2 \dots\dots\dots(13)$$

g.- Determinese la presión total instantánea que actúa en el fondo del pozo, por medio de la ecuación siguiente:

$$Pw = p'f + Pac + Pha \dots\dots\dots(14)$$

La velocidad y aceleración de la tubería, que intervienen en la secuela de cálculo descrita anteriormente son: respectivamente la velocidad máxima alcanzada y la aceleración correspondiente. Sus valores se obtienen de registros semejantes al presentado en la fig. 5

EJEMPLO 5

Calcúlese la presión instantánea que actúa en el fondo de un pozo, al introducir tubería de 6⁵/₈, N-80, 28 Lb/pie, cople largo, rango 3 y provista de equipo de flotación, en agujero de 8⁵/₈". Se tienen además los siguientes datos:

| | |
|--|-------------------------|
| Longitud por tramo de tubería de revestimiento | 40 pies |
| Desplazamiento por tramo | 9.61 pies |
| Densidad del lodo | 112 lb/pie ³ |
| Viscosidad plástica del lodo | 35 cp* |

* Para determinación de estos parámetros consúltese el Apéndice

ce l.

Punto cedente de Bingham

15 Lb/100 pie²⁺

Profundidad del pozo

9.840 pies

Considerando que la fig. 5 es un registro típico de velocidades, se tiene:

Velocidad máxima de la tubería

7 pies/seg.

Aceleración de la tubería

0.5 pie/seg²

Tiempo empleado para introducir un tramo de tubería... 10 seg.

En vista de que la máxima presión instantánea ocurre - cuando se alcanza la velocidad máxima al introducir la tubería, el ejemplo se resolverá para esas condiciones, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

a.- Velocidad crítica del fluido de perforación

$$V_c = \frac{8.07 \times 35 + 8.07 \sqrt{35^2 + 1.65 \times 112 \times 15 \times 4}}{112 \times 2}$$

$$= 5.2 \text{ pies/seg}$$

b.- Velocidad equivalente del fluido en el espacio anular.

$$V_e = 7 \left(\frac{43.89}{30.46} + \frac{1}{2} \right)$$

$$= 13.58 \text{ pies/seg.}$$

Se observa que la velocidad equivalente del fluido en - el espacio anular es mayor que la velocidad crítica. Por lo tanto, las pérdidas de presión deben calcularse para un régimen turbulento.

c.- Número de Reynolds y factor de fricción

$$NR_e = \frac{396 \times 2 \times 112 \times 7}{35} \left[\frac{961}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right]$$

$$NR_e = 28740$$

De la fig. 6 se obtiene: $f = 0.030$

d.- Pérdidas de presión por fricción

$$f = \frac{1296 \times 10^{-6} \times 0.03 \times 9840 \times 112 \times 49}{2} \left[\frac{961}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right]$$

$$= 2771,460 \text{ Lb/pg}^2$$

e.- Presión necesaria para vencer la inercia del lodo de perfección.

$$Pac = 2155 \times 10^{-7} \times 112 \times 9840 \times 0.5 \left[\frac{961}{40 \times 0.1663} + 0 \right]$$
$$= 170,96 \text{ Lb/pg}^2$$

Presión hidrostática

$$Ph = 0.007 \times 112 \times 9840$$
$$= 7714.56 \text{ Lb/pg}^2$$

g.- Presión instantánea que actúa en el fondo del pozo.

$$Pw = 2771.46 + 170.96 + 7714.56$$
$$= 10656.98 \text{ Lb/Pg}^2$$

El gradiente de presión instantánea para las condiciones del problema es:

$$G_p = \frac{Pw}{D'} = \frac{10656.98}{9840}$$
$$= 1.08 \text{ Lb/pg}^2/\text{pie}$$

Un gradiente de presión instantáneo de 1.08 Lb/Pg²/pie es capaz de fracturar cualquier tipo de formación como puede verse en la fig. 1. Con frecuencia, durante la introducción de la tubería en el pozo, se originan fracturas en las formaciones, las cuales en algunos casos, pueden conducir a pérdidas de circulación durante la cementación.

La solución gráfica del procedimiento descrito en la sección anterior. Se presenta en la fig. 7⁽⁹⁾. Su uso se ilustra en el ejemplo siguiente:

EJEMPLO 6.-

Determinar el tiempo en que debe introducirse una tubería de revestimiento de 6⁵/₈" , rango 3, provista con equipo de flotación, en un pozo de 8⁵/₈" y 3000 m. de profundidad. - Longitud de tubería dentro del pozo: 2000 m. La densidad del lodo de perforación es de 1.3 gr/cm³ y la presión de fractura de la formación es de 445 Kg/cm².

La presión de factura de la formación se determinó a partir de la fig. 1. Esta figura fue elaborada considerando

condiciones medias en las características de las rocas y es aplicable para el caso de formaciones que yacen a profundidades mayores de 1000 m.

Haciendo referencia a la fig. 7: con la profundidad del pozo (3000 m.) y la densidad del lodo (1.3 gr/cm^3) se define el punto (a). Desde (a) y desplazándose paralelamente al eje de profundidad, se localiza (b) en la intersección con la vertical levantada desde la presión total del fondo (445 Kg/cm^2). Prosígase horizontalmente hasta (c) y de aquí, continúese según las curvas que sirven como guías hasta cortar el eje de longitud de tubería dentro del pozo (2000 m.), punto (d). Obtén gase (e) trazando una horizontal desde (d) hasta la densidad del lodo (1.3 gr/cm^3). Bajando una vertical desde (e) se determina un tiempo de introducción por tramo de 14 segundos.

Procediendo en forma análoga a la descrita en el párrafo anterior, se obtienen los resultados siguientes:

| Longitud de tubería de revestimiento dentro del pozo (m) | | Tiempo mínimo de introducción por tramo (seg.) |
|--|------|--|
| de | a | |
| 0 | 1000 | 10.0 |
| 1000 | 1500 | 12.0 |
| 1500 | 2000 | 14.0 |
| 2000 | 2500 | 16.0 |
| 2500 | 3000 | 17.0 |

DISCUSION.-

La solución gráfica, aquí presentada, para determinar el tiempo de introducción de la tubería de revestimiento, permite la evaluación de este factor en forma rápida y sencilla.

Por la esencia de las ecuaciones utilizadas, en el desarrollo del procedimiento, la solución gráfica no es aplicable en aquellos casos en que el fluido dentro del pozo no se comporte como tipo plástico Bingham, esto es, cuando el fluido de control fuese: agua salada, diesel o aceite estabilizado.

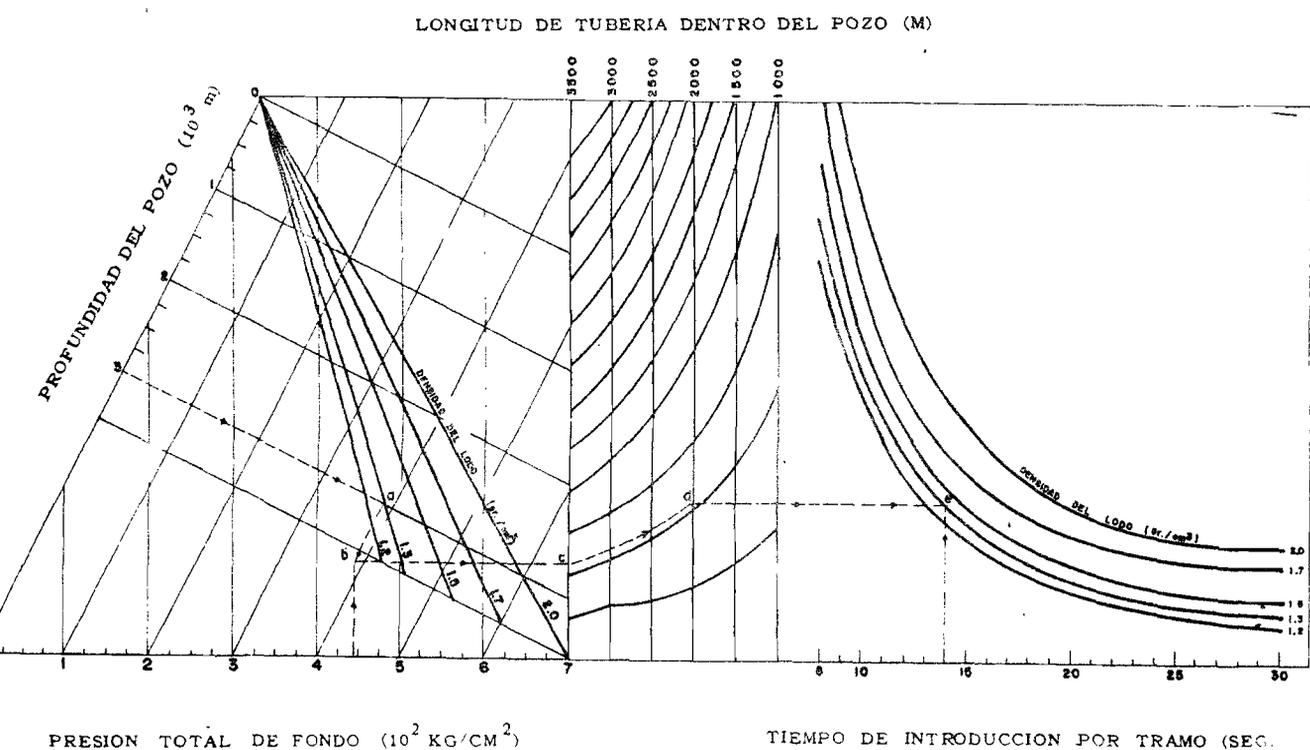


FIG. 7.- GRAFICO PARA DETERMINAR EL TIEMPO MINIMO POR TRAMO, REQUERIDO PARA INTRODUCIR TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 6 5/8" EN AGUJERO DE 8 5/8", SIN FRACTURAR LA FORMACION.

(DE : REVISTA DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO, ABRIL DE 1969; ING. R. O. POBLANO, Y A. ACUÑA).

Hay que tener presente que el tiempo obtenido con la - fig. 7 corresponde al tiempo máximo requerido para fracturar una formación; ya que se parte de la presión de fractura de dicha formación.

Teniendo como dato el tiempo de introducción por tramo de tubería de revestimiento puede determinarse por medio de - la gráfica 7, la presión total impuesta en el fondo del pozo.

Analizando las ecuaciones 10, 11 y 12 que intervienen en el cálculo de las presiones instantáneas, se observa que son directamente proporcionales a las velocidades de la tubería en el pozo e inversamente al área de flujo del espacio anular. Por lo tanto el problema "presiones instantáneas" puede atenuarse en tres formas diferentes:

- a.- Introduciendo la tubería en el pozo, a una velocidad inferior a la necesaria para ocasionar un gradiente de presiones instantáneas, capaz de fracturar las formaciones expuestas en el agujero.
- b.- Programando los diámetros de agujeros y tuberías en tal forma que se obtengan mayores áreas de flujo en el espacio anular.
- c.- Utilizando coples y zapatas de control de flujo o - diferenciales, que permitan llenar la tubería simultáneamente con su introducción al pozo. De esta manera, se disminuye el gasto medio de fluido desplazado y se reducen las pérdidas de presión por fricción.

La solución más aceptable, desde el punto de vista económico y de ingeniería, consiste en la aplicación combinada - de las formas indicadas en a y c. El costo extra que origina la introducción de tubería a una velocidad adecuada y provista de zapata diferencial, está muy por debajo del ocasionado cuando surgen problemas a consecuencia de las presiones ins-

tantáneas desarrolladas en el fondo del pozo.

III.2.- PROGRAMA DE CIRCULACION.- Durante la introducción de la tubería de revestimiento, es necesario circular periódicamente, con la finalidad de mantener el lodo en buenas condiciones, eliminando los probables puentes que se hayan formado con la acumulación de los recortes y el enjarre desprendido, estos forman restricciones en el agujero que tienden a elevar la presión de circulación. Se recomienda circular cada vez que se introduzcan de 25 a 30 tramos, procurando que, durante las etapas programadas de circulación, la zapata de la tubería quede frente a zonas densas. Con esto se reduce la posibilidad de inducir pérdidas de lodo frente a zonas permeables ya que si se tienen zonas permeables a profundidades mayores, el lodo que se encuentra en estado gelatinoso amortiguará la presión comunicada a los fluidos al iniciar la circulación. Por otra parte, la existencia de zonas permeables arriba de la zapata no presentará dificultad alguna, en vista de que a esas profundidades, la columna de lodo ya ha sido homogeneizada y fluye fácilmente. Una vez alcanzada la profundidad a la que se llevará a cabo la cementación, se procede a efectuar la última etapa de circulación, imprimiéndole simultáneamente a la tubería, un movimiento vertical alternado, con el propósito de que actúen los raspadores, Esta etapa se prolongará el tiempo mínimo necesario para dejar el lodo, limpio de los residuos desprendidos de la pared del agujero por acción de los raspadores, generalmente bastan de 1¹/₂ a 2 horas.

En las tuberías superficiales e intermedias, se acostumbra a circular únicamente en el fondo antes de proceder a cementar; también se puede aplicar el criterio arriba mencionado cuando las condiciones así lo requieren.

Cuando la tubería de revestimiento no quede centrada en

el agujero, se recomienda combinar el movimiento vertical y alternado con movimiento rotatorio. La ventaja que presenta el movimiento rotatorio se muestra gráficamente en la fig. . . En (a) se muestra la distribución de velocidades en el espacio anular, durante el desplazamiento cuando el movimiento im puesto a la tubería es vertical y alternado, indicándose una zona l que permanece inmóvil. En (b), (c) y (d) se observa - como el lodo que en (a) permanecía inmóvil, es arrastrado por efecto del movimiento rotacional de la tubería.

OPERACION.-

Al llegar a la profundidad marcada por el programa para la primera circulación, se conectan en el extremo superior de la tubería un niple en forma de campana, cerrado por la parte superior.

Este niple tiene una entrada lateral en la cual se conecta la manguera de perforación. Se bombea lodo a través de ella, procurando que la presión inicial de bombeo sea lo más - bajo posible, hasta que toda la columna de lodo se haya pues to en movimiento, incrementándose después gradualmente. Se - toman lecturas del peso y viscosidad del lodo tanto en la salida como en la entrada para verificar su estado. La tubería no deberá moverse, excepto si se tiene resistencia o no se - consiga circulación franca, a fin de no desgastar prematuramente los raspadores antes de llegar a la zona productora.

Las otras circulaciones programadas, se llevan a cabo - en igual forma, hasta llegar a la última ya en el fondo, y pa ra la cual en vez del niple se instala la cabeza de cementación en el último tramo; antes de conectar este último tramo es conveniente llenar completamente con lodo la tubería, para que el volumen de aire que quede dentro de ella sea mínimo y no ocasione problemas de pérdidas de circulación o propicie - brotes súbitos (reventones). Así mismo no deberá bajarse la

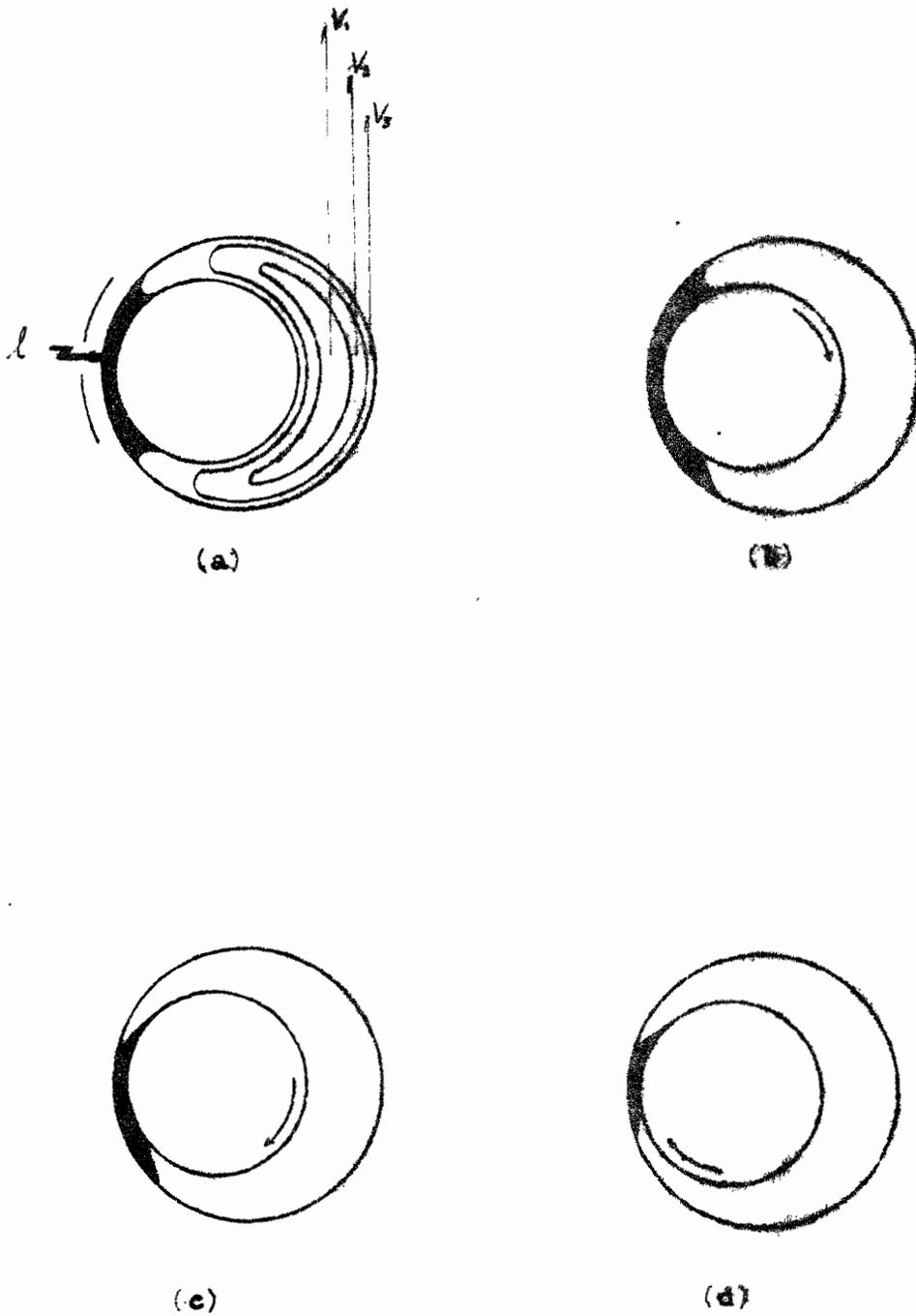


FIG. 8.- EFECTO DEL MOVIMIENTO ROTACIONAL DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DEL LOBO DE PERFORACION.

tubería para tocar el fondo, hasta no tener una circulación franca, para evitar que el asentamiento de barita que generalmente hay en el fondo de los pozos atrape la zapata y "pegue" la tubería o dificulte la circulación .

Se comienza a mover la tubería para quitar el exceso de enjarre en las zonas productoras, con los raspadores, con los raspadores subiendola y bajandola una distancia de 6 pies, - que aumentará gradualmente hasta llegar ser igual a la longitud de un tubo, este movimiento debe ser lento, del orden de 1.5 a 3 minuto por viaje completo. Las lecturas en el indicador de peso nos dan una idea del estado del agujero. una gran diferencia entre el peso de la tubería subiendo y el peso bajando, será indicio de que hay fricción entre la tubería y las paredes del agujero, normalmente la diferencia de lecturas es de 10 a 15% respecto una de la otra estando la tubería libre. Cuando tenemos ya esta condición, es decir, la diferencia de lectura es baja y constante y el lodo ya no deposita recortes en la criba vibratoria, ni está gasificando y su peso es casi igual a la entrada y a la salida, se da por terminada la circulación,

Se cierran las válvulas del circuito de las bombas del equipo de perforación y se abren las de las líneas de equipo - cementador de alta presión, este introduce el primer tapón de desplazamiento (el perforable) colocando a continuación una solución de lavado, comunmente denominada dispersante de arcillas, cuya función es lavar las paredes del espacio anular. - El volumen necesario de esta solución varía entre 10 y 50 bls., dependiendo del tipo de solución, diámetro del espacio anular, intervalo a cementar y de la base del lodo de perforación, - Así cuando se utiliza agua sola, se recomienda un volumen de 50 Bbls. a menos que esta reduzca considerablemente la carga hidrostática.

Para el lavado de paredes del espacio anular que han estado en contacto con lodos de emulsión inversa, es conveniente usar la técnica siguiente:

1.- Colocar, enseguida del primer tapón de desplazamiento y con el propósito de efectuar un lavado inicial en el espacio anular, 10 barriles de cualquiera de los siguientes solventes para aceite y asfalto.

Aceite Diesel

Kerosene

Disulfuro de Carbono

Benzeno

Tolueno

Xileno

Aunque el disulfuro de carbono es el más efectivo, el bajo costo del aceite diesel o de la kerosene hacen más práctico su empleo.

2.- Colocar, a continuación del solvente aludido en (1), 10 barriles de cualquiera de los siguientes solventes para agua y aceites:

Etilen glicol-monometil éter

Etilen glicol-monoetil éter (Etil - cellosolve)

Etilen glicol-monobutil éter (Butil - cellosolve)

Alcohol Isopropílico

Alcohol butil terciario

Dietilen glicol-monoetil éter.

De éstos, el más efectivo es el etilen glicolmonobutil éter (Butil-Cellosolve).

3.- Colocar la lechada de cemento inmediatamente atrás del segundo bache de solvente.

El cemento es mezclado (vease capítulo I, inciso -

I.2.2.3.) con el agua y los aditivos que lleve y bombeado al pozo según la técnica seleccionada como se verá en el siguiente capítulo.

El peso de la lechada se verifica constantemente durante toda la operación, para mantenerlo lo mas uniforme posible de acuerdo al programa.

Terminada la mezcla y el bombeo del cemento, se saca el perno que sujeta el tapón sólido de hule en la cabeza de cementación, se cierra su entrada inferior y se abre la superior. Con las bombas del equipo de perforación, se bombea lodo y se desplaza el cemento hasta el espacio anular. La llegada del tapón al cople de retención se advierte por un incremento brusco en la presión, se comprueba también por el número de emboladas que fueron necesarias para desplazar el cemento, comparandolas con las calculadas teóricamente para llenar el volumen interior de la tubería de revestimiento descontando el tramo entre la zapata y el cople y tomando en cuenta la eficiencia de la bomba.

Hasta no llegar el tapón al cople, la tubería no debe de dejar de moverse siendo conveniente inclusive, si las condiciones lo permiten, moverla todavía otros 15 o 20 minutos más, a fin de liberar la lechada del exceso de agua y eliminar las bolsas de agua que perjudican grandemente su resistencia.

A continuación se presenta un ejemplo en el que ilustra el calculo del tiempo de llegada del tapón al cople de retención.

EJEMPLO 7

Calcúlese los tiempos de llegada de los tapones a los coples en una cementación por etapas (de 2 etapas) de una tubería de revestimiento de 7 5/8" combinada N-80 de 33.7, C.L.* y 39.0 Lb/pie E.L**.; P-110 de 33.7 y 39.0 Lb/pie E.L., llevando cople D.V. a 7858.88 pies. Se tienen además los si-

güientes datos:

| | |
|---------------------------|-------------|
| Diametro del agujero | 9 1/2" |
| Profundidad del pozo | 11.476 Pies |
| Longitud del primer tramo | 37.45 Pies |

T . R. introducida

| | | |
|---|----------|------|
| (1) 56 Tramos de P-110, 39 Lb/pie, E.L. | 2.283 | pies |
| (2) 53 Tramos de P-110, 33.7 Lb/pie, E.L. | 2.049 | pies |
| (3) 1 Cople D.V. y combinaciones | 3.38 | pies |
| (4) 18 Tramos de N-80, 33.7 Lb/pie, E.L. | 707.59 | pies |
| (5) Combinación | 1.11 | pies |
| (6) 133 Tramos de N-80, 33.7 Lb/pie, C .L.* | 5.356.73 | pies |
| (7) 26 Tramos de N-80, 39 Lb/pie, C.M. | 1.066 | pies |
| Zapata guia | 1.70 | Pies |
| Cople Diferencial | 2.17 | Pies |
| Combinación E.L. a 8 H*** | 0.56 | ' ' |
| Cople D. V. | 2.17 | ' ' |
| Combinación 8 H a E.L.** | 0.65 | ' ' |
| Combinación E.L. a 8 H | 1.11 | ' ' |

A la longitud (1) hay que restarle el primer tramo entre la zapata y el cople; o sea, que queda:

$$(1) \quad 2.283 - 37.45 = 2.245.55 \text{ pies}$$

Luego en la tabla Halliburton sección 210 se determina las capacidades de las tuberías de acuerdo a sus características:

| | | |
|-----------------------------|--------|----------|
| Capacidad (1) | 0.0426 | Bbls/pie |
| Capacidad (2) (3) (4) y (5) | 0.0445 | Bbls/Pie |
| Capacidad (6) | 0.0445 | Bbls/Pie |
| Capacidad (7) | 0.0426 | Bbls/Pie |

* Cople largo

** Extreme line

*** 8 hilos . Esta combinación se usa para unión de extreme line a Cople Largo.

Cálculo del volumen de lechada de cemento para desplazar.

Primera etapa:

$$2.245.55 \text{ pies} \times 0.0426 \text{ Bbls/Pie} = 95.6 \text{ Bbls.}$$

$$\text{Longitud (2), (3), (4) y (6)} = 8.117.81 \text{ Pies}$$

Volumen de lechada de cemento.

$$8.117.81 \text{ Pies} \times 0.0445 \text{ Bbls/Pies} = 361.2 \text{ Bbls.}$$

$$1.066.00 \text{ Pies} \times 0.0426 \text{ Bbls/Pie} = 45.4$$

$$\text{Volumen necesario para desplazar} = 95.6 + 361.2 + 4 = 502.2 \text{ Bbls.}$$

Segunda etapa: Esta etapa es despues del cople D.V.* hacia la superficie.

$$\begin{aligned} \text{Longitud de (4), (5) y (6)} &= 705.59 + 1.11 + 5.356.73 \\ &= 6.065.43 \text{ Pies.} \end{aligned}$$

$$6.065.43 \times 0.0445 = 269.80$$

$$1.066.00 \times 0.0426 = 45.40$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen necesario para desplazar} &= 269.80 + 45.40 = 315.20 \\ &\text{Bbls.} \end{aligned}$$

Tiempo para desplazar la lechada de cemento.

Para conocer este tiempo hay que conocer el tipo de bomba, para desplazar. Para esta operación se utilizaron las bombas del equipo eléctrico EMSCO.

Bomba de Potencia Serie 83 de

rendimiento con suministro máximo de 1350 H.P. y 60 ca-
rreras/minuto del piston.

Diametro de la camisa (liner): 7 1/2", 7", 6 1/2", 6"

Presión en Lb/Pg² : 2.669, 3123, 3706, 4474

Primera Etapa

Para desplazar la lechada mediante el segundo tapón de hule se utilizaron 2 bombas del tipo arriba señalado y con una camisa de 6 1/2" y con una carrera del pistón de 18".

Se escoge una eficiencia de 85% (esto depende de la condiciones de la bomba y del criterio del Ingeniero) y se deter

mina los ciclos por barriles de esta en la tabla Halliburton (Halliburton Cementing Tables) en la sección Duplex Pump Delivery Tables (o cualquier otro manual de cementaciones de T. R.) y se tiene:

5.16 ciclos/Bbbs

Se cuenta el número de emboladas en un minuto (ciclos-minuto) cuando se está desplazando el cemento:

En este caso: 42 ciclos/minuto.

Como se usaron dos bombas se tiene:

84 ciclos/minuto

Con estos datos determino el tiempo de llegada del tapón al cople:

$$\frac{502.2 \text{ Bbbs.} \times 5.16 \text{ Ciclos/Bbbs}}{84 \text{ ciclos/minuto}} = 30 \text{ minutos}$$

Se deja caer una bola de bakelita antes de efectuar la cementación, con el fin de transformar el cople diferencial en flotador y evitar de esta forma que el cemento se regrese a la tubería.

Se bombea 1.0 metro cúbico de ácido M.C.A. (Mud Clean Acid) al 5% antes del segundo tapón.

Las bombas registraron una presión de 2180.5 Lb/Pg² con la llegada del tapón hasta el cople.

Aunque el cemento debe ser desplazado tan rápidamente como sea posible, se debe recordar que solo se requiere cierta presión para romper la formación, de manera que la presión de desplazamiento debe mantenerse a un mínimo. Tampoco debe permitirse que el tapón superior golpee al cople flotador (para esto se calcula el tiempo de llegada del 2º tapón al cople). Esto ha sido causa a veces de una falla por tensión en la tubería que se está cementando.

Segunda Etapa:

Aquí se utiliza una sola bomba de las mismas características de las mencionadas en la primera etapa.

Para realizar esta segunda etapa se suelda una bala - (bomba) desde la cabeza de cementación para abrir los orificios del cople D.V., y poder efectuar la segunda etapa de cementación. Esta bomba se deposita en el fondo del cople y es perforable.

También se puede calcular el tiempo de llegada del tapón superior al cople utilizando distintas eficiencias de la bomba y que sirve para chequear este tiempo.

Número de ciclos de la bomba en un minuto cuando se está desplazando el cemento

= 60 ciclos/minuto

Eficiencia = 85% ; $\frac{315.20 \text{ Bbls.} \times 5.16 \text{ ciclos/Bbls.}}{60 \text{ ciclos/min.}}$ =
= 27' 12"

Eficiencia=90% ; $\frac{315.20 \text{ Bbls.} \times 4.9 \text{ ciclos/Bbls}}{60 \text{ ciclos/min.}}$ =
= 26' 48"

Eficiencia = 95% ; $\frac{315.20 \text{ Bbls} \times 4.6 \text{ ciclos/Bbls}}{60 \text{ ciclos/min.}}$
= 24' 18"

El tiempo que demoró en llegar el tapón superior fue de 28 minutos.

Esta cementación por etapa es con el fin de:

- a.- Cubrir un horizonte posiblemente productor a 7763 - pies.
- b.- Evitar gastos inútiles de cemento.
- c.- Ya que en ciertos casos de cementación se requiere el flujo turbulento para que sea buena la cementación; en este caso que se va a cementar tramo tan largo - bien puede ocurrir flujo lineal y la cementación se echaría a perder, ya que lo que se busca es una buena adherencia entre el cemento y T.R. y la formación; en caso de flujo lineal no se va a lograr.

Hay varios criterios acerca de la presión que debe dejar

se en la tubería actuando sobre el tapón, algunos técnicos prefieren dejar una presión igual a la máxima obtenida durante el desplazamiento para equilibrar las columnas hidrostáticas dentro y fuera de la tubería de revestimiento, ayudando así al equipo de flotación por si fallara, una gran mayoría considera que es insuficiente conservar una presión de 500 Lb/pg^2 como medida de seguridad, se recomienda no dejar ninguna, por las siguientes razones: si se deja una gran presión esta se incrementará todavía más debido al calor que libera el cemento al fraguar, pudiendo llegar en casos extremos a producir pequeñas perforaciones en la tubería (expansión y alargamiento) si el cemento fragúa sobre la tubería deformada, ésta quedará sobrefatigada y tenderá a recuperar su longitud original al descargarse la presión, si el cemento quedó canalizado o no tiene suficiente resistencia puede resquebrajarlo. Por otra parte - si se ha usado un buen equipo de flotación, no hay porque temer que falle.

Así mismo la tubería debe quedar suspendida del elevador y no sentadas en las cuñas de la mesa rotatoria, no debiendo moverse en un tiempo mínimo de 18 a 24 horas tiempo necesario para que fragüe el cemento.

El registro de temperatura que es un auxiliar muy valioso para determinar la cima del cemento y evaluar aunque relativamente la calidad de la cementación, se toma de 12 a 18 horas después de iniciado el fraguado. Se basa en la reacción exotérmica producida por el cemento al fraguar, conocido el gradiente geotérmico para un área en particular, se compara con la línea de incremento de temperatura registrada en el pozo, desde la superficie tienen igual valor las dos pendientes, hasta llegar a un punto en que se separan bruscamente correspondiendo este nivel a la cima del cemento, de ahí en adelante la línea de incremento de temperatura del cemento continúa parale

la a la pendiente del Gradiente Geotérmico teniendo solo pequeños altibajos que corresponden a zonas en los que hubo - exceso de cemento (agujero ensanchado, cavernas o formaciones que admitieron cemento) o que faltó (canalizaciones por puentes o derrumbes, etc.,).

C A P I T U L O I V

D I S E Ñ O D E L A C E M E N T A C I O N

En el diseño de una mezcla de cemento deberán considerarse factores tales como: densidad, viscosidad, control de pérdida de fluido, esfuerzo a la compresión, tiempo de bombeabilidad y algunas otras condiciones particulares. Es opinión generalizada que para un cemento cumpla con su objetivo, deberá llenar los siguientes requisitos:

- 1.- La lechada deberá ser fácilmente bombeable para colocarse en la posición deseada con el equipo disponible.
- 2.- El cemento fraguado deberá adquirir una resistencia a esfuerzos de compresión mínima necesaria y suficiente adherencia para hacer un sello positivo entre la tubería de revestimiento y la formación.
- 3.- Deberá ser químicamente inerte a cualquier formación y fluidos de la misma con los que esté en contacto.
- 4.- Deberá ser estable para no deteriorarse o perder sus propiedades en el transcurso del tiempo.
- 5.- Deberá ser impermeable para no permitir el flujo de fluidos indeseables a través de él.

Antes de efectuar una cementación es aconsejable someter a la lechada a pruebas de laboratorio o condiciones simuladas de presión y temperatura, siguiendo las normas API, con el objeto de conocer su comportamiento y remediar cualquier divergencia con las condiciones que se necesitan. La práctica recomendada por el API, para pruebas de cementos para pozos petroleros, suministra varias cédulas para diferentes profundidades y condiciones del agujero durante la cementación, proporcionando una velocidad a la cual debe incrementarse tanto la presión como la temperatura para obtener las condiciones de circulación y hay flexibilidad para escoger la secuela de prueba que simule con mayor exactitud, la temperatura estática y de circulación del pozo en estudio.

En este capítulo vamos a ver el diseño de la técnica de desplazamiento de la lechada, ésta deberá ser aquella que nos permita llevarla a cabo en forma segura, desplazando la mayor cantidad de lodo posible y debe seleccionarse en función de las características de las formaciones expuestas en el agujero, las propiedades de la lechada de cemento, y el equipo de cementación disponible. Además, el diseño de la cementación, debe permitir obtener:

- a.- Un desplazamiento efectivo del lodo de perforación en el espacio anular.
- b.- Una caída mínima de presión durante el desplazamiento de la lechada.

Las técnicas comúnmente empleadas en los trabajos de cementación son: cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo turbulento, cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo laminar, cementación primaria por etapas.

IV.1.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA CONVENCIONAL BAJO REGIMEN DE FLUJO TURBULENTO.

G.C. Howart y J.B. Clark establecieron que cuando se utiliza régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo en el espacio anular, lográndose, por consiguiente, una mayor adherencia entre el cemento y la pared del agujero. Sin embargo, debido a las altas presiones requeridas para obtener flujo turbulento, la aplicación de esta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de presión de fractura es mayor que el gradiente de presión de cementación, así como la disponibilidad de equipo con capacidad suficiente para llevar a cabo la operación.

Se anticipa que el hecho de establecer flujo turbulento durante la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular, no garantiza una buena eficiencia de desplazamiento;

a pesar que se tomen las medidas necesarias en cuanto a movimiento de la tubería y colocación de raspadores y centradores. Basta analizar la ecuación del número de Reynolds para inferir que dado un gasto fijo de desplazamiento, aunque sea bajo, es posible, reduciendo la viscosidad, alcanzar régimen de flujo turbulento. La disminución de viscosidad se logra mediante el uso de aditivos por consiguiente: lechadas de cemento con baja viscosidad, aún en régimen turbulento, conducirán a bajas eficiencias de desplazamiento, debido al fenómeno de interdigitación que tendrá al desarrollarse.

Puesto que la lechada de cemento se comporta como un fluido no Newtoniano, la eficiencia de desplazamiento estará influenciada, además, por las relaciones de puntos cedentes de Bingham y densidades, que se mantengan, entre lechada y lodo - (4).

Para establecer el diseño de una cementación primaria, bajo régimen de flujo turbulento, es necesario determinar, como primer paso, la máxima presión de fondo bajo las condiciones de operación más favorables, y compararla con la presión de fractura de las formaciones existentes, con el propósito de definir si es posible aplicar esta técnica. De no ser posible, se procede a efectuar el diseño siguiendo la técnica de cementación bajo un régimen de flujo laminar. En caso afirmativo, se continúa el diseño cuantificando la potencia requerida en el equipo superficial de bombeo, el volumen de lechada y el tiempo de desplazamiento.

Finalmente se calcula el tiempo de contacto que se define, (10): "el intervalo de tiempo en que un punto de la pared del pozo permanece en contacto con la lechada de cemento, la cual está siendo desplazada bajo un régimen de flujo turbulento".

Se ha encontrado, estadísticamente, que con tiempos de -

contacto mínimo de 10 minutos se logran cementaciones primarias satisfactorias. Se aclara, que es difícil proporcionar un tiempo de contacto del orden de 10 minutos, en vista de -- que el volumen de cemento requerido para obtener dicho tiempo, generalmente es mayor que el necesario para alcanzar el nivel predeterminado en el espacio anular.

El concepto de tiempo de contacto mínimo, se ha establecido de correlacionar el resultado obtenido en cementaciones primarias efectuadas con régimen de flujo turbulento y los tiempos de contacto respectivos, bajo la suposición de que el régimen turbulento se desarrolla únicamente durante la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular. Sin embargo, el procedimiento aquí empleado implica el establecimiento de flujo turbulento desde que se inicia el desplazamiento. Por lo tanto, la obtención de un tiempo de contacto inferior al mínimo de 10 minutos, no deberá considerarse como un factor definitivo para inferir que una cementación resultará defectuosa.

El tiempo de contacto que se calcula en el inciso (1), de la secuela de cálculo presentada a continuación, corresponde a un punto del espacio anular situado a la profundidad de la zapata de la tubería de revestimiento.

IV.1.1.- PROCEDIMIENTO DE CALCULO.-

a.- Determinese la velocidad crítica en el espacio anular, para establecer un régimen de flujo turbulento, utilizando la siguiente expresión (11).

$$V_c = \left[\frac{1613 K' (96/d_e)^{n' + 1}}{\rho} \right] \frac{1}{2-n'} \dots (15)$$

Siendo:

$$d_e = d_h - d_o$$

En la ecuación (13) se ha considerado un $N_{Rc} = 3000$

Rango de N_{Re} : ≥ 3000 se obtiene flujo turbulento entre 2100 y 3000 es una zona de transición; en esta zona no debe hacerse ningún diseño
 $< 2100 > 100$ se obtiene flujo laminar.

Cuando se tiene $N_{Re} = 100$ se obtiene un flujo lento o tapón

b.- Calcúlese el gasto crítico, correspondiente a la velocidad obtenida en el paso anterior, por medio de la ecuación siguiente.

$$q_c = 2.45 V_c (d_h^2 - d_o^2) \quad (16)$$

c.- Obténgase la velocidad del fluido dentro de la tubería de revestimiento aplicando la ecuación:

$$V = \frac{q_c}{2.45 d_i^2} \quad (17)$$

d.- Determinése el factor de fricción de Fanning, para flujo en el espacio anular y dentro de la tubería de revestimiento mediante la figura 9⁽¹⁾, o utilizando la ecuación siguiente:

$$f = 0.00454 + 0.645 (N_{Re})^{-0.70} \quad (18)$$

Donde:

$$N_{Re} = \frac{1.86 v^{(2-n')}}{k' (96/d)^{n'}} \quad (19)$$

Para la lechada de cemento en el espacio anular se considera:

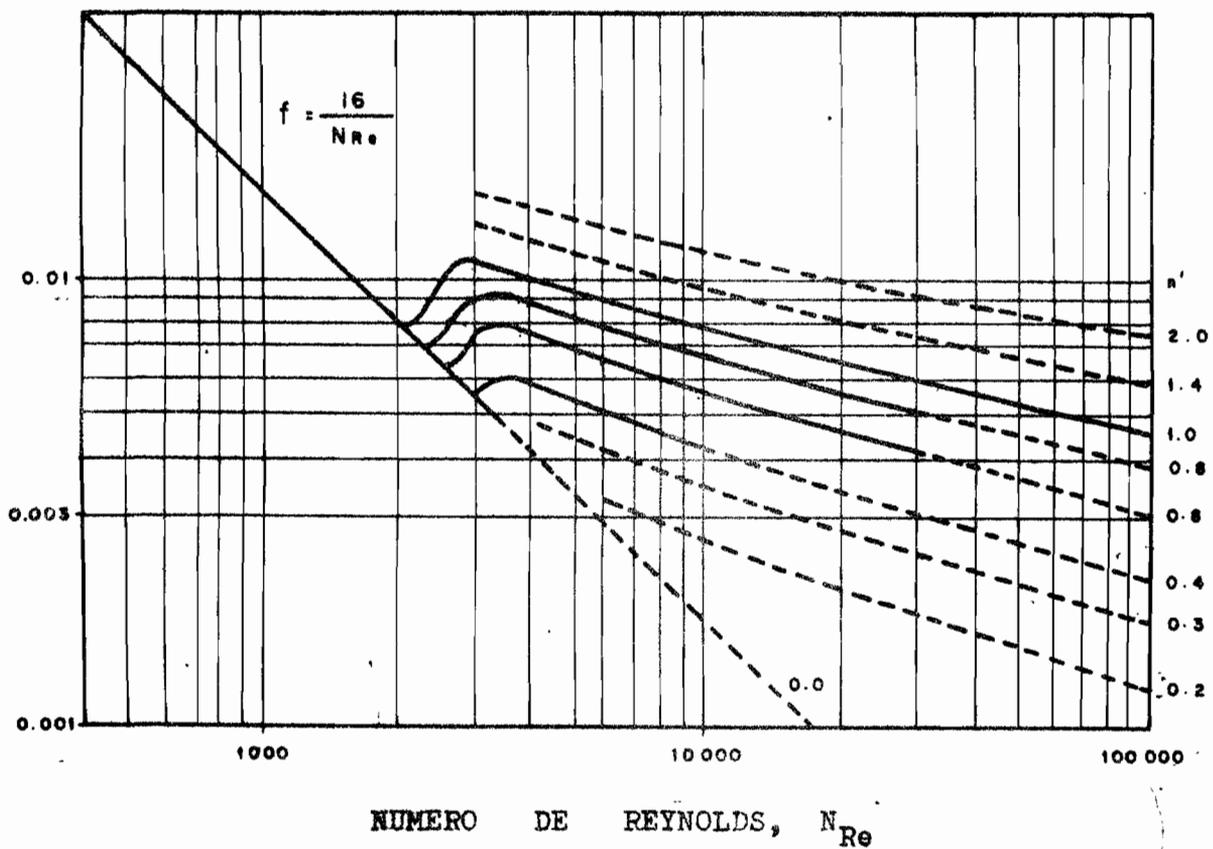
$$N_{Re} = 3000$$

e.- Calcúlese las pérdidas de presión por fricción, en el espacio anular y en el interior de la tubería, aplicando la ecuación siguiente:

$$p'f = \frac{f L \rho v^2}{25.8 d} \quad (20)$$

* Para la determinación de los parámetros k' y n' , consúltese al final de esta obra Apéndice 1.

FACTOR DE FRICCIÓN DE FANING; f .



REGION EXPERIMENTAL —————

REGION EXTRAPOLADA - - - - -

FIG. 9.- FACTOR DE FRICCIÓN PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS (1)



BIBLIOTECA

f.- Determinése la diferencia de presión hidrostática, debida a la diferencia de densidades del lodo de perforación y los fluidos colocados en el espacio anular mediante la expresión siguiente:

$$p_h = 0.052 L \Delta P \quad (21)$$

g.- Calcúlese la presión total requerida en la superficie, para desplazar la lechada de cemento al espacio anular, a partir de la ecuación:

$$p_s = P_{fa} + P_{ft} + P_h \quad (22)$$

h.- Utilizando la ecuación siguiente, determinése el gradiente de presión de fractura de formación.

$$G_c = \frac{P_{fa} + P_{ha}}{D'} \quad (23)$$

Si $G_c \leq G_f$; efectúese el diseño según la técnica de flujo laminar.

Si $G_c > G_f$; continúese con el siguiente inciso.

i.- Calcúlese la potencia necesaria en el equipo superficial de bombeo, para desplazar la lechada al espacio anular mediante la ecuación siguiente:

$$H_h = \frac{P_s G_c}{1714} \quad (24)$$

i.- Por medio de la ecuación siguiente cuantifíquese el volumen total de la lechada de cemento para alcanzar el nivel deseado dentro del espacio anular.

Con la finalidad de considerar posibles irregularidades en el agujero, se recomienda incrementar en un 10 a 15% el volumen calculado de la lechada de cemento.

$$V_c = 0.00543 \left[L_a (d_h^2 - d_o^2) + L_{di} \right] \quad (25)$$

k.- Calcúlese el tiempo de desplazamiento necesario para colocar la lechada de cemento en el espacio anular, por medio de la expresión:

$$t = \frac{V_t}{7.48 q_c} \quad (26)$$

1.- Calcúlese el tiempo de contacto aplicando la ecuación siguiente:

$$t_c = \frac{V_c}{q_c} \quad (27)$$

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación para ilustrar el uso del procedimiento antes descrito.

EJEMPLO 8.-

Diséñese la cementación de una tubería de revestimiento de 6⁵/₈" combinada de N-80 24 Lb/pie y J-55,36 Lb/pie en agujero de 8³/₄", en el intervalo de 4920 pies a 6560 pies, según la técnica de flujo turbulento. El gradiente de fractura de la formación expuesta en el agujero es $G_f = 0.73 \text{ Lb/Pg}^2/\text{pie}$ y se dispone de los datos siguientes:

| | |
|--|--|
| Tubería de 9 ⁵ / ₈ ", J-55,36 Lb/pie cementada a | 1607 pies |
| Agujero de 8 ³ / ₄ " de | 1607 a 6560 pies |
| Densidad de la lechada de cemento | 15 Lb/gal |
| Densidad del lodo de perforación | 11.5 Lb/gal |
| Densidad del dispersante de arcillas | 8.34 Lb/gal |
| n' de la lechada de cemento | 0.94 |
| n' del lodo de perforación | 0.81 |
| n' del dispersante de arcillas | 0.587 |
| k' de la lechada de cemento | 0.00166 Lb-seg ^{n'} /pie ² |
| k' del lodo de perforación | 0.0027 Lb-seg ^{n'} /pie ² |
| k' del dispersante de arcillas | 0.00195 Lb-seg ^{n'} /pie ² |
| Dispersante de arcillas | 10 Bbls. |
| Longitud del primer tubo entre zapata y cople | 29.52 pies |

a.- Velocidad crítica para establecer régimen de flujo turbulento en el espacio anular.

$$V_c = \left[\frac{1613 \times 0.00166 (96/2,125)^{0.94}}{15} \right] \frac{1}{2^{-0.94}}$$

$$V_c = 5.6 \text{ pies/seg}$$

Siendo:

$$ds = 8,750 - 6,625 = 2,125$$

b.- Gasto crítico

$$q_c = 2.45 (8,750^2 - 6,625^2)$$

$$q_c = 447 \text{ Gal/min}$$

c.- Velocidad del flujo dentro de la tubería

$$v = \frac{447}{2.45(5,921)^2}$$

$$= 5.16 \text{ pies/seg.}$$

d.- Número de Reynolds y factor de fricción

$$N_{Re} = \frac{1.86 \times 5.16^{(2 - 0.81)} \times 11.5}{0.0027 \left(\frac{96}{5,921} \right)^{0.81}}$$

$$= 5808$$

Con:

$$N_{Rc} = 3000 \text{ y } n' = 0.94, \quad f = 0.01$$

$$N_{Rc} = 5808 \text{ y } n' = 0.81, \quad f = 0.008$$

e.- Pérdidas de presión por fricción

En el espacio anular:

$$p_{fa} = \frac{0.01 \times 1640 \times 15 (5.6)^2}{25.8 \times 2,125}$$

$$= 140.8 \text{ Lb/pg}^2$$

En el interior de la tubería de revestimiento:

$$p_{ft} = \frac{0.008 \times 6,560 \times 11.5 \times (5.14)^2}{25.8 \times 5,921}$$

$$= 104.1 \text{ Lb/pg}^2$$

El proceso de cálculo se va a repetir desde el inciso d, para determinar las pérdidas de presión por fricción debidas al dispersante de arcillas y al lodo de perforación en el espacio anular, obteniéndose:

Para el dispersante de arcillas:

$$p_{fa} = 8.23 \text{ Lb/pg}^2$$

Las pérdidas de presión para el lodo de perforación en el espacio anular, desde el extremo inferior de la tubería de $9\frac{5}{8}$ " , hasta la profundidad a que se encuentra el dispersante de arcillas.

$$p_{fa} = 117.4 \text{ Lb/pg}^2$$

y desde la superficie hasta el extremo inferior de la tubería de 9⁵/₈".

$$Pfa = 48.2 \text{ Lb/pg}^2$$

f.- Diferencia de presiones hidrostáticas

Entre: cemento - lodo:

$$ph = 0.0052 \times 1640 (15 - 11.5)$$

$$= 298.0 \text{ Lb/pg}^2$$

Entre: dispersante de arcillas - lodo:

$$ph = 51,729$$

Obteniéndose finalmente:

$$ph = 298.0 - 51,729$$

$$= 246,271 \text{ Lb/pg}^2$$

g.- Presión total requerida en la superficie para desplazar la lechada de cemento al espacio anular.

Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular.

| | |
|--|----------------------------------|
| Lechada de cemento | 140.80 Lb/pg ² |
| Dispersante de arcillas | 8.12 Lb/pg ² |
| Lodo de perforación | <u>225.60 Lb/pg²</u> |
| Subtotal | 374.52 Lb/pg ² |
| Pérdidas de presión en el interior de la tubería de revestimiento: | |
| Lodo de perforación | 104.10 Lb/pg ² |
| Diferencia de presión hidrostáticas | <u>246.271 Lb/pg²</u> |
| Subtotal | 350.371 Lb/pg ² |
| Presión total | 724.891 Lb/pg ² |

h.- Gradiente de cementación.

Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular:

$$pfa = 374.52 \text{ Lb/pg}^2$$

Carga hidrostática en el fondo del pozo:

| | | |
|-------------------------|----------------|--------------------------|
| Lechada de cemento | 1279.20 | Lb/pg ² |
| Dispersante de arcillas | 2753.78 | Lb/pg ² |
| Lodo de perforación | 136.60 | Lb/pg ² |
| | <u>4169.58</u> | <u>Lb/pg²</u> |

Por lo tanto:

$$G_c = \frac{374.52 + 4169.58}{6560}$$

$$G_c = 0.692 \text{ Lb/Pg}^2/\text{pie}$$

= Se observa que el gradiente de presión de fractura de la formación, $G_f = 0.73 \text{ Lb/Pg}^2/\text{pie}$, es mayor que el de cementación. Por lo tanto, esta técnica es factible de aplicarse sin riesgo de dañar las formaciones.

i.- Potencia necesaria para desplazar la lechada de cemento al espacio anular, sabiendo que la entrega de las bombas del equipo de cementación es de 450.20 - Gal/min.

$$H_h = \frac{724.891 + 450.20}{1714}$$

$$H_h = 191.8$$

j.- Volumen de lechada de cemento.

$$V_c = 0.00545 \left[1640(8.75^2 + 6.625^2) + 29.52 + (5.921^2) \right]$$

$$V_c = 297.64 \text{ pie}^3$$

Considerando un 15% adicional

$$V_c = 342.28 \text{ pies}^3$$

k.- Tiempo de desplazamiento.

Primero hay que calcular el volumen dentro de la tubería de revestimiento, esto es:

$$V_t = 0.00545 (6560 - 29.52) 35.05$$

$$V_t = 1249 \text{ pie}^3$$

Por lo tanto:

$$t = \frac{7.48 \times 1249}{447.5}$$

$$t = 20.8 \text{ minutos}$$

• Longitud del primer tubo entre zapata y cople.



BIBLIOTECA

1.- Tiempo de contacto.

$$t_c = \frac{7.48 \times 342.28}{447.5}$$

$t_c = 5.7$ minutos.

IV.2.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA CONVENCIONAL BAJO RÉGIMEN DE FLUJO LAMINAR

En esta técnica se efectúa el desplazamiento de la lechada de cemento al espacio anular en régimen de flujo laminar. - Se utiliza cuando se requiere cementar tubería a través de intervalos grandes, formaciones incompetentes o depresionadas; así como en la cementación de tuberías cortas a gran profundidad y tuberías múltiples; o bien cuando las características de las formaciones y equipo disponible no permiten emplear la técnica del flujo turbulento.

IV.2.1. PROCEDIMIENTO DE CALCULO

El procedimiento de cálculo es semejante al empleado en una cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, diferenciándose en que para flujo laminar, la velocidad de desplazamiento, definida por la ecuación (28), se determina para un número de Reynolds de 2000, considerando que la velocidad así obtenida, es la máxima que puede lograrse dentro de régimen laminar. Por otra parte no es recomendable el uso de velocidades de desplazamiento dentro de la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, ya que en esta zona, aunque no se logra establecer flujo turbulento, si se desarrollan turbulencias aisladas que propician la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación.

En caso de que el gradiente, de presión de cementación, para la aplicación de esta técnica, resulte mayor que el de fracturamiento de las formaciones expuestas en el pozo, el diseño deberá efectuarse según la técnica de cementación por etapas.

A continuación se describe el método de cálculo para el

diseño de una cementación primaria bajo un régimen de flujo laminar.

a.- Calcúlese la velocidad máxima para mantener flujo laminar en el espacio anular, utilizando la ecuación:

$$v_c = \left[\frac{1075 k' (96/d_o)^{n'}}{\rho} \right] \frac{1}{2 - n'} \quad (28)$$

Los siguientes pasos son análogos a los empleados en el procedimiento de diseño bajo un régimen de flujo turbulento, hasta el inciso k. Las expresiones algebraicas no cambian, a excepción de las empleadas en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción que en este caso son:

Para el espacio anular:

$$pfa = \frac{u_p L v_c}{1000(dh-d_o)^2} + \frac{L y_b}{200(dh-d_o)} \quad (29)$$

Para el interior de la tubería:

$$pft = \frac{u_p L v}{1500 d_i^2} + \frac{L y_b}{225 d_i} \quad (30)$$

IV.3.- TECNICA DE CEMENTACION PRIMARIA POR ETAPAS.-

La cementación primaria por etapas, consiste en la colocación selectiva del cemento en el espacio anular, a profundidades previamente determinadas, de acuerdo a las características de las formaciones existentes. Dicha colocación se logra a través de coples o juntas, diseñados específicamente, que van distribuidos en la tubería de revestimiento de modo que quedan situados en la parte inferior de cada intervalo a cementar.

Esta técnica se utiliza para cementar tuberías de gran longitud a través de formaciones cuyo gradiente de presión de fractura varía en forma irregular, o cuando no es posible efectuar la cementación en una sola etapa. También se recomienda su uso para aislar formaciones cuya distancia entre sí no permite efectuar la cementación en una sola etapa.

El método de diseño involucra determinar para cada etapa: el gradiente de presión de cementación el volumen neces-

rio de lechada de cemento, el tiempo de desplazamiento y la potencia requerida en el equipo superficial. Se aplicará la técnica de cementación bajo régimen de flujo turbulento o de flujo laminar, según se juzgue conveniente.



BIBLIOTECA

CONCLUSIONES

Se puede observar que al efectuar una cementación primaria según cualquiera de las técnicas descritas en esta obra, hay que tener presente las limitaciones fundamentales para - llevarlas a cabo, éstas son: capacidad del equipo superficial y presión de fractura de la formación. La presión de fractura de la formación no debe excederse, ya que de hacerlo, se inducirán fracturas que facilitarán la pérdida de circulación. Por lo tanto, el procedimiento que debe observarse al diseñar una cementación primaria, consiste esencialmente en determinar la técnica que es posible aplicar bajo las limitaciones mencionadas. Los cálculos se efectúan ensayando sucesivamente las técnicas de cementación bajo régimen de flujo turbulento, bajo régimen laminar y por etapas. El diseño quedará concluido - cuando la técnica probada es factible de llevarse a cabo con el equipo disponible y sin dañar la formación.

Se hace notar, que el solo hecho de establecer régimen turbulento, en la colocación de la lechada de cemento, no garantiza una eficiencia de desplazamiento satisfactoria. Observando el número de Reynolds, se infiere que: un fluido con baja viscosidad permitirá alcanzar flujo turbulento a gastos de desplazamiento bajos; sin embargo, la relación entre las viscosidades de los fluidos desplazante y desplazado puede propiciar la interdigitación, reduciendo, por consiguiente, la eficiencia de desplazamiento.

Hay que tener presente que la meta que se persigue al - explotar un pozo petrolero, es producir la mayor cantidad de aceite, durante el mayor tiempo y al costo más bajo posible. Para lograr lo anterior es de vital importancia cementar correctamente las tuberías de revestimiento sin dañar la formación; y también evitar fallas en la cementación, teniendo que

realizar cementaciones forzadas.

Se concluye que siendo la cementación una de las operaciones más importantes y críticas, se debe poner el máximo empeño a fin de que, planeada y ejecutada técnicamente, corone con éxito el gran esfuerzo e inversión de dinero que exige la perforación de un pozo petrolero.

NOMENCLATURA

| | | |
|--------------------|---|---|
| Aa .- | Area del espacio anular | pies ² |
| Ap .- | Area proyectada por los coples de la tubería | pies ² |
| a _t .- | Aceleración de la tubería | pies/seg ² |
| D .- | Profundidad | m |
| D' .- | Profundidad | pies |
| D _t .- | Desplazamiento de la tubería | pies ³ /tramo de tubería |
| d .- | Diámetro | pg |
| d _e .- | Diámetro hidráulico | pg |
| di .- | Diámetro interno de la tubería | pg |
| d _h .- | Diámetro del agujero | pg |
| d _o .- | Diámetro externo de la tubería | pg |
| f .- | Factor de fricción de fanning | |
| Gc .- | Gradiente de presión de cementación | lb/pg ² /pie |
| Gf .- | Gradiente de presión de fractura | lb/pg ² /pie |
| Gp .- | Gradiente de presión | lb/pg ² /pie |
| Hh .- | Potencia hidráulica | hp |
| h _{mc} .- | Espesor del enjarre de lodo | pg |
| K' .- | Índice de consistencia | lbf-seg ^{n'} /pie ² |
| L' .- | Longitud | m |
| L .- | Longitud | pies |
| La .- | Longitud a cementar en el espacio anular | pies |
| L _t .- | Longitud de tubería | pies/tramo de tubería |
| u .- | Módulo de Poisson | |
| u _p .- | Viscosidad plástica | cp |
| n' .- | Índice de comportamiento de flujo | |
| N .- | Constante del resorte del viscosímetro | |
| N _{Re} .- | Número de Reynolds | |
| p _{ac} .- | Pérdida de presión por aceleración | lb/pg ² |
| p _w .- | Presión en el fondo del pozo | lb/pg ² |
| pf .- | Presión de fractura | Kg/cm ² |
| p _f .- | Pérdidas de presión por fricción | lb/pg ² |
| p _{fa} .- | Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular | lb/pg ² |
| p _{ft} .- | Pérdidas de presión por fricción en la tubería | lb/pg ² |
| p _{ha} .- | Presión hidrostática en el espacio anular | lb/pg ² |
| p _h .- | Diferencia de presión hidrostática | lb/pg ² |
| p _s .- | Presión total en la superficie | lb/pg ² |
| q _a .- | Gasto medio en el espacio anular | pies ³ /seg |
| q _c .- | Gasto cúbico | gal/min |
| ρ .- | Densidad | lb/gal |

| | | |
|--------------|--|---------------------------|
| ρ' | .- Densidad | lb/ft ³ |
| ρ_c | .- Densidad de la lechada de cemento | lb/gal |
| ρ_m | .- Densidad del lodo | lb/gal |
| ρ_r | .- Densidad de la roca | gr/cm ³ |
| S_t | .- Esfuerzo de tensión | kg/cm ² |
| t | .- Tiempo | min. |
| t_c | .- Tiempo de contacto | min. |
| $twoc$ | .- Tiempo mínimo de espera para el fraguado del cemento | min. |
| t_{max} | .- Tiempo trascurrido desde que se mezcla el primer saco de cemento hasta que se alcanza la máxima presión dentro de la tubería de revestimiento | min. |
| T | .- Temperatura | °F |
| T' | .- Temperatura | °C |
| Y_b | .- Punto cedente de Bingham | lbf/100 pies ² |
| v | .- Velocidad | pies/seg |
| vc | .- Velocidad crítica | pies/seg |
| ve | .- Velocidad equivalente | pies/seg |
| v_t | .- Velocidad de la tubería | pies/seg |
| V | .- Volumen | pies ³ |
| V_c | .- Volumen de lechada de cemento | pies ³ |
| V_t | .- Volumen total dentro de la tubería de revestimiento. | pies ³ |
| ω | .- Velocidad del rotor del viscosímetro | r.p.m. |
| θ | .- Lectura obtenida en un viscosímetro Fann V-G | lb/100 pies |
| $\Delta\rho$ | .- Diferencia en densidades. | lb/gal. |
| τ | .- Esfuerzo cortante | lb/100 pies ² |

BIBLIOGRAFIA

- 1.- B.C. Craft, W.R. Holden and E.D. Graves
Well design Drilling and Production
Prentice Hall Inc.
- 2.- B.J. Service, Inc
Oil Well Cementing, Part 2
Slurry Design
Long Beach, California
Arlington, Texas, 1960
- 3.- Outline of Oil Well Cementing
Halliburton Company, January 9, 1967
- 4.- Revista de Ingeniería Petrolera
Organo de Divulgación Técnica e Información de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México, A.C.
Vol. IX, México, D.F. Septiembre de 1.969, Num. 9
- 5.- E. H. Clark Jr.
Bottom Hole Pressure Suges While Running Pipe
The Petroleum Engineer, January 1955
- 6.- A.H. Hilton
Mechanical Aids and Practices for Improvement of Primary Cementing
Oil Well Cementing Practices in the United States,
American Petroleum Institute 1959.
- 7.- Applied Engineering Cementing
Byron Jackson Service, Inc.
Long Beach California/ Huston, Texas
A. Borg Warner Subsidiary, 1960
- 8.- R.J.S. Pigott
Mud Flow in Drilling
Drilling and Production Practice API, 1941
- 9.- R. Poblano O., Ingeniero Petrolero
A. Acuña R. Ingeniero Petrolero
Procedimiento Gráfico para determinar el tiempo de introducción de tuberías de revestimiento.
Subdirección de Tegnología de Explotación del I.M.P.
Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Abril 1969
- 10- J. W. Brice, Jr. and B.C. Holmes
Engineered Casing Cementing Program Using
Turbulent Flow Techniques
journal of Petroleum Technology, May, 1964
- 11- Knox A. Slagle
Rheological Design of Cementing Operations.
journal of Petroleum Technology, March 1962.



BIBLIOTECA

APENDICE I

DETERMINACION DEL INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO (n') Y DEL INDICE DE CONSISTENCIA (k')

Se ha demostrado experimentalmente que la mayoría de los fluidos no-Newtonianos se ajustan al comportamiento representado en el modelo exponencial que queda definido empíricamente por la ecuación siguiente⁽¹⁾.

$$\tau = k' \left(- \frac{dv_r}{dr} \right)^{n'} \quad 1.1$$

Siendo dv_r/dr una expresión que representa la variación de la velocidad de corte con respecto al radio, desarrollada bajo un régimen de flujo laminar, dentro de una tubería circular. Sus unidades son seg^{-1} .

Dependiendo del valor de n' , los fluidos no-Newtonianos se clasifican en: plásticos de Bingham, pseudoplásticos y dilatantes.

El índice de comportamiento de flujo, para los fluidos plásticos de Bingham y pseudoplásticos siempre toma valores entre cero y uno. Para los dilatantes, n' es mayor que uno.

Los plásticos de Bingham, se diferencian de los pseudoplásticos, en que los primeros requieren que el esfuerzo de corte aplicado exceda un cierto valor mínimo, llamado punto de cedencia, para mantenerlos en movimiento; mientras que los segundos no tienen punto de cedencia o sea que a cualquier esfuerzo inicial aplicado exhiben una deformación.

La ecuación 1.1 también representa el comportamiento de los fluidos Newtonianos. En este caso $n' = 1$ y k' es proporcional a la viscosidad ($k' = \frac{\mu}{gc}$)

El lodo de perforación y la lechada de cemento generalmente se comportan como fluidos plásticos de Bingham; sin embargo, dependiendo del tipo y cantidad de aditivos empleados en la lechada de cemento, pueden propiciar el cambio de com-

* Como el tipo Fann VG-35

portamiento a tipo dilatante.

Los índices de comportamiento de flujo y de consistencia, se determinan con base en lecturas obtenidas en un viscosímetro rotacional*, correspondientes a velocidades de 600, 300, 200 y 100 r.p.m.; ya sea siguiendo el método de los dos puntos, o gráficamente, a partir del modelo exponencial.

METODO DE LOS DOS PUNTOS.-

En este procedimiento solo se emplean las lecturas a 600 y 300 r.p.m. Los valores de n' y k' se cuantifican con las ecuaciones siguientes:

$$n' = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \quad (1.2)$$

$$k' = \frac{N \theta_{300}}{100 \times 479^{n'}} \quad (1.3)$$

Con el método de dos puntos también pueden obtenerse τ_y y τ_x y utilizando las ecuaciones siguientes:

$$\tau_y = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (1.4)$$

$$\tau_x = \theta_{300} - \tau_y \quad (1.5)$$

Donde $N = 1$ cuando el instrumento es equipado con un resorte standard de torsión.

METODO GRAFICO.-

Este método se basa en la construcción de un gráfico que representa el modelo exponencial, expresado en la forma siguiente:

$$\ln \tau = \ln k' + n' \ln \left(- \frac{d\tau}{dr} \right) \quad (1.1)$$

Para la elaboración del gráfico se utilizan todas las lecturas del viscosímetro antes indicadas, procediéndose en la forma siguiente:

a.- En coordenadas doble-logarítmicas, márquese, sobre el eje de las ordenadas, los esfuerzos cortantes.

Estos esfuerzos se obtienen a partir de las lecturas del viscosímetro por medio de la expresión siguiente:

$$\tau = \frac{\theta \times N}{100} \quad (1.6)$$

b.- Márquese, sobre el eje de las abscisas, las velocidades de corte, obtenidas por medio de la ecuación:

$$\frac{dvr}{dr} = \frac{2\omega R^2}{R^2 - 1}$$

Siendo:

= velocidad del cilindro rotor del viscosímetro (r.p.m.)
 = $\frac{\text{radio del cilindro rotor del viscosímetro}}{\text{radio interno del cilindro estacionario del viscosímetro}}$

Para viscosímetro Fann VG - 35 normal, $\beta = 1.0678$. A continuación se presentan los valores de velocidad de corte correspondiente a las velocidades del viscosímetro aludido.

TABLA 7 .- En esta tabla se presentan los valores de velocidad de corte correspondientes a las velocidades del viscosímetro Fann VG-35 normal.

| ω r.p.m. | $2\omega R^2 / R^2 - 1$ Seg ⁻¹ |
|--------------------|--|
| 600 | 1022 |
| 300 | 511 |
| 200 | 340 |
| 100 | 170 |
| 6 | 10.2 |
| 3 | 5.1 |

c.- Ajústese una línea recta a los puntos localizados según los pasos a y b. Esta recta es la representación gráfica de la ecuación 1.1. Como puede verse en la ecuación (1.1), la intersección de la recta con el eje de las ordenadas, para el valor unitario de velocidad de corte, es el índice de consistencia k' y su pendiente es el índice de comportamiento de flujo n' .

EJEMPLO 9

A continuación se presentan en forma tabulada los datos

obtenidos experimentalmente de una prueba de laboratorio de una lechada de cemento clase G cols. (1) y (2) y también los parámetros para graficar cols. (3) y (4).

Se tomaron 792 gramos de cemento clase G.

La relación agua/cemento que generalmente se toma es 0.44, o sea:

$$\frac{\text{Agua c.c.}}{\text{cemento gr}} = .44$$

$$\frac{348 \text{ c.c. de agua}}{792 \text{ gr de cemento}} = .44$$

Densidad de la lechada = 1.93 gr/c.c.

| DATOS EXPERIMENTALES | | PARAMETROS PARA GRAFICAR | |
|-------------------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) |
| Velocidad del cilindro r.p.m. | Lectura del dial θ | $2\omega\beta^2/\beta^2-1$ Sec ⁻¹ | Esfuerzo de corte τ |
| 600 | 134 | 1022 | 1.34 |
| 300 | 95 | 511 | .95 |
| 200 | 77 | 340 | .77 |
| 100 | 54 | 170 | .54 |
| 6 | 13 | 10.2 | .13 |
| 3 | 9.4 | 5.1 | .094 |

SOLUCION.- Las entradas en la columna (3) son obtenidas directamente de la tabla 7. Valores del esfuerzo constante listados en la columna 4 son obtenidos a partir de la fórmula 1.6. Estos valores de las columnas (3) y (4) son graficados en la figura 10 y una línea recta es ajustada a los puntos a- luidos y según el paso c se obtiene los valores de k' y n'

Donde:

k'.- Índice de consistencia Lbf - seg^{n'}/pie²

n'.- Índice de comportamiento de flujo

De la fig. 10 se obtiene

k' = 0.042 Lbf - Seg^{n'}/pie² y a partir de la inclinación (27°)

n' = 0.5095

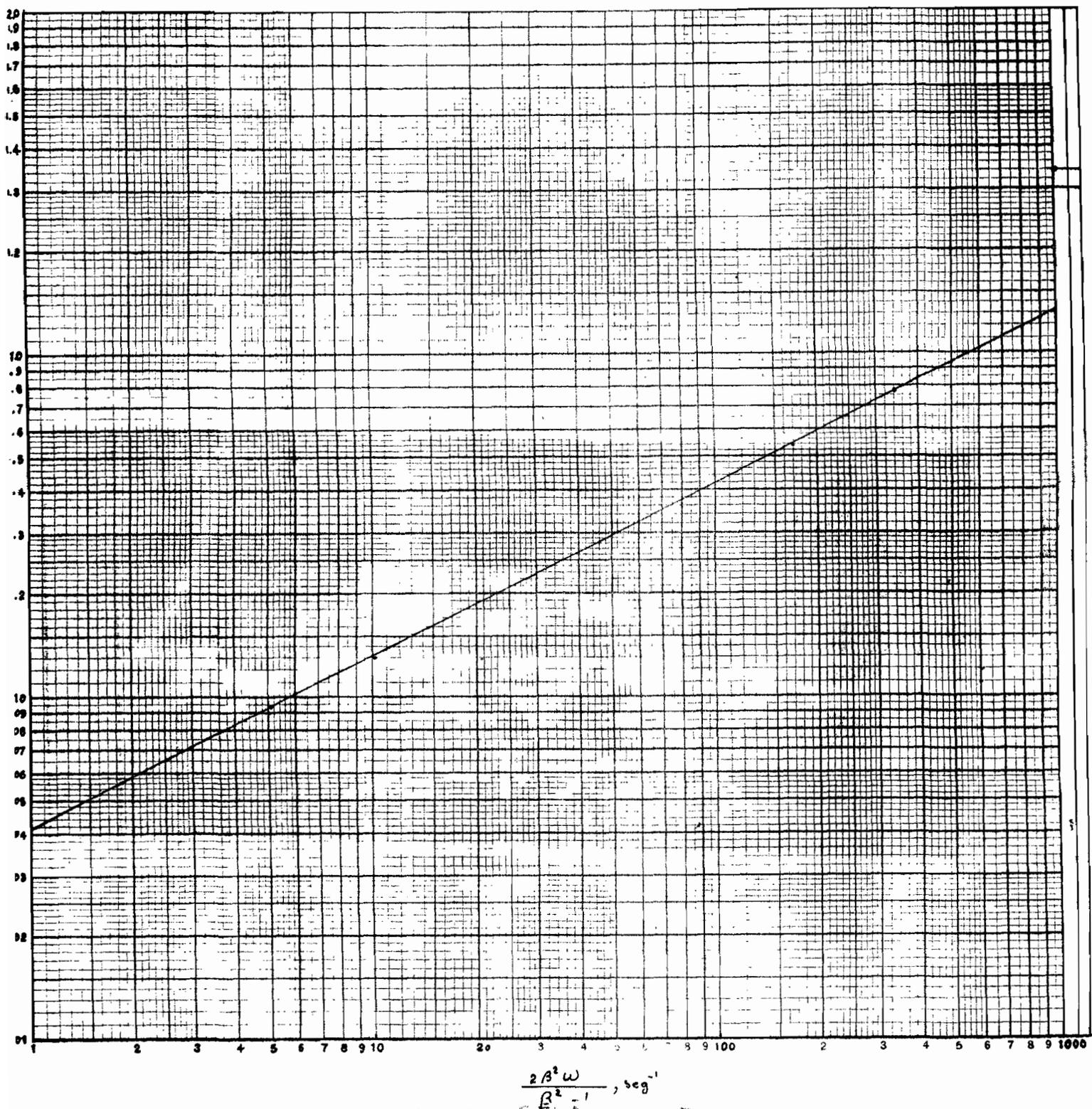


FIG. 10.- DETERMINACION GRAFICA DEL INDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO (n') Y DEL INDICE DE CONSISTENCIA (k').

