

24/28



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“CEMENTACIONES”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

MACARIO REYES MEZA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# I N D I C E

Pág.

## INTRODUCCION

### CAPITULO N° 1

#### TIPOS DE CEMENTOS

- |     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Manufactura y Componentes Químicos de los Cementos. | 12 |
| 1.2 | Clasificación y Propiedades de los Cementos.        | 14 |
| 1.3 | Cementos Especiales en la Industria Petrolera       | 18 |

### CAPITULO N° 2

#### DISEÑO DE LECHADAS E HIDRAULICA EN LA CEMENTACION

- |     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Generalidades.                                      | 23 |
| 2.2 | Análisis Hidráulico de la Operación de Cementación. | 25 |
| 2.3 | Efecto del Tubo en "U" en la Cementación de Pozos.  | 36 |
| 2.4 | Diseño de Lechadas de Cemento.                      | 44 |

### CAPITULO N° 3

#### CEMENTACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

- |     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Factores a Considerar Durante la Cementación. | 63 |
|-----|---|----|

|  | Pág. |
|--|------|
| 3.2 Técnicas de Colocación.                    | 72   |
| 3.3 Desplazamiento : El Período Crítico.       | 86   |
| 3.4 Consideraciones después de la Cementación. | 90   |

#### CAPITULO N° 4

##### CEMENTACIONES FORZADAS

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 Terminología de la Cementación Forzada.      | 96  |
| 4.2 Técnicas de Cementación Forzada              | 100 |
| 4.3 Cementaciones Forzadas en Zonas Fracturadas. | 106 |
| 4.4 Planear el Trabajo.                          | 107 |
| 4.5 Empacadores para Cementación Forzada.        | 111 |
| CONCLUSIONES                                     | 112 |
| REFERENCIAS                                      | 114 |

## I N T R O D U C C I O N

La cementación de pozos petroleros tiene importancia indiscutible dentro de la Industria Petrolera, es utilizada en las regiones productoras de América, Europa, Africa, Medio Oriente, Asia Menor y Australia. Este proceso consiste en colocar una lechada (normalmente es una mezcla de material cementante con un líquido) dentro del espacio anular entre el exterior del revestimiento y la pared del pozo. La colocación se hace por medio de bombeo a través del interior de la tubería de revestimiento.

Los avances en la tecnología, así como la contribución de muchas organizaciones y profesionistas han ayudado en la práctica al Ingeniero Petrolero para planear y evaluar los trabajos de cementación con amplia información acerca de la variedad de materiales y técnicas que deben utilizarse en la cementación de pozos más profundos y que ha aumentado en complejidad por el incremento de la presión y la temperatura.

De la mayoría de investigaciones se resumen datos significativos de antecedentes históricos de la cementación de pozos petroleros. En 1903 Frank F. Hill mezcló y vació 50 sacos de cemento puro para cortar el agua del fondo del agujero; en 1910 A. A. Perkins Co., en California cementó el primer pozo usando-

el método de los dos tapones; en 1914 F. W. Oatman informó sobre el uso de cloruro de calcio para acelerar el cemento y reducir el tiempo de fraguado; E.P. Halliburton en 1919 cementó el primer pozo descontrolado, en 1920 desarrolló el mezclado - a chorro e instaló el primer laboratorio para evaluar las propiedades de los cementos; en 1926 se construyó un copla flotador; en 1929 Pacific Portland Cement Co. introdujo el primer - retardador de cemento; en 1930 Halliburton inició la investigación de cementaciones en la Industria Petrolera; en 1935 T. W. Pew patentó un método de cementación forzada de alta presión; en 1939 Humble O. I. and Referring Co. mezclaron pequeñas cantidades de material radioactivo con cemento para determinar la cima atrás de la tubería de revestimiento con registros de rayo-gama; en 1940 U.S. Gypsum Co. introdujo el primer cemento yeso; en ese mismo año M.M. Kinley corrió el primer estudio de calibración con cable eléctrico para determinar la cantidad de cemento requerido a fin de llenar el agujero y Halliburton manejó el cemento a granel; en 1955 Phillips Petroleum Co. introdujo agentes de control de pérdida de fluido y tierra diatomea - para la industria; en 1957 Halliburton usó aditivos densificantes y Dowell lanzó al mercado aditivos latex para el cemento; en 1960 Dowell utilizó nuevos agentes de control de pérdida de fluido; en 1961 H.J. Beach, Golf Research and Development Co.-

difundieron estudios de cementación forzada; en 1968 el API- (Instituto Americano del Petróleo) desarrolló los conceptos básicos y en 1972 Esso Production Research Co. y Halliburton- publicaron estudios de desplazamiento.

Los capítulos que integran este trabajo están dedicados- a tipos de cementos, diseño de lechadas e hidráulica de los cementos, planeación y ejecución de cementación de tuberías de revestimiento y cementaciones forzadas.

Las principales funciones de la cementación primaria son restringir el movimiento de los fluidos entre la formación, - adherencia y soporte de la tubería de revestimiento. Además- de aislar las zonas de producción de aceite-gas y agua, el ce- mento también ayuda a proteger la tubería de revestimiento -- contra la corrosión y del choque de cargas cuando se perfora- más abajo; evita los descontroles por el fraguado rápido del cemento y sella la pérdida de circulación en zonas ladronas.

Otro tipo de cementación generalmente usada para repara- ciones, se conoce como cementación secundaria e incluye opera- ciones efectuadas después de haber alcanzado la zona producto- ra.

La operación de reparación más común es la cementación - forzada, este es el proceso donde se aplica presión hidráulica para comprimir la lechada de cemento dentro del vacío de -

la formación o contra una zona porosa y se utiliza para lograr separar una zona productora de hidrocarburos de las que producen otros fluidos, controlar las relaciones gas-aceite y el exceso de agua, reparar las fugas de la tubería de revestimiento, sellar zonas ladronas que causan pérdida de circulación, corregir algún trabajo defectuoso de cementación primaria y evitar la migración de fluidos de las zonas o en pozos abandonados.

## C A P I T U L O N ° 1

### TIPOS DE CEMENTOS

Durante la perforación de los pozos petroleros, así como en su terminación, es necesario el equilibrio de las formaciones que se han perforado, por ese motivo los pozos se consolidan con implementos tubulares que son necesarios cementarlos mediante un trabajo especializado.

El material empleado, que es un cemento, es utilizado para llenar el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el pozo.

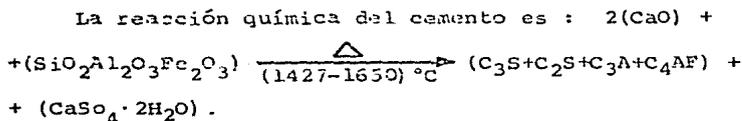
Para cumplir este propósito, el cemento debe ser diseñado de acuerdo a las condiciones del pozo (presión, temperatura, tipo de formación, tipos de fluidos, etc.); variando éstas con la profundidad y los rangos de temperaturas que se pueden encontrar desde bajas en Zonas Árticas y muy altas en pozos geotérmicos que son perforados para producción de vapor.

Debido a que las especificaciones de los cementos no cubren todas las propiedades en cuanto al extenso rango de profundidades, presiones y temperaturas; es necesario utilizar aditivos para los cementos y así obtener de ellos una mejor calidad para la finalidad del trabajo que son requeridos.

### 1.1 MANUFACTURA Y COMPONENTES QUIMICOS DE LOS CEMENTOS.

Los materiales básicos que se utilizan en la fabricación de los cementos son : Carbonato de calcio (roca caliza), arcilla o pizarra, materiales que contienen sílice, hierro y aluminio; éstos últimos deben ser agregados si no se encuentran en suficiente cantidad en la arcilla o en la pizarra.

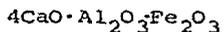
Una breve explicación de la fabricación del cemento es : dos partes trituradas de material carbonatado (conchas de ostión o margas) más una parte pulverizada de arcilla, se mezclan e introducen en un horno rotatorio, el que se usa para fundir y transformar la mezcla en un material llamado "clinker" para ésto se requieren temperaturas entre 1427° C a 1650° C. En enfriamiento, el clinker es pulverizado y mezclado con pequeñas cantidades de yeso (de 1.5 a 3%), el cual va a controlar el fraguado del cemento.



Los componentes químicos de los Cementos Portland son :

| COMPONENTE           | FORMULA                                   | DESIGNACION ESTANDAR |
|----------------------|---|----------------------|
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{C}_3\text{A}$ |
| Silicato tricálcico  | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$          | $\text{C}_3\text{S}$ |
| Silicato dicálcico   | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$          | $\text{C}_2\text{S}$ |

Aluminio ferrato  
tetracálcico



C<sub>4</sub>AF

Tabla N° 1 OXIDOS DE LOS CEMENTOS BASICOS API CLASE G o H

| O X I D O   | PORCENTAJE |
|---|------------|
| Oxido de Calcio (CaO)                               | 64.77      |
| Dióxido de Sílice (SiO <sub>2</sub> )               | 22.45      |
| Oxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 4.76       |
| Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )   | 4.10       |
| Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )               | 1.67       |
| Oxido de Magnesio (MgO)                             | 1.14       |
| Oxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)                 | 0.08       |
| Pérdida de Ignición                                 | 0.54       |

Tabla N°2 COMPOSICION Y PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS API

| CLASE API          | C <sub>3</sub> S    | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | FINEZA (cm <sup>2</sup> /gm) |
|--------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------------------|
|                    | P o r c e n t a j e |                  |                  |                   |                              |
| A                  | 53                  | 24               | 8+               | 8                 | 1600 a 1800                  |
| B                  | 47                  | 32               | 5-               | 12                | 1600 a 1800                  |
| C (acelerador)     | 58                  | 16               | 8                | 8                 | 1800 a 2200                  |
| D y E (retardador) | 26                  | 54               | 2                | 12                | 1200 a 1500                  |
| G y H (básico)     | 50                  | 30               | 5                | 12                | 1600 a 1800                  |

Al incrementar el contenido de C<sub>3</sub>S pulverizado muy fino - origina fuerzas aceleradoras del fraguado.

El control del contenido de C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A pulverizado grueso

ocasiona retardación del fraguado.

## 1.2 CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS

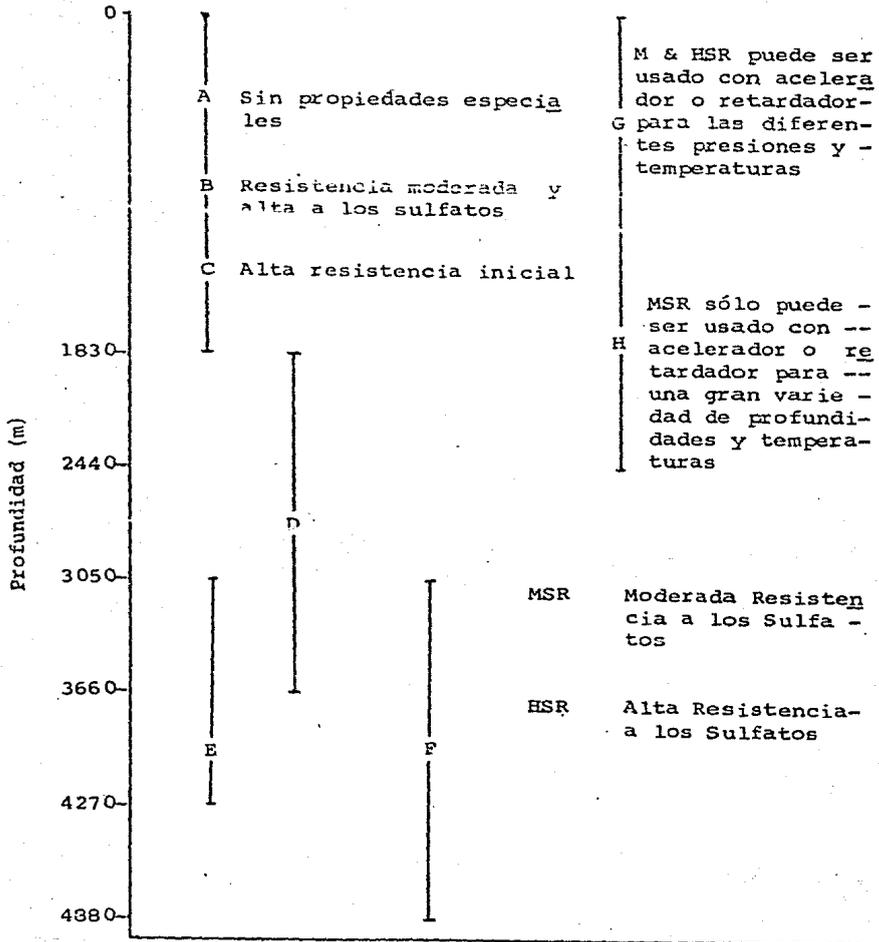
Existen instituciones que estudian y señalan las especificaciones sobre la elaboración de los cementos; las más importantes para la Industria Petrolera son la ASTM (Sociedad Americana de Pruebas de Materiales) que abastece los cementos de uso para la construcción y la industria petrolera, así como el API (Instituto Americano del Petróleo) que proporciona las especificaciones para cementos usados en pozos petroleros.

Las especificaciones que da la ASTM son cinco tipos de cementos Portland, designados por números romanos : I, II, III, IV y V; sujetos a diferentes rangos de presión y temperatura, los que difieren considerablemente a los cementos fabricados para utilizarlos en la industria de la construcción. En base a esto el API proporciona especificaciones de ocho clases de cemento para pozos petroleros, designados con las siguientes letras : CLASE A, B, C, D, E, F, G y H.

Los tipos de cemento I, II y III de especificaciones ASTM corresponden a los cementos API Clase A, B y C, los tipos IV y V de la ASTM no son correspondientes con los cementos API.

La Gráfica N° 1 presenta las 8 clases de cementos API, donde se indica la profundidad en la que actuarían normalmente sin agregar ningún aditivo.

## 8 CLASES DE CEMENTOS



Gráfica N° 1

APLICACION DE LAS CLASES DE CEMENTOS API

| CLASIFICACION<br>API | AGUA<br>MEZCLA ( $\frac{\text{lbs.}}{\text{saco}}$ ) | DENSIDAD<br>gr/cm <sup>3</sup> | PROFUNDIDAD<br>mts. | TEMPERATURA<br>ESTATICA °C |
|----------------------|--|--------------------------------|---------------------|----------------------------|
| A (Portland)         | 19.68  | 1.87                           | 0-1830              | 27 - 77                    |
| B (Portland)         | 19.68  | 1.87                           | 0-1830              | 27 - 77                    |
| C (Acelerador)       | 23.85  | 1.78                           | 0-1830              | 27 - 77                    |
| D (Retardador)       | 16.28  | 1.97                           | 1830-3660           | 77 - 127                   |
| E (Retardador)       | 16.28  | 1.97                           | 3050-4268           | 77 - 143                   |
| F (Retardador)       | 16.28  | 1.92                           | 3280-4880           | 110- 160                   |
| G (Básico)           | 18.93  | 1.90                           | 0-2440              | 27 - 93                    |
| H (Básico)           | 16.28  | 1.97                           | 0-2440              | 27 - 93                    |

T a b l a N° 3

### Propiedades de los cementos :

Las especificaciones nominan las propiedades físicas y químicas de las diferentes clases de cemento, que satisfacen la mayor parte de las condiciones del pozo.

Las propiedades de un cemento (tiempo de fraguado, desarrollo de resistencia, etc.) cambian con :

1. Proporción de los componentes.
2. Tamaño de las partículas.
3. Cantidad de agua.
4. Temperatura y presión.

### PROPIEDADES :

|                        |   |   |
|------------------------|---|---|
| Alta Resistencia       | { | -Incrementa el contenido $C_3S$           |
|                        | { | -Trituración más fina                     |
| Mayor Retardación      | { | -Control del contenido de $C_3S$ y $C_3A$ |
|                        | { | -Trituración más gruesa                   |
| Calor de Hidratación   | - | Limitando el contenido de $C_3S$ y $C_3A$ |
| Resistencia al Sulfato | - | Limitando el contenido de $C_3A$          |

La resistencia de un cemento la dan los silicatos y los componentes con aluminio influyen en el tiempo del fraguado.

### Hidratación del cemento :

1. Hidratación (reacción con agua). Comienza cuando se-

agrega agua al cemento provocando una reacción exoté  
mica - libera calor. Una observación del incremento -  
de temperatura por medio de un registro señalará la ci  
ma probable de la léchada de cemento en el espacio anu  
lar.

2. Calidad del Cemento. Con el consistómetro se determi-  
na el tiempo de fraguado y con una prensa la resisten-  
cia desarrollada por el tiempo de fraguado.

El tiempo de fraguado está en función de la presión y de  
la temperatura. Un aumento en la cantidad de agua incrementa-  
el tiempo de fraguado de cementos no retardados (Tipo A, C, G,  
H).

Los cementos retardados (Tipo D, E, F) con un incremento  
de agua o sólidos pueden acortar el tiempo de fraguado debido  
a que disminuye la concentración de retardador.

### 1.3 CEMENTOS ESPECIALES EN LA INDUSTRIA PETROLERA

Los Cementos Especiales son materiales de cementación usa-  
dos para tal fin en los pozos petroleros, dando su calidad y-  
uniformidad, son generalmente controlados; éstos son :

1. CEMENTOS PORTLAND POZOLANICO
2. CEMENTOS CAL - POZOLANA
3. CEMENTOS DE RESINA O PLASTICOS
4. CEMENTO YESO

5. CEMENTOS ACEITE-DIESEL
6. CEMENTOS DE EXPANSION
7. CEMENTOS REFRACTARIOS
8. CEMENTOS LATEX
9. CEMENTOS PARA ZONAS FRIAS

1.3.1. CEMENTOS POZOLANICOS. Incluyen un material de sílice natural o artificial, procesado o no en presencia de cal y agua, se utilizan para disminuir la densidad de la lechada de cemento.

1.3.2. CEMENTOS CAL-POZOLAN. Son usualmente mezclas de ceniza volcánica (sílice), cal hidratada y pequeñas cantidades de cloruro de calcio. A bajas temperaturas sus reacciones son más lentas, por lo tanto son recomendados para cementación primaria a temperaturas arriba de los 60° C.

Las ventajas de estos tipos de cementos son fácil retardo, baja densidad, económicos y con fuerzas de estabilidad a altas temperaturas.

1.3.3. CEMENTOS DE RESINA O PLASTICOS. Son especialmente usados para taponar selectivamente agujeros abiertos, perforaciones forzadas y tapones de abandono. Sus componentes -- son agua, resinas líquidas y un catalizador mezclado con un -- cemento API clase A, B, G o H. Una propiedad de estos cementos es, cuando se aplica presión a la lechada la fase de la --

resina puede ser forzada en una zona permeable y de un sello dentro de la formación. Estos cementos son usados en pozos - de volúmenes relativamente pequeños. Son efectivos a temperaturas en el rango de 15.6° C a 93.3° C.

1.3.4. CEMENTOS YESO. Se utilizan para realizar los -- trabajos de cementación; normalmente están disponibles en forma :

- Semihidratada
- Semihidratada conteniendo un aditivo de resina pulverizada.

La propiedad de estos cementos es su capacidad de aceleración y expansión. Son mezclados con cementos API, Clase A, G y H en concentraciones de 8 a 10%, para producir propiedades Tixotrópicas; esta combinación es particularmente útil en pozos someros.

1.3.5. CEMENTOS DE ACEITE DIESEL. Para control de agua en perforación o en producción de pozos, estas lechadas son - frecuentemente usadas con un surfactante, están básicamente - compuestos de cementos API clase A, B, G o H. Tienen ilimitado el tiempo de bombeo y no fraguará hasta colocarlo en una - zona con presencia de agua. La función del surfactante es reducir la cantidad de aceite para mojar las partículas del cemento.

Algunas composiciones del cemento aceite-diesel contienen un surfactante aniónico cuyo efecto es extender el tiempo de espesamiento. Es usado para cortar el agua, también - para reparar fugas en la tubería de revestimiento, combatir ciertos problemas de pérdida de circulación a fin de taponar canales atrás de la tubería y controlar la penetración de la lechada.

1.3.6. CEMENTOS DE EXPANSION. Para ciertas condiciones del fondo del agujero, ésto es deseable para tener un cemento que se expanda contra el enjarre del filtrado y la tubería. La reacción que causa esta expansión es el proceso de formación de cristales que toma lugar entre los sulfatos y los componentes del aluminato tricálcico en los cementos - Portland. A estos cementos se les ha agregado un anhídrido de sulfoaluminato de calcio, sulfato de calcio y óxido de -- calcio (cal).

1.3.7. CEMENTOS DE ALUMINATO DE CALCIO (REFRACTARIOS) Estos cementos contienen altas cantidades de aluminio, fabricados con bauxita, caliza y calor; la bauxita reemplaza a la arcilla o a la pizarra. Un análisis de los cementos refractarios muestra que contienen aproximadamente 40% de cal y pequeñas cantidades de sílice y fierro.

Los aluminatos de calcio producen altos esfuerzos tem -

pranos, grande resistencia a temperaturas altas y al ataque -- por la corrosión química; por eso son usados en pozos donde la temperatura tiene rangos de 399°C a 1093°C.

Estos productos pueden ser acelerados o retardados para ajustarse a las condiciones de cada pozo. La adición de un cemento refractario a uno ordinario causaría un rápido fraguado, por lo tanto cuando ambos sean manejados en el campo, se almacenarán separadamente.

1.3.8. CEMENTOS LATEX. Es una mezcla de un cemento API clase A, G o H con un líquido o un latex pulverizado.

Químicamente son identificados como un acetato de polivinil o una emulsión de butadiene estirone. Mejoran el enlace de las fuerzas y el control de filtración de una lechada de cemento en los pozos. El latex líquido es agregado en relaciones aproximadamente de un galón por saco de cemento.

1.3.9. CEMENTOS PARA ZONAS FRIAS (PERMAFROST). Se presentan problemas al cementar la tubería de revestimiento conductora y superficial en un ambiente frío. A lo largo del Arctico hay formaciones de hielo extendidas a profundidades hasta de 3000 pies (914.6 m.), normalmente se desea usar un cemento de fraguado rápido; para condiciones de baja temperatura el cemento yeso mezclado con cementos refractarios han sido usados muy exitosamente.

## C A P I T U L O N º 2

### DISEÑO DE LECHADAS E HIDRAULICA EN LA CEMENTACION

#### 2.1 GENERALIDADES

La cementación de los pozos es el proceso de mezclar cemento con agua y bombearlo al fondo del pozo por el interior de la tubería de revestimiento y colocar la lechada de cemento en las zonas críticas del espacio anular.

Las principales funciones del proceso de cementación son restringir el movimiento entre formaciones, enlazar y soportar la tubería de revestimiento.

Además de aislar las zonas productoras de aceite, gas y agua; el cemento también ayuda a :

1. Proteger la tubería de revestimiento de la corrosión.
2. Controlar reventones formando un sello rápidamente.
3. Proteger la tubería de revestimiento de altas presiones en las perforaciones profundas.
4. Sellar zonas de pérdida de circulación o zonas ladronas

Los factores que influyen en el diseño de la lechada de cemento son : las terminaciones profundas, temperaturas y presiones del pozo y las condiciones del agujero. Así como, los que afectan en el diseño de la lechada de cemento estos son :

1. Profundidad del pozo.

2. Temperatura del pozo.
3. Presión de la columna de lodo.
4. Viscosidad y contenido de agua en la lechada de cemento.
5. Tiempo de bombeo o espesamiento.
6. Fuerza requerida del cemento para soportar la tubería.
7. Calidad del agua disponible para mezclar.
8. Tipo de fluido de perforación y aditivos del fluido de perforación.
9. Densidad de la lechada de cemento.
10. Calor de hidratación.
11. Permeabilidad del fraguado de cemento.
12. Control de la filtración.
13. Resistencia al agua salobre del fondo del agujero.

Muchas de las habilidades para diseñar una lechada de cemento han resultado de la estandarización del equipo de laboratorio y los procedimientos de pruebas utilizados para simular las condiciones del pozo.

En cualquier pozo es necesario un conocimiento exacto de la temperatura estática o dinámica del fondo del mismo; para seleccionar una composición de cemento. Muchos pozos profundos no son tan calientes como se supone y subestimar temperaturas en el diseño de la lechada puede resultar una canalización

del gas en el cemento o una falla del cemento en la cima. De datos obtenidos por el API, recolectados de las temperaturas circulando en el fondo del agujero, revelan que éstas en el fondo del pozo disminuyen después que el lodo ha circulado de 3 a 4 horas.

La temperatura y la presión influyen sobre el fraguado -- del cemento, mientras que la profundidad rige el tiempo de colocación.

Todas las clases de cementos API pierden fuerza y ganan permeabilidad cuando se exponen a altas temperaturas. La máxima fuerza es alcanzada entre 110°C y 127°C, arriba de esta temperatura las fuerzas disminuyen.

Una típica composición de cemento consiste de : cemento - API clase G o H conteniendo 35% de Sílice de fluor (arena sílica), un dispersante, aditivos pesados para densidad, Cloruro de Potasio o Cloruro de Sodio más un retardador. Esta composición tendrá una densidad de 2.1 gr/c.c. a 2.34 gr/c.c., su tiempo de espesamiento será de 3 a 4.5 hrs. y su pérdida de fluido será de 60 c.c. o menos en 1,000 lb/pg<sup>2</sup>.

## 2.2. ANALISIS HIDRAULICO DE LA OPERACION DE CEMENTACION

En las operaciones de cementación de pozos es importante-considerar correctamente el comportamiento hidráulico en los-

trabajos de cementación de tuberías de revestimiento.

Dos parámetros importantes para definir el comportamiento del flujo son:

1. Índice del comportamiento del fluido.
2. Índice de consistencia.

Estas propiedades de la lechada sirven como datos para -- calcular el número de Reynolds y la Velocidad Crítica que se -- utilizan para establecer el patrón de flujo, ya sea flujo ta -- pón o turbulento.

La técnica a seguir en una cementación es seleccionar, en función de las características de la formación expuesta, las -- propiedades de la lechada de cemento, además el diseño debe -- permitir obtener :

1. Un desplazamiento eficaz del fluido de control en el -- espacio anular.
2. Un decremento en las caídas de presión durante el des -- plazamiento de la lechada.

Como resultado de investigaciones se ha establecido que, -- utilizando flujo turbulento se alcanza un desplazamiento más -- efectivo del lodo en el espacio anular, produciendo una mejor -- adherencia entre la pared del pozo y el cemento. Una desventaja de este régimen ocasiona elevadas caídas de presión, provo -- cando una limitación a formaciones cuyo gradiente de presión --

de fractura sea menor que el gradiente de presión generado durante la operación de cementación.

Como obtener los valores de los índices a partir de datos obtenidos con el Viscosímetro multirotacional :

$$n' = 3.32 \text{ Log } \frac{\text{lect. } 600}{\text{lect. } 300}$$

$$K' = \frac{\text{lect. } 300(N)(1.066)}{100(511)^{n'}}$$

donde :

$n'$  : es el índice de comportamiento del flujo (adimensional)

$K'$  : es el índice de consistencia  $(\frac{\text{lb} \cdot \text{seg}}{\text{pie}^2})$

$N$  : es la extensión del rango del factor del resorte de torsión Fann; para cálculos donde la Viscosidad Plástica y el Punto Cedente son conocidos.

$$n' = 3.32 \text{ Log } \frac{2(V_p + Y_p)}{V_p + Y_p}$$

$$K' = \frac{N(V_p + Y_p)(1.066)}{100(511)^{n'}}$$

donde :

1.066 : es el factor de cambio para diferentes combinaciones del agitador y el rotor.

El flujo turbulento no implica tener un buen desplazamiento, dado que sólo reduciendo la viscosidad se puede obtener éste y una reducción excesiva de la viscosidad provocaría interdigitación entre la lechada de cemento y la columna de lodo.

Procedimiento y fórmulas para calcular el comportamiento de flujo :

Velocidad de Desplazamiento

$$V_d = \frac{17.15 \text{ qb}}{d_i^2} = \frac{3.057 \text{ qfc}}{d_i^2}$$

$V_d$  = La Velocidad de Desplazamiento (pie/seg)

$q_b$  = Ritmo de Bombeo (bl /min)

$q_{fc}$  = Ritmo de Bombeo (pie<sup>3</sup>/min)

Determinación de la velocidad crítica, es decir la velocidad en el espacio anular en la zona por cementar, empleando el siguiente modelo matemático :

$$V_c = \left[ \frac{1129 K' (96/d_i)^{n'}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n'}} \quad \text{--- (1)}$$

$V_c$  = La velocidad crítica (pie/seg)

$d_i$  = Diámetro interior de la tubería

Para el espacio anular  $d_i = d_h - d_t$

$d_h$  = Diámetro del pozo (pg)

$d_t$  = Diámetro exterior de la T.R. (pg)

$\rho$  = Densidad de la lechada de cemento (lb/gal)

La ecuación (1) es una deducción algebraica de la ecuación del Número de Reynolds, considerando el Número de Reynolds igual a 2100, donde comienza la turbulencia.

$$NRe = \frac{1.86 v^{(2-n')} \rho}{K' (96/d_i)^{n'}}$$

Con esta ecuación obtenemos la Velocidad para cualquier NRe

$$2100 = \frac{1.86 v^{(2-n')}}{K' (96/di)^{n'}}$$

$$2100 K' (96/di)^{n'} = 1.86 v^{(2-n')} \rho$$

$$v^{(2-n')} = \frac{2100 K' (96/di)^{n'}}{1.86 \rho}$$

$$\therefore v = \left[ \frac{1129 K' (96/di)^{n'}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n'}}$$

NRe = Al Número de Reynolds (adimensional)

La Presión Hidrostática :  $P_h = 0.052 L \rho$

$P_h = A$  la presión hidrostática (lb/pg<sup>2</sup>)

$L = A$  la Altura de la Columna (pies)

Caída de Presión por Fricción

$$\Delta P_f = \frac{0.039 L \rho v^2 f}{di}$$

$$f = 0.00454 + 0.645 (NRe)^{-0.7}$$

$\Delta P_f =$  Caída de Presión por Fricción (lb/pg<sup>2</sup>)

$f =$  Factor de Fanning (adimensional)

Potencia Hidráulica

$$HHP = 0.0245 P_{wh} Q_b$$

$$P_{wh} = \Sigma \Delta P + P_{ha} - P_{hc}$$

$\Sigma \Delta P =$  La suma de caídas de presión (lb/pg<sup>2</sup>)

$P_{wh} = A$  la Presión de Operación en la Superficie.

$P_{ha} =$  Presión Hidrostática de los fluidos en el espacio anular.

$P_{hc}$  = A la Presión Hidrostática de los fluidos en el interior de la tubería de revestimiento.

#### Ejemplo de un Análisis Hidráulico

Cementar una tubería de revestimiento de 7" en un pozo - que se está perforando con una barrena de 8 1/2" de diámetro a una profundidad de 12,136 pies. empleando el volumen de la chada de cemento de acuerdo al gasto crítico y con un tiempo de contacto en la zapata de 10 min.

La última tubería de revestimiento cementada es de - - 9 5/8" de 47 lb/p.a 10,168 pies.

Tubería de 7" de diámetro exterior y 6.004 de diámetro interior.

| GRADO | PESO<br>lb/pie | ROSCA | PROFUNDIDAD<br>de a | LONGITUD<br>pies | CAPACIDAD<br>bl/pie |
|-------|----------------|-------|---------------------|------------------|---------------------|
| V-150 | 35             | BCN   | 12136 9840          | 2296             | 0.0350              |
| P-110 | 35             | BCN   | 9840 6560           | 3280             | 0.0350              |
| N- 80 | 35             | BCN   | 6560 0              | 6560             | 0.0350              |

Capacidad entre la tubería de revestimiento y el agujero es : 0.0226 bl/pie.

Capacidad entre tuberías de revestimiento de 7" y 9 5/8" es : 0.0256 bl/pie.

El diámetro interior de la tubería de revestimiento de - 9 5/8" es = 8.681"

Las propiedades reológicas de los fluidos son :

|   | LECHADA DE<br>CEMENTO | LODO  |
|---|-----------------------|-------|
| $n'$  | 0.30                  | 0.29  |
| $K' \frac{\text{lb} \cdot \text{seg}^{n'}}{\text{pie}^2}$ | 0.166                 | 0.065 |
| ( $\frac{\text{lb}}{\text{gal}}$ )                        | 13.5                  | 11.25 |
| Gradiente de Presión                                      |                       |       |
| ( $\frac{\text{lb}}{\text{pie}^2}$ )                      | 0.702                 | 0.585 |

Calculamos la Velocidad en el Espacio Anular y el Gasto

Crítico del Cemento.

$$V_c = \left[ \frac{1129(0.166) \left[ \frac{96}{8.5-7} \right]^{0.3}}{13.5} \right]^{\frac{1}{2-0.3}} = 9.79 \text{ pie/seg}$$

$$q_b = \frac{9.79(8.5^2 - 7^2)}{17.15} = 13.27 \text{ bl/min}$$

Velocidad entre tuberías de revestimiento

$$v = \frac{13.27(17.15)}{(8.681^2 - 7^2)} = 8.635 \text{ pie/seg}$$

Velocidad en el interior de la tubería de revestimiento

$$v = \frac{13.27(17.15)}{(6.004)^2} = 6.31 \text{ pie/seg}$$

Volumen de lechada 13.27 bl/min (10 min) = 132.7 bl

Cálculo de las Caídas de Presión (1000 pies de longitud)

a) Cemento en el interior de la tubería de revestimiento

$$NRE = \frac{1.86(6.31)^{(2-0.3)}(13.5)}{0.166(96/6.004)^{0.3}} = 1510$$

$$f = 0.00454 + 0.645 (\text{NRe})^{-0.7} = 0.00454 + 0.645(1510)^{-0.7} = 0.00838$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(13.5)(6.31)^2(0.00838)}{6.004} = 29.26 \frac{\text{lb/ps}^2}{1000 \text{ pies}}$$

b) Cemento en el Espacio Anular :  $\text{NRe} = 2100$

$$f = 0.00454 + 0.645(2100)^{-0.7} = 0.00759; \text{NRe}=1755; f=0.008$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(13.5)(9.79)^2(0.00759)}{1.5} = 255.3 \frac{\text{lb/ps}^2}{1000 \text{ pies}}$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(13.5)(8.635)^2(0.00799)}{1.681} = 186.7 \frac{\text{lb/ps}^2}{1000 \text{ pies}}$$

c) Lodo en el interior de la tubería de revestimiento.

$$\text{NRe} = \frac{1.86(6.31)^{1.71}(11.25)}{0.066(96/6.004)^{0.29}} = 3,311.8$$

$$f = 0.00454 + 0.645 (3,311.8)^{-0.7} = 0.00676$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(11.25)(6.31)^2(0.00676)}{6.004} = 19.7 \frac{\text{lb/ps}^2}{1000 \text{ pies}}$$

d) Lodo en el Espacio Anular

$$\text{NRe} = \frac{1.86(9.79)^{1.71}(11.25)}{0.066(96/1.5)^{0.29}} = 4,694.3$$

$$f = 0.00454 + 0.645(4,694.3)^{-0.7} = 0.0063$$

$$\text{NRe} = \frac{1.86(8.635)^{1.71}(11.25)}{0.066(96/(8.681-7))^{0.29}} = 3,914$$

$$f = 0.00454 + 0.645 (3,914)^{-0.7} = 0.00651$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(11.25)(9.79)^2(0.0063)}{1.5} = 176.6 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}$$

$$\Delta P = \frac{0.039(1000)(11.25)(8.635)^2(0.00651)}{1.681} = 127 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}$$

Altura de la lechada en el interior de la tubería de revestimiento.

$$2,290 \text{ pies } (0.035) \text{ bl/pie} = 80.36 \text{ bl}$$

$$132.7 \text{ bl} - 80.36 \text{ bl} = 52.34 \text{ bl}$$

$$52.34 \text{ bl} / 0.035 \text{ bl/pie} = 1,495.4 \text{ pies}$$

$$\begin{aligned} \text{La altura de la lechada es} &= (2,296 + 1,495.4) \text{ pies} = \\ &= 3,791.4 \text{ pies} \end{aligned}$$

Análisis Hidráulico de la lechada de cemento en el interior de la tubería de revestimiento y el lodo en el espacio anular.

$$3,791 \text{ pies } (29.26 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}) = 110.94 \text{ lb/pg}^2$$

$$8,344.6 \text{ pies } (19.70 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}) = 164.4 \text{ lb/pg}^2$$

$$10,168 \text{ pies } (127 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}) = 1,291.3 \text{ lb/pg}^2$$

$$1,968 \text{ pies } (176.6 \frac{\text{lb/pg}^2}{1000 \text{ pies}}) = 347.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Sigma \Delta P = (110.94 + 164.4 + 1,291.3 + 347.5) \text{ lb/pg}^2 = 1,914 \text{ lb/pg}^2$$

$$\begin{aligned} P_{hc} &= (3,791.4 \text{ pies}) 0.702 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}} + 8,344.6 \text{ pies} (0.585 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}}) = \\ &= 7,543.2 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

$$P_{ha} = 12,136 \text{ pies } (0.585 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}}) = 7,099.6 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wh} = (1,914 + 7,099.6 - 7,543.2) (\text{lb/pg}^2) = 1,470 \text{ lb/pg}^2$$

La presión de 1,470 lb/pg<sup>2</sup> deberá registrarse en la superficie cuando la primera gota de cemento sale por la zapata.

Cálculo de la Potencia Hidráulica

$$HHP = 0.0245 (1,470) (13.27) = 478 \text{ HP}$$

Análisis hidráulico de la lechada de cemento en el interior de la tubería de revestimiento y en el espacio anular - - (antes de la llegada del tapón al cople).

De un total de 132.7 bl de cemento se calcula el volumen de lechada de cemento en el interior de la tubería de revestimiento. La distancia de la zapata guía al cople diferencial es de dos tramos, aproximadamente 23.5 m. = 77.1 pies.

$V_1 = 0.035 \text{ bl/pie}(77.1 \text{ pies}) = 2.7 \text{ bl}$  en el interior de la tubería de revestimiento y el volumen total de lechada, - - -

$V_{t1} = 132.7 \text{ bl}$  le restamos el  $V_1 = 2.7 \text{ bl}$  y el volumen remanente quedará colocado en el espacio anular.

$$V_{1a} = (132.7 - 2.7) \text{ bl} = 130 \text{ bl}$$

y la altura de los 130 bl de cemento será :

$$130 (\text{bl}) / (0.0226 \text{ bl/pie}) = 5,752.2 \text{ pies}$$

$$(5,752.2 - 1,968) \text{ pies} = 3,784.2 \text{ pies}$$

$$3,784.2 \text{ pies} (0.0226 \text{ bl/pie}) = 85.5 \text{ bl}$$

$$85.5 \text{ bl} / (0.0256 \text{ bl/pie}) = 3,339.8 \text{ pies}$$

$$H_a = (1,968 + 3,339.8) \text{ pies} = 5,307.8 \text{ pies}$$

Caídas de Presión en el Interior de la T.R.

$$77.1 \text{ pies } (29.26 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}) = 2.25 \text{ lb/pg}^2$$

$$12,058.9 \text{ pies } (19.70 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}) = 238 \text{ lb/pg}^2$$

Caídas de Presión en el espacio anular.

$$1,968 \text{ pies } (255.3 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}) = 502.4 \text{ lb/pg}^2$$

$$3,339.8 \text{ pies } (186.7 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}) = 623.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$6,828.2 \text{ pies } /127 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}) = \frac{997.2}{2,233} \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Suma de las caídas de presión : } \Sigma \Delta P_f = 2,233.0 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{hc} = (12,058.9 \text{ pies}) 0.585 \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}} + 77.1 \text{ pies} (0.702) \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pie}} =$$

$$= 7,108 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{ha} = 5,307.8 \text{ pies} (0.702 \text{ lb/pg}^2) + 6,828.2 \text{ pies} (0.585 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}) =$$

$$= 7,720.6 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{wh} = (2,233 + 7,720.6 - 7,108) \text{ lb/pg}^2 = 2,846 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{HP} = 0.0245 (2,846) (9.79) = 682 \text{ Hp}$$

Volumen total de lodo para desplazar el cemento.

$$12,136 \text{ pies } (0.035 \text{ bl/pie}) = 424.76 \text{ bl}$$

$$77.1 \text{ pies } (0.035 \text{ bl/pie}) = 2.7 \text{ bl}$$

$$424.76 \text{ bl} - 2.7 \text{ bl} = 422.1 \text{ bl de lodo para desplazar el cemento.}$$

Cálculo del tiempo de llegada del tapón al cople diferencial :  $422.1 \text{ bl} / (13.27 \text{ bl/min}) = 31.8 \text{ min} = 32 \text{ min.}$

Obtener el gradiente de presión en el interior de la T.R.

La presión hidrostática de los fluidos en el interior de

la tubería de revestimiento es :  $P_{hc} = 7,543.2 \text{ lb/pg}^2$

Cálculo del gradiente de la columna de fluidos.

$$\text{Grad.} = (\Sigma \Delta P_f + P_{hc}) / \text{Prof.}$$

$$\text{Grad.} = \frac{(7,543.2 + 1,914) \text{ lb/pg}^2}{12,136 \text{ pies}} = 0.7793 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

### 2.3 EFECTO DEL TUBO EN "U" EN LA CEMENTACION DE POZOS

Ejemplo del cálculo de la cementación. Se supone que no existe fricción.

Datos del pozo :

T. R. de  $9 \frac{5}{8}$ " de 47 lb/p a una profundidad de 1,220 m.

T. R. de 7" de 35 lb/p a una profundidad de 2,745 m.

Diámetro del agujero  $\varnothing 1 \frac{1}{2}$ "

Datos del lodo :

Lodo Bentonítico

Densidad 1.10 gr/c.c.

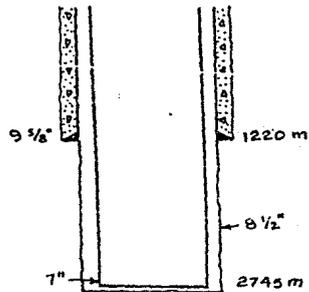
Programa de cementación

Espaciador :

Densidad 1.32 gr/c.c.

Lechada de cemento tipo G + 1.1 lto/saco de Líquido Flac - -  
(D73) + 0.5% TTC I Sólido (D65) + 0.15% Lignosulfonato de Calcio (D13) .

Densidad 1.9 gr/c.c.



|                              |   |   |
|------------------------------|---|---|
| Gasto del espaciador         | : | 4 BPM                                     |
| Gasto de la lechada          | : | 5 BPM                                     |
| Volumen de desplazamiento    | : | 344 bl                                    |
| Area del interior de la T.R. | : | 0.0194 m <sup>2</sup>                     |
| Area del espacio anular      | : | 0.0118 m <sup>2</sup>                     |
| Volumen del espaciador       | : | 9.54 m <sup>3</sup>                       |
| Volumen de cemento           | : | 19.53 m <sup>3</sup>                      |
| Fluido de desplazamiento     | : | Salmuera con una densidad de 1.02 gr/c.c. |

Gasto saliendo durante el bombeo del espaciador.

Condiciones Bajo Equilibrio :

$$t=t_1 : \rho_1 h_1 = x_1 \rho_c + \frac{Q_e}{A_r} t_1 \rho_e \quad (1)$$

$$t=t_2 : \rho_2 h_2 = x_2 \rho_c + \frac{Q_e}{A_r} t_2 \rho_e \quad (2)$$

donde  $h_1 = h_2$

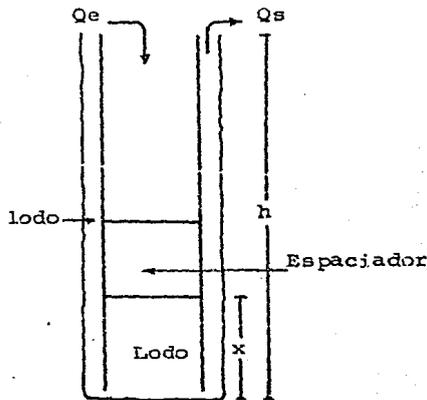
a la Ecuación (2) le restamos (1)

$$0 = (x_2 - x_1) \rho_c + (t_2 - t_1) \frac{Q_e}{A_r} \rho_e$$

reagrupando

$$\frac{x_2 - x_1}{T_1 - T_2} = \frac{Q_e \rho_e}{A_r \rho_c} \quad \text{sabemos que } v = \frac{x}{t} \quad \text{entonces}$$

$$v = \frac{Q_e \rho_e}{A_r \rho_c} \quad \text{si } Q = v A$$



$$V A_r = \frac{Q_e \rho_e}{\rho_l} = \text{Gasto saliendo de la T.R.} = Q_s$$

$$Q_s = \frac{Q_e \rho_e}{\rho_l} = 5 \text{ BPM} \left( \frac{1.32}{1.10} \right) = 6 \text{ BPM}$$

Gasto saliendo durante el bombeo de la lechada

$$Q_s = \frac{Q_e \rho_c}{\rho_l} = 5 \text{ BPM} \left( \frac{1.9 \text{ gr/cm}^3}{1.10 \text{ gr/cm}^3} \right) = 8.64 \text{ BPM}$$

Vemos que el  $Q_s > Q_e$

Volumen de desplazamiento cuando el espaciador alcanza la zapata.

$$h \rho_l = \frac{V_e \rho_e}{A_r} + \frac{V_c \rho_c}{A_r} + \frac{V_d \rho_d}{A_r}$$

que tenemos que despejar  $V_d$

$$V_d = \left[ h \rho_l - \frac{V_e \rho_e}{A_r} - \frac{V_c \rho_c}{A_r} \right] \frac{A_r}{\rho_d} =$$

$$= \frac{h \rho_l A_r - V_e \rho_e - V_c \rho_c}{\rho_d} =$$

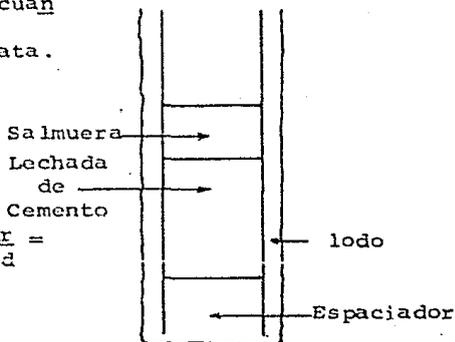
$$V_d = \frac{2,745(1.1)(0.0194) - 9.54(1.32) - 19.53(1.9)}{1.02} = 8.7 \text{ m}^3$$

$$V_d = 8.7 \text{ m}^3 \left( \frac{6.29 \text{ bl}}{1 \text{ m}^3} \right) = 54.7 \text{ bl y el nivel del fluido}$$

$$h_f = 2,745 - \frac{(9.54 + 19.53 + 8.7)}{0.0194} = 798.1 \text{ m}$$

Gasto cuando el espaciador rodea la zapata

$$V_e = X A_r + Y A_a \Rightarrow Y = \frac{V_e}{A_a} - \frac{X A_r}{A_a} \quad (1)$$



haciendo un balance a  $t = t_1$

$$(h - Y_1) \rho_L + Y_1 \rho_e = \frac{Vc}{Ar} \rho_c + \frac{Qe}{Ar} t \rho_d + \rho_e X_1$$

$$h \rho_L + Y_1 (\rho_e - \rho_L) =$$

$$= x_1 \rho_e + \frac{Vc}{Ar} \rho_c + \frac{Qe}{Ar} t \rho_d \quad (2)$$

Se sustituye (1) en (2)

$$h \rho_L + \frac{V_e}{Aa} (\rho_e - \rho_L) - \frac{X_1 Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L) =$$

$$x_1 \rho_e + \frac{V_e}{Ar} \rho_c + \frac{Qe}{Ar} t \rho_d$$

$$t = t_1; h \rho_L + \frac{V_e}{Aa} (\rho_e - \rho_L) = x_1 \left[ \rho_e + \frac{Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L) \right] +$$

$$+ \frac{Vc}{Ar} \rho_c + \frac{Qe}{Ar} t_1 \rho_d \quad (1')$$

$$t = t_2; h \rho_L + \frac{V_e}{Aa} (\rho_e - \rho_L) = x_2 \left[ \rho_e + \frac{Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L) \right] +$$

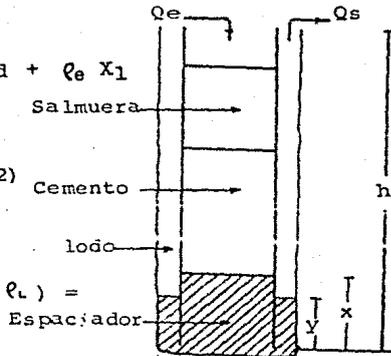
$$+ \frac{Vc}{Ar} \rho_c + \frac{Qe}{Ar} t_2 \rho_d \quad (2')$$

A la ecuación (1') le restamos la ecuación (2')

$$0 = x_1 - x_2 \left[ \rho_e + \frac{Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L) \right] + 0 + (t_1 - t_2) \frac{Qe}{Ar} \rho_d$$

$$\text{Agrupando } \frac{x_2 - x_1}{t_1 - t_2} = \frac{\frac{Qe}{Ar} \rho_d}{\rho_e + \frac{Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L)} = v$$

$$\text{Si } Q_s = v Ar \text{ entonces } Q_s = \frac{Qe \rho_d}{\rho_e + \frac{Ar}{Aa} (\rho_e - \rho_L)}$$



permanece constante mientras no se cambien los factores

$$\therefore Q_s = \frac{Q_e \rho_d}{\rho_e + \frac{Ar}{Aa}(\rho_e - \rho_L)} = \frac{5 \times 1.02}{1.32 + \frac{0.0194}{0.0118}(1.32 - 1.10)} = 3 \text{ BPM}$$

Gasto cuando la lechada rodea la zapata

$$Q_s = \frac{Q_e \rho_d}{\rho_c + \frac{Ar}{Aa}(\rho_c - \rho_L)} = \frac{5 \times 1.02}{1.9 + \frac{0.0194}{0.0118}(1.9 - 1.1)} = 1.60 \text{ BPM}$$

Volumen de lechada en el anular cuando se establece flujo continuo.

$$\begin{aligned} (h - \frac{V_e}{Aa} - y) \rho_L + \frac{V_e}{Aa} \rho_e + Y \rho_c &= \\ = X \rho_c + (h - x) \rho_d &\quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h \rho_L + \frac{V_e}{Aa}(\rho_e - \rho_L) + Y(\rho_c - \rho_L) &= \\ h \rho_d + x(\rho_c - \rho_d) &\quad (2) \end{aligned}$$

Si el  $V_e = YAr + YAa$  despejamos  $Y$

$$X = \frac{V_c}{Ar} - \frac{YAa}{Ar} \text{ lo reemplazamos en (2)}$$

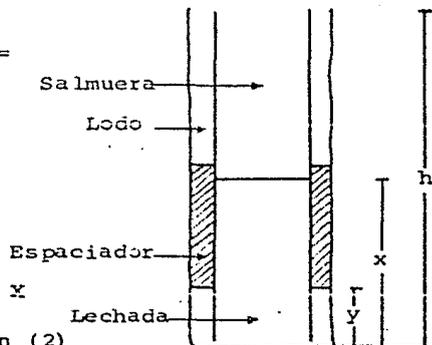
$$h \rho_L + \frac{V_e}{Aa}(\rho_e - \rho_L) + Y(\rho_c - \rho_L) = h \rho_d + \left(\frac{V_c}{Ar} - \frac{YAa}{Ar}\right)(\rho_c - \rho_d)$$

$$h \rho_L + \frac{V_e}{Aa}(\rho_e - \rho_L) - h \rho_d - \frac{V_c}{Ar}(\rho_c - \rho_d) =$$

$$= Y(\rho_L - \rho_c) + \frac{Aa}{Ar}(\rho_d - \rho_c)$$

$$\therefore Y = \frac{h(\rho_L - \rho_d) + \frac{V_e}{Aa}(\rho_e - \rho_L) + \frac{V_c}{Ar}(\rho_d - \rho_c)}{(\rho_L - \rho_c) + \frac{Aa}{Ar}(\rho_d - \rho_c)}$$

$$y = \frac{2745(1.1 - 1.02) + \frac{9.54}{0.0118}(1.32 - 1.1) + \frac{19.53}{0.0194}(1.02 - 1.9)}{(1.1 - 1.97) + \frac{0.0118}{0.0194}(1.02 - 1.9)} = 365.8 \text{ m.}$$



el volumen es igual a la altura por área  $V = YAa$

$$V = 365.8 \text{ m.} \cdot (0.0118 \text{ m}^2) = 4.32 \text{ m}^3 = 27.2 \text{ bl}$$

N O T A :

El espaciador y 27.2 bl de lechada han sido desplazados en flujo laminar hasta el momento de establecer flujo contínuo.

La lechada que sigue en flujo turbulento removerá el lodo canalizado, por el espaciador y los 27.2 bl de lechada.

Suponiendo que necesitamos 152.5 m. de lechada en flujo turbulento para limpiar el anular habrá :

365.8 m. + 152.5 m. = 518.3 m. de columna de lechada contaminada con lodo.

Un incremento adicional en el gasto mezclará el espaciador y el lodo, para formar un fluido con alta viscosidad y resistencia del gel, el cual necesitará más alto gasto para ponerlo en flujo turbulento.

Gasto necesario para conseguir el espaciador en flujo turbulento.

Como se calculó antes, el espaciador alcanza la zapata a 54.7 bl de desplazamiento.

Sabemos que  $Q_s = \frac{Q_e \rho_d}{\rho_e + \frac{A_r}{A_a}(\rho_e - \rho_L)}$  despejamos  $Q_e$  y hacemos --

$$Q_s = Q_{cr}$$

$$Q_e = \frac{Q_{cr}(\rho_e + \frac{A_r}{A_a}(\rho_e - \rho_L))}{\rho_d}$$

$$Q_e = \frac{6(1.32 + \frac{0.0194}{0.0118}(1.32-1.1))}{1.02} = 9.89 \text{ BPM}$$

Tiempo total para que el espaciador rodee la zapata =

$$= \frac{60 \text{ bl}}{6 \text{ BPM}} = 10 \text{ min.}$$

Volumen total bombeado = 9.89 BPM (10 min) = 98.9 bl

Volumen total cuando la lechada alcanza la zapata =

$$= (54.7 + 98.9) \text{ bl} = 153.6 \text{ bl}$$

Gasto necesario para colocar la lechada en flujo turbulento

$$Q_e = \frac{Q_{cr}(\rho_c + \frac{A_r}{A_a}(\rho_c - \rho_L))}{\rho_d} = \frac{8.64(1.9 + \frac{0.0194}{0.0118}(1.9-1.1))}{1.02} = 27.2 \text{ BPM}$$

∴  $Q_e = 27.2 \text{ BPM}$

El volumen de lechada en el anular cuando el nivel de fluido alcanza la superficie = 27.2 bl

Tiempo total para que la lechada rodee la zapata

$$T_t = \frac{27.2 \text{ bl}}{8.64 \text{ BPM}} = 3.15 \text{ min.}$$

Volumen total bombeado a 27.2 BPM

$$V_t = 27.2 \text{ BPM (3.15 min.)} = 85.6 \text{ bl}$$

Desplazamiento total cuando el nivel del fluido alcanza la superficie y se establece el flujo continuo :

$$D_t = (54.7 + 98.8 + 85.6) \text{ bl} = 239 \text{ bl}$$

## TERMINOLOGIA USADA

$h$  = Profundidad de la tubería de revestimiento (m)

$X$  = Columna de un fluido particular dentro de la tubería de revestimiento (m)

$Y$  = Columna de un fluido particular dentro del anular (m)

$V_e$  = Volumen del espaciador ( $m^3$ ) o (bl)

$V_c$  = Volumen del cemento ( $m^3$ ) o (bl)

$V_d$  = Volumen de desplazamiento ( $m^3$ ) o (bl)

$\rho_e$  = Densidad del espaciador (gr/c.c.)

$\rho_c$  = Densidad del cemento (gr/c.c.)

$\rho_d$  = Densidad del fluido de desplazamiento (gr/c.c.)

$A_r$  = Area interior de la tubería de revestimiento ( $m^2$ )

$A_a$  = Area del espacio anular ( $m^2$ )

$T_1$  y  $T_2$  = Tiempo arbitrario (min)

$Q_e$  = Gasto entrando (BPM)

$Q_s$  = Gasto saliendo (BPM)

$Q_{cr}$  = Gasto crítico (BPM) (espaciador o lechada)

## 2.4 DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO

Cálculos del peso y volumen de la lechada.

HI-DENSE N° 3 para incrementar el peso de la lechada  
(unidades métricas)

Cemento clase H 35% SSA-2, HI-DENSE N° 3 mezclado a

2.22 Kg/l

| M A T E R I A L                | PESO<br>(Kgm)     | VOLUMEN<br>ABSOLUTO<br>L/kg * | VOLUMEN<br>lts ** | REQUERI-<br>MIENTO<br>Agua(L)*** |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Cemento                        | 50                | x 0.3185 =                    | 15.93             | 21                               |
| 35% SSA-2(50 x 0.35)           | 17.5              | x 0.3802 =                    | 6.65              |                                  |
| HI-DENSE N° 3                  | H                 | x 0.1992 =                    | 0.1992H           |                                  |
| Agua para HI-DENSE<br>N° 3 (*) | 0.03H = 1.0       | x                             | 0.03H             | (H x 0.03)                       |
| Agua                           | <u>21.0</u> = 1.0 | x                             | <u>21.0</u>       |                                  |
|                                | 88.5+1.03H        |                               | 43.58+0.2292H     |                                  |

$$2.22 \frac{\text{Kg}}{\text{L}} = \frac{88.5 + 1.03 H}{43.58 + 0.2292 H}$$

$$2.22 (43.58 + 0.2292H) = 88.5 + 1.03 H$$

$$96.75 + 0.51 H = 88.5 + 1.03 H$$

$$96.75 - 88.5 = 1.03H - 0.51 H$$

$$8.25 = 0.52H$$

$$H = 15.8$$

|               |      |   |        |   |       |
|---------------|------|---|--------|---|-------|
| Cemento       | 50   | x | 0.3185 | = | 15.93 |
| 35% SSA-2     | 17.5 | x | 0.3802 | = | 6.65  |
| HI-DENSE N° 3 | 15.8 | x | 0.1992 | = | 3.15  |

Agua = 21.5 lt/saco (de agua) de la columna (5) =

$$= 21 + 0.03H = 21.474 \text{ lts.}$$

Rendimiento de la lechada = 47.2 lt/saco ; se obtuvo de la columna N° 4.

\* Consultar las Tablas Nos. 5 y 6 en la 5a. columna.

\*\* Volumen = Peso x Volumen absoluto.

(\*) Consultar Tabla N° 2

\*\*\* Consultar Tabla N° 1 ó Tabla N° 2

Ejemplo :

$$\frac{(4.3 + 5.2)}{2} \text{ Gal} = 4.75 \text{ Gal} \quad \text{por una regla de tres}$$

$$4.75 : 94 :: X : 110$$

$$X = \frac{4.75 (110)}{94} = 5.5 \text{ Galones} = 21 \text{ lts.}$$

#### CALCULOS DEL PESO Y VOLUMEN DE LA LECHADA

Requerimiento de agua para el peso de la lechada dada

Cemento clase H, 35% SSA-1, 18% de sal, mezclar a 16.3

lb/gal la densidad de la lechada.

Para resolver por W = Volumen de agua desconocido.

| MATERIAL    | PESO<br>Lbm   | VOLUMEN<br>ABSOLUTO<br>Gal/Lb<br>*** | VOLUMEN<br>Galón | REQUERI-<br>MIENTO<br>Agua (gal)<br>** |
|-------------|---------------|--------------------------------------|------------------|--|
| Cemento     | 94            | x 0.0382                             | = 3.6            | W                                      |
| 35% SSA-1   |               |                                      |                  |  |
| (94 x 0.35) | 32.9          | x 0.0456                             | = 1.5            |  |
| Agua *      | 8.33W         | = 8.33                               | x W              |  |
| 18% Salt    |               | <u>1.5 W x 0.0412</u>                | = <u>0.062 W</u> |  |
|             | 126.9 + 9.83W |                                      | 5.1 + 1.062W     |  |

$$* \text{ Peso} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Volumen Absoluto}} = \frac{W}{0.12} = 8.33 W$$

$$16.3 \text{ Lb/gal} = \frac{126.9 + 9.83 W}{5.1 + 1.062 W}$$

$$16.3(5.1 + 1.062 W) = 126.9 + 9.83 W$$

$$83.13 + 17.31W = 126.9 + 9.83 W$$

$$17.31W - 9.83W = 126.9 - 83.13$$

$$7.48W = 43.77$$

$$W = \frac{43.77}{7.48} = 5.85$$

|                    |            |   |        |   |             |
|--------------------|------------|---|--------|---|-------------|
| Cemento            | 94         | x | 0.0382 | = | 3.6         |
| 35% SSA-1          | 32.9       | x | 0.0456 | = | 1.5         |
| Agua               | 48.7       | = | 8.33   | x | 5.85        |
| 18% Sal (5.85x1.5) | <u>8.8</u> | x | 0.0412 | = | <u>0.36</u> |
|                    | 184.4      |   |        |   | 11.31       |

\*\* Tabla N° 1 ó 2

\*\*\* Tabla N° 3 ó 4

$$\text{Peso de la lechada} = \frac{184.4 \text{ lb}}{11.31 \text{ gal}} = 16.3 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Volumen de la lechada} = \frac{11.31 \text{ gal}}{7.48 \text{ gal/pie}^3} = 1.51 \text{ pie}^3/\text{saco}$$

$$\text{Sal} = 8.8 \text{ lb/saco}$$

$$\text{Agua} = 5.85 \text{ gal/saco}$$

#### OTRO PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL DISEÑO DE LA LECHADA

##### Caso N° 1 Cemento Salado

Anotamos todos los datos conocidos :

Lechada : Cemento Tipo II + 18% de NaCl + 0.8% Líquido Flac  
(Controlador de pérdida de fluido para cemento salado) +  
+ 0.1% Retardador de alta temperatura + 1.5 Lt/m<sup>3</sup> de antiespu  
mante líquido. Densidad = 1.80 gr/c.c.

| MATERIAL<br>(1) | %<br>(2) | PESO<br>(kgm)<br>(3) | DENSIDAD<br>(kg/lts)<br>(4)** | VOLUMEN<br>(lts)<br>(5)* |
|-----------------|----------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Cemento         | 100.0    | 50.0                 | 3.15                          | 15.87                    |
| Flac            | 0.8      | 0.4                  | 1.66                          | 0.24                     |
| Retardador      | 0.1      | 0.05                 | 1.25                          | 0.04                     |
| Antiespumante   | 0.15     | 0.001494X            | 0.996                         | 0.0015X                  |
| NaCl            | 18 PPA   | 0.18X                |                               |                          |
| Agua            | X        | <u>1.068 X</u>       | 1.0                           | <u>1.068X</u>            |
|                 |          | 50.45 + 1.25X        |                               | 16.15 + 1.0695X          |

\* De esta manera obtenemos la columna (5) de la Ec.Densidad

\*\* La densidad se obtiene de la Tabla N° 7 u 8.

$$= \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$(5) = \frac{(3)}{(4)} \quad \text{Sabemos que la } \rho = 1.8 \text{ gr/c.c.}$$

$$1.8 = \frac{50.45 + 1.25 X}{16.15 + 1.07 X} \quad 1.8(16.15 + 1.07X) = 50.45 + 1.25X$$

$$0.676 X = 50.45 - 29.07 = 21.38 \quad X = \frac{21.38}{0.676}$$

∴ X = 31.65 lts. de agua

Rendimiento = 16.15 + 1.0695 (31.65) = 50 lts. de lechada --  
por saco de cemento.

Agua de mezcla : = 31.65 lts. de agua por saco de cemento.

Caso N° 2 Referente a la Bentonita. Se agrega 5.3% de agua  
por cada 1% de Bentonita agregada a la mezcla.

| MATERIAL       | %     | PESO<br>(Kgm) | DENSIDAD<br>(kg/lts) | VOLUMEN<br>(lts) |
|----------------|-------|---------------|----------------------|------------------|
| Cemento        | 100.0 | 50.0          | 3.15                 | 15.87            |
| Agua de Mezcla | 46.0  | 23.0          | 1.0                  | 23.0             |
| Bentonita      | 8.0   | 4.0           | 2.65                 | 1.51             |
| Agua adicional | 42.4  | <u>21.2</u>   | 1.0                  | <u>21.2</u>      |
|                |       | 98.2          |                      | 61.58            |

$$\text{DENSIDAD} = \frac{98.2 \text{ kg}}{61.58 \text{ lts}} = 1.59 \frac{\text{kg}}{\text{lto}}$$

N O T A : Esto es para bentonita mezclada en seco, pero para bentonita prehidratada sólo se pondrá 2% a fin de obtener la misma densidad.

## REQUERIMIENTO DE AGUA

Muchas veces es necesario hacer cálculos de lechada usando - composiciones normalmente no listadas en los reportes de laboratorio. En esas condiciones es importante conocer los requerimientos de agua de diferentes aditivos para determinar el peso de la lechada y los volúmenes. Esta tabla puede usarse como guía en tales circunstancias.

| M A T E R I A L                 | REQUERIMIENTO DE AGUA   |
|---------------------------------|---|
| Cemento API Clase A y B         | 5.2 gals.(0.70 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento API Clase C             | 6.3 gals.(0.84 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento API Clase D y E         | 4.3 gals.(0.58 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento API Clase G             | 5.0 gals.(0.67 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento API Clase H             | 4.3-5.2 gals x saco *   |
| Cemento Chem Comp               | 6.3 gals.(0.84 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Attapulгите                     | Aproximadamente igual que la Bentonita  |
| Ciment Fondu                    | 4.5 gals.(0.60 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento Lumnite                 | 4.5 gals.(0.60 pie <sup>3</sup> ) x saco *  |
| Cemento Ligero Halliburton      | 7.7-10.9 gals x saco de 87 lb   |
| Cemento Trinity Litewate        | 7.7 gals.(1.03 pie <sup>3</sup> ) x saco de 75 lb. (máximo)                                 |
| Barita                          | 2.64 gals.(0.35 pie <sup>3</sup> ) x saco - de 100 lb.                                      |
| Bentonita (gel)                 | 1.3 gals.(0.174 pie <sup>3</sup> ) x 2% de cemento  |
| Carbonato de Calcio Pulverizado | Nada  |
| Cloruro de Calcio               | Nada  |
| Cal-Seal                        | 4.8 gals.(0.64 pie <sup>3</sup> ) x saco de 100 lb.   |
| CFR-1                           | Nada  |
| CFR-2                           | Nada  |
| D-AIR-1                         | Nada  |
| D-AIR-2                         | Nada  |
| Diacel A                        | Nada  |
| Diacel D                        | 3.3-7.4 gals. x 10% de cemento  |
| Diacel LWL                      | Nada (hasta 0.7%)<br>0.8-1.0 gal x 1% de cemento - (excepto gel o lechadas de -- Diacel D). |
| Gilsonita                       | 2.0 gals.(0.267 pie <sup>3</sup> ) x 50 lb  |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| HALAD-9                 | Nada (hasta 0.5%)<br>0.4-0.5 gal.x saco de cemento<br>arriba de 0.5%                    |
| HALAD-14                | Nada  |
| HALAD-22A               | Nada (hasta 0.5%) 0.4-0.5 gal.<br>x saco de cemento arriba de -<br>0.5%                 |
| Hi-Dense N° 3           | 0.36 gal.(0.048 pie <sup>3</sup> )x saco -<br>de 100 lb o 3% de peso.                   |
| HR-4                    | Nada  |
| HR-5                    | Nada  |
| HR-7                    | Nada  |
| HR-12                   | Nada  |
| HR-15                   | Nada  |
| HR-20                   | Nada  |
| Caliza Hidratada        | 0.153 gal.(0.020 pie <sup>3</sup> ) x lb.   |
| Hydromite               | 3.0 gals.(0.40 pie <sup>3</sup> )x saco de<br>100 lb.                                   |
| Iron Carbonate          | Nada  |
| LA-2 Latex              | 0-0.8 gals.x saco de cemento  |
| NF-P                    | Nada  |
| Perlita Regular         | 4.0 gals.(0.535 pie <sup>3</sup> ) x 8 lb.  |
| Perlita 6               | 6.0 gals.(0.80 pie <sup>3</sup> )x 38 lb.   |
| Poznix A                | 3.6-3.9 gals.(0.48 pie <sup>3</sup> )x74 lb   |
| Cloruro de Sodio        | Nada  |
| Arena Ottawa            | Nada  |
| Sílice en Polvo (SSA-1) | 1.6 gals.(0.21 pie <sup>3</sup> )x 35% de-<br>cemento (32.9 lb) ó 40% por<br>peso SSA-1 |
| SSA-2 Silica            | Nada  |
| Spacer Sperse           | Nada  |
| Spacer Mix (líquido)    | Nada  |
| Tuf Additive N° 1       | Nada  |
| Tuf Additive N° 2       | Nada  |
| Tuf Plug                | Nada  |

\* Saco de 94 lb.

## REQUERIMIENTO DE AGUA

Muchas veces es necesario hacer cálculos de lechada usando composiciones normalmente no listadas en los reportes de laboratorio. En esas condiciones es importante conocer los requerimientos de agua de diferentes aditivos para determinar el peso de la lechada y los volúmenes. Esta tabla puede usarse como guía en tales circunstancias.

| M A T E R I A L                 | REQUERIMIENTO DE AGUA   |
|---------------------------------|---|
| Cemento API Clase A y B         | 19.7 L/42.6 Kg x saco   |
| Cemento API Clase C             | 23.8 L/42.6 kg x saco   |
| Cemento API Clase D y E         | 16.3 L/42.6 Kg x saco   |
| Cemento API Clase G             | 18.9 L/42.6 Kg x saco   |
| Cemento API Clase H             | 16.3 a 19.7 L/42.6 Kg x saco  |
| Cemento Chem Comp               | 23.8 L/42.6 Kg x saco   |
| Attapulgite                     | Aproximadamente igual que la Bentonita  |
| Ciment Fondu                    | 17.0 L/42.6 Kg saco   |
| Cemento Lumnite                 | 17.0 L/42.6 Kg x saco   |
| Cemento Ligero Halliburton      | 29.1-41.3 L/39.5 kg x saco  |
| Cemento Trinity Litewate        | 29.1 L/34 Kg x saco (máximo)  |
| Rarjta                          | 10.0 L/45.4 Kg x saco   |
| Bentonita (gel)                 | 4.9 L/2% en cemento   |
| Carbonato de Calcio Pulverizado | Nada  |
| Cloruro de calcio               | Nada  |
| Cal-Seal                        | 18.2 L/45.4 Kg x saco   |
| CFR-1                           | Nada  |
| CFR-2                           | Nada  |
| D-AIR-1                         | Nada  |
| D-AIR-2                         | Nada  |
| Diacel A                        | Nada  |
| Diacel D                        | 12.5-28.0 L/10% en cemento  |
| Diacel LWL                      | Nada (hasta 0.7%)<br>3.0-3.8 L/1% en cemento<br>(excepto gel or lechadas de Diacel D) |
| Gilsonita                       | 7.6 L/22.7 Kg.  |
| HALAD-9                         | Nada (hasta 0.5%)<br>1.5-1.9 L/saco de cemento sobre 0.5%                             |
| HALAD-14                        | Nada  |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| HALAD-22A               | Nada (arriba de 0.5%)                                  |
|                         | 1.5-1.9 L/saco de cemento sobre 0.5%                   |
| Hi-Dense N° 3           | 1.4 L/45.4 Kg saco o 3% por peso                       |
| HR-4                    | Nada   |
| HR-5                    | Nada   |
| HR-7                    | Nada   |
| HR-12                   | Nada   |
| HR-15                   | Nada   |
| HR-20                   | Nada   |
| Caliza Hidratada        | 1.3 L/kg   |
| Hydromite               | 11.4 L/45.4 Kg x saco                                  |
| Iron Carbonate          | Nada   |
| LA-2 Latex              | 0-3.0 L/x saco de cemento                              |
| NF-P                    | Nada   |
| Perlita Regular         | 15.1 L/3.6 kg.   |
| Perlita 6               | 22.7 L/17.2 kg.  |
| Pozmix A                | 13.6-14.8 L/33.6 kg                                    |
| Sal (NaCl)              | Nada   |
| Arena Ottawa            | Nada   |
| Sílice en Polvo (SSA-1) | 6.1 L/35% en cemento (14.9 kg)<br>o 40% por peso SSA-1 |
| SSA-2 Sílica            | Nada   |
| Spacer Sperse           | Nada   |
| Spacer Mix (Líquido)    | Nada   |
| Tuf Additive N° 1       | Nada   |
| Tuf Additive N° 2       | Nada   |
| Tuf Plug                | Nada   |

Tabla N° 2

## UNIDADES EN INGLES

## PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES DE CEMENTACION

| MATERIAL                             | PESO A<br>GRANEL<br>lb/pie <sup>3</sup> | GRAVEDAD<br>ESPECIFICA | PESO<br>ABSOLU<br>TO |        | VOLUMEN<br>ABSOLUTO  |  |
|--------------------------------------|---|------------------------|----------------------|--------|----------------------|--|
|                                      |   |                        | Gals.                | gal/lb | pie <sup>3</sup> /lb |  |
| Cementos API                         | 94                                      | 3.14                   | 94                   | 0.0382 | 0.0051               |  |
| Attapulgate                          | 40.0                                    | 2.89                   | 86.6                 | 0.0415 | 0.0053               |  |
| Ciment Fondu                         | 90                                      | 3.23                   | 97                   | 0.0371 | 0.0050               |  |
| Cemento Lumnita                      | 90                                      | 3.20                   | 96                   | 0.0375 | 0.0050               |  |
| Trinity Lite-Wate                    | 75                                      | 2.80                   | 75.0                 | 0.0429 | 0.0057               |  |
| Barita                               | 135                                     | 4.23                   | 126.9                | 0.0284 | 0.0038               |  |
| Bentonita (gel)                      | 60                                      | 2.65                   | 79.5                 | 0.0453 | 0.0060               |  |
| Carbonato de Cal-<br>cio Pulverizado | 22.3                                    | 2.71                   | 80.9                 | 0.0445 | 0.0059               |  |
| Cloruro de Calcio<br>Hojuelas        | 56.4                                    | 1.96                   | 58.8                 | 0.0612 | 0.0082               |  |
| Cloruro de Calcio<br>Pulverizado     | 50.5                                    | 1.96                   | 58.8                 | 0.0612 | 0.0082               |  |
| Cal-Seal                             | 75                                      | 2.70                   | 81.0                 | 0.0444 | 0.0059               |  |
| CFR-1                                | 40.3                                    | 1.63                   | 48.9                 | 0.0736 | 0.0098               |  |
| CFR-2                                | 43.0                                    | 1.30                   | 39.0                 | 0.0923 | 0.0123               |  |
| CFR-2 (líquido)                      | -                                       | 1.18                   | -                    | -      | -                    |  |
| D-AIR 1                              | 25.2                                    | 1.35                   | 40.5                 | 0.0399 | 0.0119               |  |
| D-AIR 2<br>( 8.37#<br>gal)           | -                                       | 1.005                  | 30.1                 | 0.0119 | 0.0116               |  |
| Diacel A                             | 60.3                                    | 2.62                   | 78.6                 | 0.0458 | 0.0061               |  |
| Diacel B                             | 16.7                                    | 2.10                   | 63.0                 | 0.0572 | 0.0076               |  |
| Diacel LWL                           | 29.0                                    | 1.36                   | 40.8                 | 0.0882 | 0.0118               |  |
| Diesel Oil N° 1<br>(líquido)         | 51.1                                    | 0.82                   | 24.7                 | 0.1457 | 0.0195               |  |
| Diesel Oil N° 2<br>(líquido)         | 53.0                                    | 0.85                   | 25.5                 | 0.1411 | 0.0188               |  |
| Flocele                              | 15                                      | 1.42                   | -                    | -      | -                    |  |
| Gilsonita                            | 50                                      | 1.07                   | 32                   | 0.1122 | 0.0150               |  |
| HALAD-9                              | 37.2                                    | 1.22                   | 36.6                 | 0.0984 | 0.0131               |  |
| HALAD-14                             | 39.5                                    | 1.31                   | 39.3                 | 0.0916 | 0.0122               |  |
| HALAD-22A                            | 23.5                                    | 1.32                   | 36                   | 0.0984 | -                    |  |
| Hi-Dense N° 3                        | 187                                     | 5.02                   | 150.5                | 0.0239 | 0.0032               |  |
| HR-4                                 | 35                                      | 1.56                   | 46.8                 | 0.0760 | 0.0103               |  |
| HR-5                                 | 38.4                                    | 1.41                   | 41                   | 0.0851 | -                    |  |
| HR-6L(líquido)                       | -                                       | 1.21                   | -                    | -      | -                    |  |
| HR-7                                 | 30                                      | 1.30                   | 39                   | 0.0923 | 0.0123               |  |

|                  |      |      |      |        |        |
|------------------|------|------|------|--------|--------|
| HR-12            | 23.2 | 1.22 | 36.6 | 0.0984 | 0.0131 |
| HR-15            | 44.4 | 1.57 | 47.1 | 0.0765 | 0.0102 |
| HR-L (líquido)   | 76.6 | 1.23 | 36.9 | 0.0976 | 0.0130 |
| Caliza Hidratada | 31   | 2.20 | 66   | 0.0545 | 0.0073 |
| Hydromita        | 68   | 2.15 | 64.5 | 0.0538 | 0.0072 |

UNIDADES EN INGLES  
PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES DE CEMENTACION

| MATERIAL                                   | PESO A<br>GRANEL<br>lb/pie <sup>3</sup> | GRAVEDAD<br>ESPECIFICA | PESO<br>ABSOLU<br>TO. |        | VOLUMEN<br>ABSOLUTO  |  |
|--|---|------------------------|-----------------------|--------|----------------------|--|
|  |   |                        | Gals.                 | Gal/lb | pie <sup>3</sup> /lb |  |
| Iron Carbonate                             | 114.5                                   | 3.70                   | 110.9                 | 0.0324 | 0.0043               |  |
| KCl(en solución a<br>50°F con agua dulce   |   |                        |                       |        |                      |  |
| 3%   | -                                       | 2.70                   | -                     | 0.0443 | 0.0059               |  |
| 5%   | -                                       | 2.66                   | -                     | 0.0450 | 0.0060               |  |
| LA-2 Latex (líquido)                       | 68.5                                    | 1.10                   | 33                    | 0.1087 | 0.0145               |  |
| NF-1 (líquido)                             | 61.1                                    | 0.98                   | 29.4                  | 0.1225 | 0.0164               |  |
| NF-P                                       | 40                                      | 1.30                   | 39.0                  | 0.0923 | 0.0123               |  |
| Perlita Regular                            | 8                                       | 2.20                   | 66.0                  | 0.0546 | 0.0073               |  |
| Perlita 6                                  | 38                                      | -                      | -                     | 0.0499 | 0.0067               |  |
| Pozmix A                                   | 74                                      | 2.46                   | 74                    | 0.0487 | 0.0065               |  |
| Agua de mar                                | -                                       | 1.025                  | -                     | -      | -                    |  |
| Sal seca (NaCl)                            | 71                                      | 2.17                   | 65.1                  | 0.0553 | 0.0074               |  |
| Sal(en solución a 77°F<br>con agua dulce)  |   |                        |                       |        |                      |  |
| 6%-9.5 lb/gal                              | -                                       | -                      | -                     | 0.0384 | 0.0051               |  |
| 12%-1.0 lb/gal                             | -                                       | -                      | -                     | 0.0399 | 0.0053               |  |
| 18%-1.5 lb/gal                             | -                                       | -                      | -                     | 0.0412 | 0.0055               |  |
| 24%-2.0 lb/gal                             | -                                       | -                      | -                     | 0.0424 | 0.0057               |  |
| Sat-3.1 lb/gal                             | -                                       | -                      | -                     | 0.0445 | 0.0059               |  |
| Sal(en solución a 140°F<br>con agua dulce) |   |                        |                       |        |                      |  |
| Sat-3.1 lb/gal                             | -                                       | -                      | -                     | 0.0458 | 0.0061               |  |
| Arena (Ottawa)                             | 100                                     | 2.63                   | 78.9                  | 0.0456 | 0.0061               |  |
| Arina silica(SSA-1)                        | 70                                      | 2.63                   | 78.9                  | 0.0456 | 0.0061               |  |
| Spacer Sperse                              | 40.0                                    | 1.32                   | 39.6                  | 0.0909 | 0.0121               |  |
| Spacer Mix(líquido) ( 7.76#<br>gal)        |   | .932                   | 27.9                  | 0.0129 | 0.0017               |  |
| Arena Sílica(SSA-2)                        | 100                                     | 2.63                   | 78.9                  | 0.0456 | 0.0061               |  |
| Tuf Additive N° 1                          | -                                       | 1.23                   | 36.9                  | 0.0976 | 0.0130               |  |
| Tuf Additive N° 2                          | 15.38                                   | .88                    | 26.4                  | 0.1364 | 0.0182               |  |
| Tapón Tuf                                  | 48                                      | 1.28                   | 38.4                  | 0.0938 | 0.0125               |  |
| Agua                                       | 62.4                                    | 1.00                   | 30.0                  | 0.1200 | 0.0160               |  |

Tabla N° 4

## UNIDADES METRICAS

## PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES DE CEMENTACION

| M A T E R I A L                    | PESO A<br>GRANEL<br>Kg/m <sup>3</sup> | GRAVEDAD<br>ESPECIFICA | PESO<br>13.6<br>lbs. | VOLUMEN<br>ABSOLUTO<br>L/Kg |
|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Cementos API                       | 1506                                  | 3.14                   | 42.6                 | 0.3185                      |
| Attapulgita                        | 641                                   | 2.89                   | 39.3                 | 0.3460                      |
| Ciment Fondu                       | 1442                                  | 3.23                   | 44.0                 | 0.3096                      |
| Cemento Lumnita                    | 1442                                  | 3.20                   | 43.5                 | 0.3125                      |
| Trinity Lite-Wate                  | 1201                                  | 2.80                   | 34.0                 | 0.3571                      |
| Barita                             | 2162                                  | 4.23                   | 57.6                 | 0.2364                      |
| Bentonita (gel)                    | 961                                   | 2.65                   | 36.1                 | 0.3776                      |
| Carbonato de Calcio<br>Pulverizado | 357                                   | 2.71                   | 36.7                 | 0.3690                      |
| Cloruro de Calcio Hojuelas         | 903                                   | 1.96                   | 26.7                 | -                           |
| Cloruro de Calcio Pulverizado      | 809                                   | 1.96                   | 26.7                 | -                           |
| Cal-Seal                           | 1201                                  | 2.70                   | 36.7                 | 0.3704                      |
| CFR-1                              | 646                                   | 1.63                   | 22.2                 | -                           |
| CFR-2                              | 689                                   | 1.30                   | 17.7                 | -                           |
| CFR-2 (líquido)                    | -                                     | 1.18                   | -                    | -                           |
| D-AIR 1                            | 404                                   | 1.35                   | 18.4                 | -                           |
| D-AIR 2                            | -                                     | 1.005                  | -                    | -                           |
| Diacel A                           | 966                                   | 2.62                   | 35.7                 | -                           |
| Diacel D                           | 268                                   | 2.10                   | 28.6                 | 0.4762                      |
| Diacel LWL                         | 465                                   | 1.36                   | 18.5                 | -                           |
| Diesel Oil N° 1 (líquido)          | 819                                   | 0.82                   | 11.2                 | 1.2195                      |
| Diesel Oil N° 2 (líquido)          | 849                                   | 0.85                   | 11.6                 | 1.1765                      |
| Flocafe                            | 240                                   | 1.42                   | -                    | -                           |
| Gilsonita                          | 801                                   | 1.07                   | 14.5                 | 0.9346                      |
| HALAD-9                            | 596                                   | 1.22                   | 16.6                 | -                           |
| HALAD-14                           | 633                                   | 1.31                   | 17.8                 | -                           |
| HALAD-22A                          | 376                                   | 1.32                   | 16.3                 | -                           |
| Hi-Dense N° 3                      | 2995                                  | 5.02                   | 68.3                 | 0.1992                      |
| HR-4                               | 561                                   | 1.56                   | 21.2                 | -                           |
| HR-5                               | 615                                   | 1.41                   | 18.6                 | -                           |
| HR-6L(líquido)                     | -                                     | 1.21                   | -                    | -                           |
| HR-7                               | 481                                   | 1.30                   | 17.7                 | -                           |
| HR-12                              | 372                                   | 1.22                   | 16.6                 | -                           |
| HR-15                              | 711                                   | 1.57                   | 21.4                 | -                           |
| HR-L(líquido)                      | 1227                                  | 1.23                   | 16.7                 | -                           |
| Caliza Hidratada                   | 497                                   | 2.20                   | 29.9                 | 0.4545                      |
| Hydromita                          | 1089                                  | 2.15                   | 29.3                 | 0.4651                      |

Tabla N° 5

## UNIDADES METRICAS

## PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES DE CEMENTACION

- \* Equivalente a un saco de 42.6 Kg. de cemento en volumen.  
 \*\* Cuando se use menos del 5% este producto puede ser omitido  
 \*\*\* Para 3.6 Kg de Perlita Regular use un volumen de 5.4 lt.  
 c Para 17.2 Kg de Perlita 6 use un volumen de 10.9 lt

| M A T E R I A L                            | PESO A<br>GRANEL<br>Kg/m <sup>3</sup> | GRAVEDAD<br>ESPECIFICA | PESO<br>Lts. | VOLUMEN<br>ABSOLUTO<br>lt/kg |
|--|---------------------------------------|------------------------|--------------|------------------------------|
| Iron Carbonate                             | 1834                                  | 3.70                   | 50.3         | 0.2703                       |
| KCl(en solución a 20°C<br>con agua dulce)  |                                       |                        |              |                              |
| 3%   | -                                     | 2.70                   | -            | 0.3704                       |
| 5%   | -                                     | 2.66                   | -            | 0.3759                       |
| IA-2 Latex (líquido)                       | 1097                                  | 1.10                   | 15.0         | -                            |
| NF-1 (Líquido)**                           | 979                                   | 0.98                   | -            | -                            |
| NF-P**                                     | 641                                   | 1.30                   | 17.7         | -                            |
| Perlita Regular                            | 128***                                | 2.20                   | 29.9         | 0.4545                       |
| Perlita 6                                  | 609c                                  | -                      | -            | 0.4545                       |
| Pozmix A                                   | 1185                                  | 2.46                   | 33.6         | 0.4065                       |
| Agua de mar                                | -                                     | 1.025                  | -            | 0.9756                       |
| Sal seca (NaCl)                            | 1137                                  | 2.17                   | 29.5         | 0.4606                       |
| Sal (en solución a 25°C<br>con agua dulce) |                                       |                        |              |                              |
| 6%-0.06 Kg/L                               | -                                     | -                      | -            | 0.3199                       |
| 12%-0.12 Kg/L                              | -                                     | -                      | -            | 0.3324                       |
| 18%-0.18 Kg/L                              | -                                     | -                      | -            | 0.3432                       |
| 24%-0.24 Kg/L                              | -                                     | -                      | -            | 0.3532                       |
| Sat-0.37 Kg/L                              | -                                     | -                      | -            | 0.3707                       |
| Sal(en solución a 60°C<br>con agua dulce)  |                                       |                        |              |                              |
| Sat-0.37 Kg/L-                             | -                                     | -                      | -            | 0.3802                       |
| Arena (Ottawa)                             | 1602                                  | 2.63                   | 35.8         | 0.3802                       |
| Arina sílica (SSA-1)                       | 1121                                  | 2.63                   | 35.8         | 0.3802                       |
| Spacer Sperse                              | 641                                   | 1.32                   | 18.0         | -                            |
| Spacer Mix (Líquido)                       | -                                     | 0.932                  | -            | -                            |
| Arena Sílica(SSA-2)                        | 1602                                  | 2.63                   | 35.8         | 0.3802                       |
| Tuf Additive N° 1                          | -                                     | 1.23                   | 16.7         | 0.8130                       |
| Tuf Additive N° 2                          | 246                                   | 0.88                   | 12.0         | 1.136                        |
| Tapón Tuf                                  | 769                                   | 1.28                   | 17.4         | 0.7813                       |
| Agua                                       | 1000                                  | 1.00                   | 13.6         | 1.0000                       |

Tabla N° 6

## DENSIDAD DE ALGUNOS MATERIALES DE CEMENTACION UTILIZADOS POR

DOWELL

| M A T E R I A L                                |                                      | DENSIDAD<br>(gr/c.c.) |
|--|--------------------------------------|-----------------------|
| Cemento API (E.U.A.), todas las clases excepto |                                      |                       |
| Clase J  |                                      | 3.16                  |
| D 8 R 6  | Diacel LWL                           | 1.35                  |
| D 13 R   | Lignosulfonato de calcio             | 1.23                  |
| D 20 E   | Bentonita                            | 2.65                  |
| D 28   | Retardador para alta temperatura     | 1.25                  |
| D 30   | Arena Sílice                         | 2.65                  |
| D 31 W   | Barita                               | 4.33                  |
| D 42 E   | Nolita                               | 1.30                  |
| D 44   | Sal (NaCl)                           | 2.16                  |
| D 45   | T 1 C II sólido                      | 1.50                  |
| D 46   | Antiespumante sólido                 | 2.00                  |
| D 47   | Antiespumante líquido                | 0.996                 |
| D 53   | Sello-yeso o sello calcio            | 2.70                  |
| D 59   | FLAC líquido                         | 1.66                  |
| D 60 F   | FLAC líquido                         | 1.29                  |
| D 65   | T I C I sólido                       | 1.58                  |
| D 66   | Harina sílica                        | 2.65                  |
| D 73   | FLAC líquido                         | 1.05                  |
| D 74 R   | Retardador para CMI Tixot            | 5.47                  |
| D 75 E   | Extendedor químico líquido           | 1.40                  |
| D 76 W   | Hematita                             | 4.95                  |
| D 77   | Acelerador líquido                   | 1.38                  |
| D 79   | Extendedor químico sólido            | 2.40                  |
| D 80   | T I C líquido                        | 1.234                 |
| D 81 R   | Retardador líquido                   | 1.258                 |
| D 93   | Retardador auxiliar                  | 1.73                  |
| D 99   | Retardador de alta temperatura       | 1.61                  |
| D 108  | FLAC líquido                         | 1.10                  |
| D 112  | FLAC sólido                          | 1.15                  |
| D 129  | Retardador para medio rango de temp. | 1.65                  |
| IM 117   | K C L                                | 2.00                  |
| S 1  | Ca Cl <sub>2</sub>                   | 1.75                  |

Tabla N° 7

## CEMENTO SALADO

En este caso se debe tomar un factor de expansión volumétrica para el agua sin tomar en cuenta el volumen de la sal en la tabulación.

Dada la naturaleza altamente iónica del NaCl, cuando éste es disuelto en el agua no tiende a desplazar el volumen -- que tiene cuando es material puro, sino que se acomoda parcialmente dentro de la molécula del agua y el volumen desalojado es menor que su volumen en estado puro. A continuación se muestra este efecto.

| % SAL<br>PPA | DENSIDAD<br>A 80° F | FACTOR DE<br>EXPANSION<br>Lts/Lto. |
|--------------|---------------------|------------------------------------|
| 0            | 0.9966              | 1.000                              |
| 1            | 1.006               | 1.004                              |
| 2            | 1.012               | 1.008                              |
| 3            | 1.019               | 1.011                              |
| 4            | 1.025               | 1.015                              |
| 5            | 1.031               | 1.019                              |
| 6            | 1.037               | 1.022                              |
| 8            | 1.048               | 1.031                              |
| 10           | 1.060               | 1.038                              |
| 12           | 1.072               | 1.045                              |
| 14           | 1.084               | 1.052                              |
| 16           | 1.094               | 1.060                              |
| 18           | 1.105               | 1.065                              |
| 20           | 1.116               | 1.075                              |
| 22           | 1.127               | 1.083                              |
| 24           | 1.137               | 1.090                              |
| 26           | 1.148               | 1.096                              |
| 28           | 1.157               | 1.106                              |
| 30           | 1.168               | 1.113                              |
| 32           | 1.178               | 1.121                              |
| 34           | 1.188               | 1.128                              |
| 37           | 1.202               | 1.140                              |

Tabla N° 8

## C A P I T U L O N ° 3

### CEMENTACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Un trabajo de cementación se considera de suma importancia, por lo que deben de considerarse factores de ingeniería y economía. Una cementación deficiente puede ser un fracaso para aislar diferentes zonas y resultar muy costosa para la vida productora de cualquier pozo. La cementación defectuosa entre zonas de producción conducirá a :

1. Tratamiento de estimulación inefectivo.
2. Inadecuada evaluación de yacimientos.
3. Comunicación en el espacio anular con fluidos indeseables.
4. Acumulación de gas en el espacio anular.

En algunos pozos se llegan a presentar fallas de corrosión, las cuales no se presentaron en la etapa de perforación; sino hasta la de producción y son también el resultado de una inadecuada cementación. La corrosión deberá aislarse por tratamiento químico y la tubería sólo puede ser reparada con una cementación forzada empleando un cemento cuya constitución sea de carácter expansivo.

Las prácticas operacionales si no son adecuadas en el período de desplazamiento, son generalmente asociadas con traba-

jos deficientes de cementación como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 3.1 Factores que contribuyen a errores en la cementación.

1. FRAGUADO RAPIDO EN LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

- Contaminación en el agua para mezclar.
- Incorrecta estimación de la temperatura.
- Deshidratación de la lechada de cemento en el espacio anular.
- Uso inadecuado de cemento.
- Obstrucción de la zapata o el cople.
- Insuficiente retardador.

2. MEZCLA INCOMPLETA.

- Fallas mecánicas.
- Insuficiente agua o presión.
- Errores del volumen de cemento a granel.

3. FUGA DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR.

- Insuficiente peso de la columna hidrostática.
- Alta gelación en la interfase cemento-lodo.
- Falla del cálculo del volumen de la lechada de cemento para cubrir las arenas de gas.
- Deshidratación prematura de la lechada de cemento.

#### 4. CANALIZACION.

- Contacto de la tubería con la formación.
- Pobres propiedades del lodo (alta viscosidad plástica y alto punto cedento).
- Bajos ritmos de desplazamiento.
- Agujero agrandado.

#### 5. FRAGUADO PREMATURO DEL CEMENTO.

- Inadecuada relación de agua.
- Incorrecta suposición de la temperatura del pozo.
- Cemento o aditivos equivocados para las condiciones del pozo.
- Agua para mezclar "caliente".
- Selección de espaciador incompatible de lodo-cemento.

Existen diversos factores que determinan el éxito o fracaso de una operación de cementación. Aunque se trate de un simple trabajo de cementación de la tubería de revestimiento puede llegar a ser complejo, así fuera debidamente planeado; los factores a considerar se presentan a continuación.

Tabla N° 3.2 Conceptos Básicos para Planear una Operación de Cementación.

Agujero del pozo : Diámetro, profundidad, temperatura, desviación, propiedades de la formación.

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| Fluido de perforación         | : | Tipo, propiedades, peso, compatibilidad con el cemento.  |
| Tubería de revestimiento      | : | Diseño, tipo de rosca, profundidad de colocación, equipo de flotación, centradores, raspadores, herramienta de cementación por etapas. |
| Operaciones del equipo        | : | Tiempo y velocidad de introducción de la tubería de revestimiento, tiempo de circulación antes de cementar.                            |
| Composición de la cementación | : | Tipo, volumen, peso, propiedades, -- aditivos, mezclado, pruebas de agua del campo.  |
| Unidad de mezclar y bombeo    | : | Tipo de mezcla, cabeza de cementación, tapones, espaciadores, movimiento durante la cementación, fluidos para desplazar.               |
| Personal                      | : | Responsabilidad de las partes involucradas.  |

### 3.1 FACTORES A CONSIDERAR DURANTE LA CEMENTACION.

- Densidad de control.

La densidad de la lechada será controlada y registrada para asegurar que la relación correcta agua-sólidos, sea manteni

da. Para evitar el efecto de espuma, se obtendrán muestras para verificar el peso de la lechada, de un recipiente de distribución, que se encuentra en la charola de la bomba de desplazamiento.

Una práctica común es que las lechadas de cemento son -- usualmente mezcladas con menos agua al final del trabajo para que el cemento resista esfuerzos mayores; ésto es muy importante porque esta lechada de cemento se colocará alrededor de la zapata.

- Limpiadores.

El bache limpiador funciona como espaciador, minimiza el mezclado y la gelación interfacial en el espacio anular. Tienen varias características, dependiendo del sistema de lodo y varias funciones. Algunos contienen aditivos para adelgazar - el lodo, penetrar y aflojar el enjarre de la pared; algunos - contienen materiales abrasivos para limpiar el agujero así como una alta viscosidad aparente para remover el lodo de perforación por flotación.

Tabla N° 3.3 Presentación de algunos limpiadores y el volumen recomendado para ser usado.

| LIMPIADOR   | FUNCION                   | VOLUMEN RECOMENDADO  | FLUJO RECOMENDADO |
|---|---------------------------|--|-------------------|
| Dispersantes químicos (ácido-fosfatos o emulsiones, aceite diesel para lodos-de aceite. | Para adelgazar el lodo    | Bastante para tener 300 a 500 pies de relleno en el anular | Turbulento        |
| Delgada lechada de cemento (agua excesiva con cemento puro.                             | Limpiar o quitar lo sucio | 30 a 50 bl. de lechada: 50 a 150 sacos de cemento.         | Turbulento        |

Para lodos simples base-agua, el agua en suficiente volumen es un excelente lavador y es económico, fácil de poner en turbulencia y tiene pocos efectos en la colocación de cemento. El agua salada puede disminuir la tendencia de las arcillas o esquistos a hincharse y derrumbarse, pero tendrá un efecto perjudicial en un lodo de agua fresca. Algunos adelgazadores del lodo (quebracho, lignosulfonatos) agregados al agua retardarán el fraguado de la lechada de cemento, por lo que deben ser evitados. 50 barriles de espaciador o 50 a 150 mts. de llenado -

en el espacio anular deberán ser usados, excepto donde la columna es excesivamente reducida en zonas de alta presión.

El cemento diluído Portland o Pozolan es excelente limpiador, es fácil poner en turbulencia y sus partículas sólidas -- erosionan al lodo gelado y al enjarre del filtrado.

- Tiempo de Contacto .

Es el período en que fluye una lechada de cemento, pasando en un punto particular en el espacio anular durante el desplazamiento. Estudios realizados indican que, cuando el flujo turbulento es alcanzado, un tiempo de contacto de 10 minutos o más proporciona mayor remoción del lodo. El volumen de fluido necesitado dá un tiempo de contacto específico.

$$V_t = 5.615 (tc)(q) \quad \text{donde}$$

$V_t$  = volumen de fluido (flujo turbulento) pie<sup>3</sup>

$tc$  = tiempo de contacto minutos

$q$  = ritmo de desplazamiento bl/min

El cálculo es simple, puesto que únicamente dos factores-- son requeridos y éstos son fácilmente obtenidos, así como el cálculo es independiente del tamaño de la tubería de revestimiento y el agujero. La ecuación de la velocidad de circulación deberá mantenerse mientras que todo el fluido pasa por el punto de interés.

- Cementaciones con Tapones Limpiadores.

Los tapones de cementación son ampliamente recomendados para separar el lodo, cemento y el fluido de desplazamiento. Un tapón inferior es usado primero para limpiar el lodo de la pared interior de la tubería de revestimiento y separa el lodo del cemento. Si el tapón inferior es omitido, la película de lodo desplazado por el tapón superior es acumulado adelante del tapón superior, contaminando la lechada de cemento. El tapón superior separa el lodo del cemento y evita que fluya el cemento cuando éste llegue al asiento del cople.

Un tapón inferior no debe ser usado cuando grandes cantidades de material de pérdida de circulación estén presentes en el cemento. Esto puede causar un puente y provocar un tapón en la tubería de revestimiento. Si el movimiento de la tubería de revestimiento se está realizando, éste debe de continuar durante el ciclo de mezclado. Frecuentemente el movimiento es continuo mientras se liberan los tapones y hasta que el tapón superior es bombeado; aunque no es una práctica común para parar el movimiento mientras se insertan uno u otro o ambos tapones de cementación.

- Fluido de Desplazamiento atrás del Tapón Superior.

El lodo es normalmente usado como fluido desplazante en la tubería de revestimiento superficial o intermedia, aunque

el agua puede ser deseable en pozos más profundos donde la densidad no es crítica. Otros fluidos de desplazamiento comúnmente usados son agua dulce, salada o de mar y algunas soluciones débiles de ácido, dependiendo del programa de terminación. La selección será enfocada a minimizar los daños de la formación y el tiempo de terminación. El aceite diesel puede ser usado para reducir el tiempo de limpiado. El agua conteniendo material orgánico u otro aditivo retardador es en ocasiones colocada inmediatamente encima del tapón superior en la tubería de revestimiento de diámetros pequeños para inhibir el fraguado del cemento que pueda haber pasado el tapón superior.

La lechada de cemento podrá estar en flujo turbulento, siempre que se pueda mantener un gasto que no registre daño por excesiva presión, que llegase a fracturar la formación. Ritmos de flujos más bajos proporcionan un flujo tapón, que sería usado en formaciones débiles o en secciones del agujero que sean lavadas o en cementaciones de tuberías de gran diámetro.

La velocidad de la lechada de cemento dentro de la tubería de perforación, revestimiento o producción, es calculado de :

$$V_i = 3.056 \frac{q}{d_i^2} \quad \text{donde}$$

$V_i$  = velocidad en el interior de la tubería pie/seg

$d_i$  = diámetro interior de la tubería pg

$q$  = ritmo de flujo pie<sup>3</sup>/min

La ecuación para calcular la velocidad de la lechada en el espacio anular es como sigue :

$$V_a = \frac{3,056 \cdot q}{d_h^2 - d_o^2} \quad \text{donde}$$

$V_a$  = velocidad en el espacio anular pie/seg

$d_h$  = diámetro del agujero pg

$d_o$  = diámetro exterior de la tubería de revestimiento pg

La constante 3,056 cambia a 17,157 si  $q$  está en bl/min

El movimiento de la tubería de revestimiento afecta significativamente el desplazamiento del lodo. Idealmente la tubería de revestimiento será recíprocada o rotada hasta que el tapón superior alcance el fondo. Sin embargo, la resistencia-friccional, el peso de la tubería y la pegadura diferencial pueden restringir o impedir el movimiento de la tubería de revestimiento. La pegadura diferencial, el factor más crítico, a menudo puede ser atribuido a :

1. El área de contacto entre la tubería y el enjarre del filtrado del lodo.
2. La presión diferencial entre la columna de lodo y la formación.

3. Las fuerzas de tensión superficial.

4. Las propiedades del lodo de perforación.

El problema de pegadura es una función de las propiedades del lodo (primeramente pérdida de agua) y el tiempo que la tubería de revestimiento permanezca estacionada contra una formación permeable. La pegadura diferencial puede en ocasiones ser eliminada por la reducción del "tiempo estacionario" usando un montaje rápido de la cabeza de cementación tan pronto como la tubería de revestimiento esté en el fondo.

Durante el bombeo del cemento, el movimiento de la tubería de revestimiento (reciprocante o rotacional) sería lento hasta que el cemento alcance el fondo y más rápido cuando éste se encuentre en el espacio anular y el tapón superior asiente en el cople (flotador o diferencial). La reciprocación sería en un ciclo de 2 minutos sobre un intervalo de 4.5 o 6 m. La reciprocación causa alta presión y turbulencias en el descenso de la tubería de revestimiento. Si la tubería muestra cualquier tendencia para pegarse, será movida cerca de su punto de asiento. La probabilidad de pegarse es notado por un incremento en la torsión y arrastre de la tubería.

La pegadura ocurre después de una interrupción del movimiento de la tubería o cuando se encuentra en contacto con un enjarre sensible

Siempre que sea posible, la cima de la tubería de revestimiento sería asentada jústamente arriba de la mesa rotatoria - para ahorrar tiempo en ligar la cabeza de cementación y aumentar la seguridad.

- Factor de Flotación en Tuberías de Diámetros Grandes.

Al correr tuberías de diámetros grandes, la flotación podrá llegar a ser un problema; cuando el bombeo es iniciado, la tubería comenzará a salir del agujero si las presiones son excedidas. Para solucionar el problema, la tubería será liberada cuando la bomba inicie su función, al salir la tubería del agujero el bombeo será disminuído. La presión de bombeo será incrementada gradualmente para limpiar el agujero, donde se asentará la tubería en el fondo de su posición original.

Si la tubería no ha llegado al fondo del agujero, ésta podrá ser subida y bajada durante el bombeo y si ésto fallara -- las alternativas son :

1. Cementar la tubería donde se encuentre.
2. La mezcla de lodo circulará por el agujero y evitará los derrumbes.
3. Sacar la tubería de revestimiento y correr la tubería de perforación y la barrena al fondo para limpiar y acondicionar el agujero.

### 3.2 TECNICAS DE COLOCACION

La mayoría de los trabajos de cementación son realizados por bombeo de la lechada al interior de la tubería de revestimiento y en el fondo circulará por el espacio anular; sin embargo hay técnicas modificadas para situaciones especiales.

1. Cementación a través de la tubería de revestimiento - - (Técnica de desplazamiento normal). Fig. N° 3.1
2. Cementación por etapas (para pozos que tienen gradientes de fractura críticos). Fig. N° 3.2
3. Cementación con el "Inner-String" a través de la tubería de perforación (para tuberías de diámetros grandes) Fig. N° 3.3
4. Cementación por el exterior o espacio anular, a través de la tubería de producción (para tubería superficial). Fig. N° 3.4
5. Cementación por circulación inversa (para formaciones críticas). Fig. N° 3.5
6. Cementación con fraguado retardado (para formaciones críticas y mejorar su colocación). Fig. N° 3.6
7. Cementación con sarta múltiple (por tubería de producción de diámetro pequeño). Fig. N° 3.7

- CEMENTACION A TRAVES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

Las sargas conductoras, superficial, protección y produc-

ción son usualmente cementadas por el método de etapa simple, el cual es realizado por el bombeo de la lechada de cemento a través del interior de la tubería de revestimiento y usando - tapones superior e inferior. Hay varios tipos de cabezales - para cementación continua, también con adaptadores especiales para rotar o reciprocarse la tubería de revestimiento.

#### - CEMENTACION POR ETAPAS.

Para este tipo de cementación es necesario utilizar un - cople de cementación múltiple, que permite realizar esta operación en dos o más etapas, con el objeto de evitar pérdidas de cemento y que no contamine las corrientes de agua potable, facilitar las columnas de gran longitud y evitar daños a formaciones frágiles.

#### Primer Etapa

Una vez terminada de correr la tubería se procede a cementarla. Se recomienda establecer circulación a fin de levantar los posibles desprendimientos del pozo y permitir así una correcta operación. Se bombea un bache de fluido separador con el objeto de evitar la contaminación del cemento con el lodo de perforación; después de este bache sigue la cantidad de cemento calculada. Atrás del cemento se lanza el tapón inferior, el cual desplazará el cemento hasta llegar a la base del cople. En este momento se manifestará un incremento

repentino de la presión, que nos indicará el final de la etapa.

#### Segunda Etapa.

Concluída la primera etapa, se procede a arrojar el tapón torpedo para operar la camisa de apertura. Esperar de 10 a 15 minutos por cada 300 m. de profundidad. Transcurrido el tiempo planeado aplicar una presión de 800 a 1,200 lb/pg<sup>2</sup> para abrir los orificios de cementación; se notará una caída súbita de presión, estableciéndose la circulación del lodo.

Con los orificios de cementación abiertos se procede a bombear el cemento necesario desplazándolo por medio del tapón superior. Al llegar el tapón al cuerpo del cople se notará un incremento de presión el cual deberá elevarse a 1,200 lb/pg<sup>2</sup>, sobre la presión de circulación. Al llegar a este punto, los orificios de cementación han quedado cerrados, por lo que la operación se considera terminada.

#### - CEMENTACION CON INNER-STRING

Cuando una tubería de diámetro grande es cementada, la tubería de producción o perforación es comunmente usada "inner-string" para colocar el cemento en el espacio anular. Este procedimiento reduce el tiempo para cementar y el volumen de fluido de desplazamiento requerido para bombear el tapón. Evita tener que perforar y la gran cantidad de cemento-

que ocuparía una tubería de revestimiento de diámetro grande - si fuera cementada de manera convencional.

Con esta técnica se usa equipo modificado de flotación, - zapata guía y/o cople de retención, junto con adaptadores de - sello que unen a la tubería de diámetro pequeño.

La cementación con "inner-string" permite el uso de tapo- nes de cementación de diámetro pequeño y donde la tubería de - revestimiento es equipada con una válvula de contrapresión o - un bafle con candado en el fondo, tan pronto como el tapón es asentado el "inner-string" puede ser retirado de la tubería de revestimiento mientras las preparaciones son hechas para perfo rar más profundo.

- CEMENTACION POR EL EXTERIOR O ESPACIO ANULAR.

La cementación es bombeada a través de la tubería de pro ducción o tubería de diámetro pequeño corrida entre tuberías- de revestimiento o entre la tubería de revestimiento y el agu jero, es un método comunmente usado en tuberías de revesti- - miento conductora o superficial, para rellenar el espacio anu lar cuando la cima del cemento quede retirada de la superfi - cie. Esta cementación es alguna vez usada para reparar traba jos de cementación.

La tubería puede sufrir daños cuando las arenas de gas - llegan a estar cargadas con alta presión de pozos circundan -

tes. En tales casos, la tubería de revestimiento tiene que ser reparada por cementación por el espacio anular entre las sartas a lo largo de una conexión de la cabeza de cementación y la tubería de revestimiento.

- CEMENTACION POR CIRCULACION INVERSA.

Esta técnica consiste en bombear la lechada al fondo del espacio anular y desplazar el lodo a través del interior de la tubería de revestimiento. Esto requiere que el equipo de flotación, de llenado diferencial y las conexiones en la cabeza del pozo sean modificados. El método es usado cuando no es posible bombear la lechada de cemento en flujo turbulento sin romper el fondo de la zona débil arriba de la zapata de la tubería de revestimiento. Esta cementación permite un amplio rango en composiciones de lechadas de cemento, así que la lechada de cemento más pesada o más retardada se colocará en la parte más baja de la tubería de revestimiento y más ligera o acelerada puede ser colocada en la cima del espacio anular. Una desventaja de este método es que en la terminación del período de desplazamiento de la lechada de cemento no puede ser detectada la presión de bombeo. Esta dificultad conduce a errores en el cálculo del volumen de la cantidad requerida de lechada de cemento en el espacio anular y volumen de lodo necesario para alcanzar a realizar la colocación del ce-

mento. Para estar seguro de que la zapata está adecuadamente cementada, un exceso de menos de 90 metros de cemento debe ser aceptado en la tubería de revestimiento encima de la zapata. Registros de calibración serán hechos antes que la tubería de revestimiento sea corrida para determinar seguramente el volumen de cemento más un exceso para ser usado.

- CEMENTACION DE FRAGUADO RETARDADO.

La cementación de fraguado retardado es una manera para obtener una envoltura uniforme de cemento alrededor de la tubería de revestimiento mejor que con métodos convencionales. Esto involucra colocar una lechada de cemento retardada conteniendo un aditivo de control de filtración en un agujero del pozo antes de correr la tubería de revestimiento. El cemento es colocado por bombeo al fondo a través de la tubería de perforación y arriba del espacio anular requerido. La tubería de perforación es entonces removida del pozo y la tubería de revestimiento corta (o total) es corrida al fondo, dentro de la lechada de cemento no fraguado. Después de que la lechada de cemento frague el pozo puede ser terminado usando el método convencional.

Esta técnica ha sido usada con pozos en terminación con tubería de producción por colocación de la lechada en el fondo con una sarta y bajando sartas de tuberías de producción -

múltiples dentro del cemento no fraguado.

No es deseable que, la tubería de revestimiento al quedar dentro de la lechada de cemento, el lodo de perforación en el espacio anular esté mezclado con la lechada de cemento; pero es mejor que dejar el lodo de perforación en el espacio anular como un canal o una cavidad de lodo. La lechada de cemento de fraguado retardado permite prolongar el movimiento de la tubería de revestimiento, el cual probablemente asegure una envoltura de cemento más uniforme.

Una desventaja es que la lechada de cemento requiere un mayor tiempo de espera en el fraguado. Esto será costoso si el equipo de perforación permanece en la localización mientras que el cemento fragua y alcanza su resistencia. Si el equipo de perforación puede ser movido de la localización y emplear un equipo de reparación para terminar el pozo, el costo puede ser reducido.

Los cementos usados con esta técnica de fraguado retardado usualmente contienen de 6 a 8% de bentonita y dispersante para control de la filtración y suficiente retardador para el fraguado retardado para 18 a 36 horas.

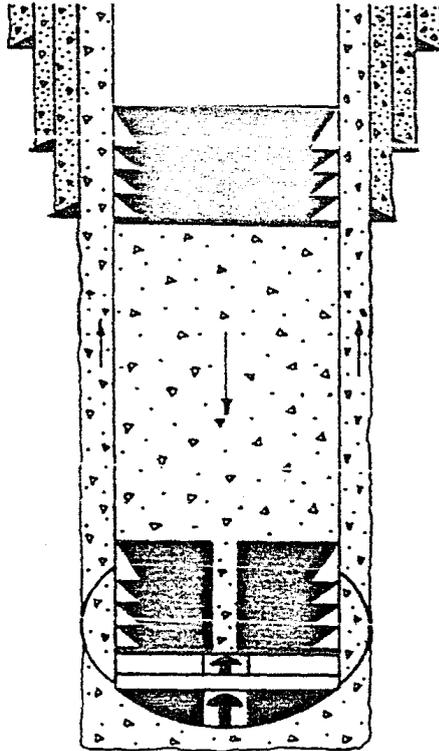


FIG. Nº 1

CAPÍTULO Nº 3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Cementación de Desplazamiento Normal

CEMENTACIONES

MACARIO REYES MEZA

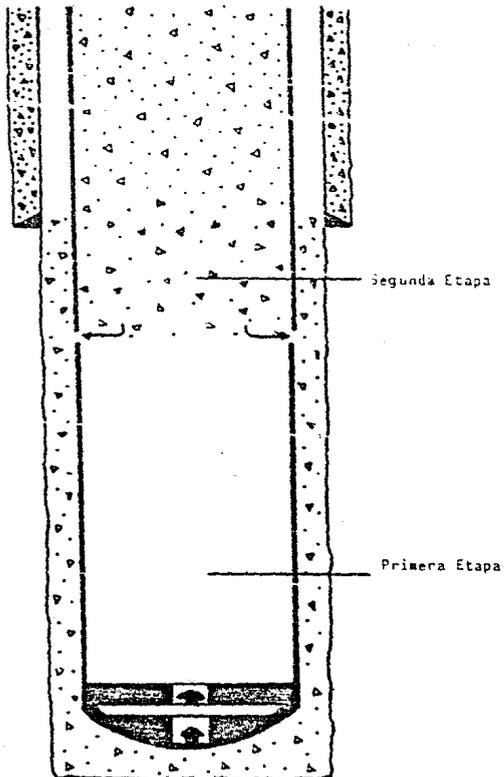


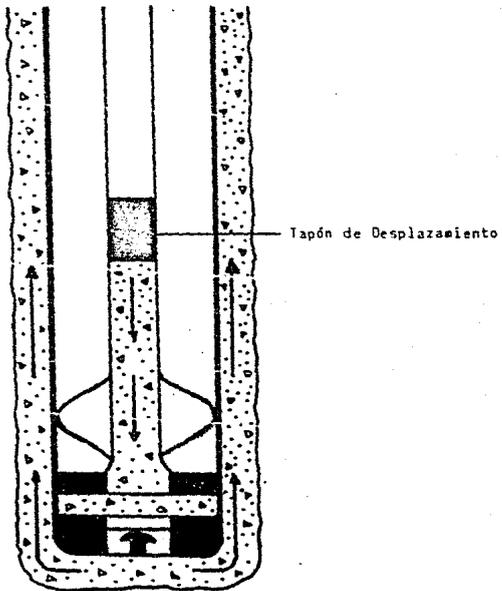
FIG. Nº 2

CAPITULO Nº 3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 Cementación por Etapas

CEMENTACIONES

MACARIO REYES MEZA



|               |  |                    |
|---------------|--|--------------------|
| FIG. Nº 3     | UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO                | CEMENTACIONES      |
| CAPÍTULO Nº 3 | FACULTAD DE INGENIERÍA<br>Cementación con Inner String | MACARIO REYES MEZA |

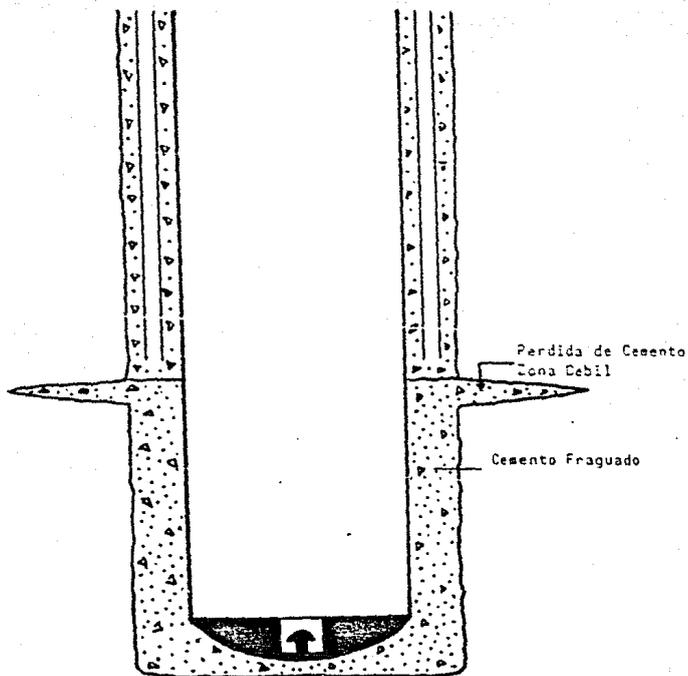


FIG. Nº 4

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 Cementación del Anillo con T.de Producción

CEMENTACIONES

CAPITULO Nº 3

MACARIO REYES MEZA

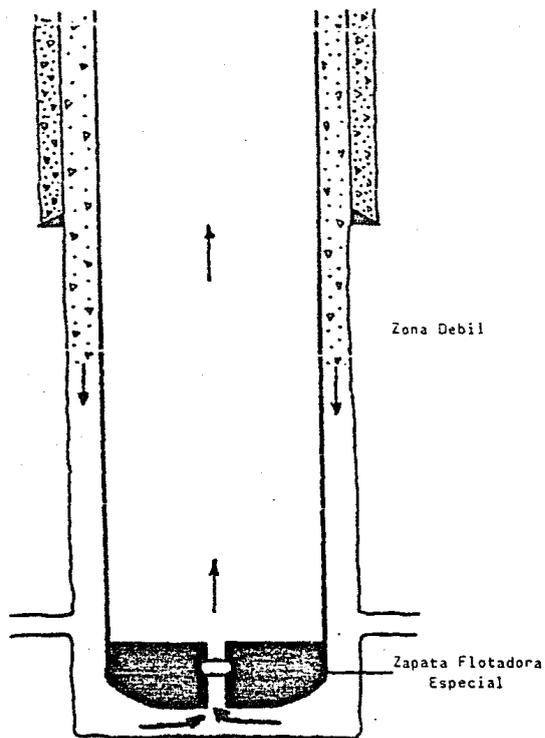


FIG. Nº 5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA

CEMENTACIONES

CAPITULO Nº 3

Cementación por Circulación Inversa

MACARIO REYES MEZA

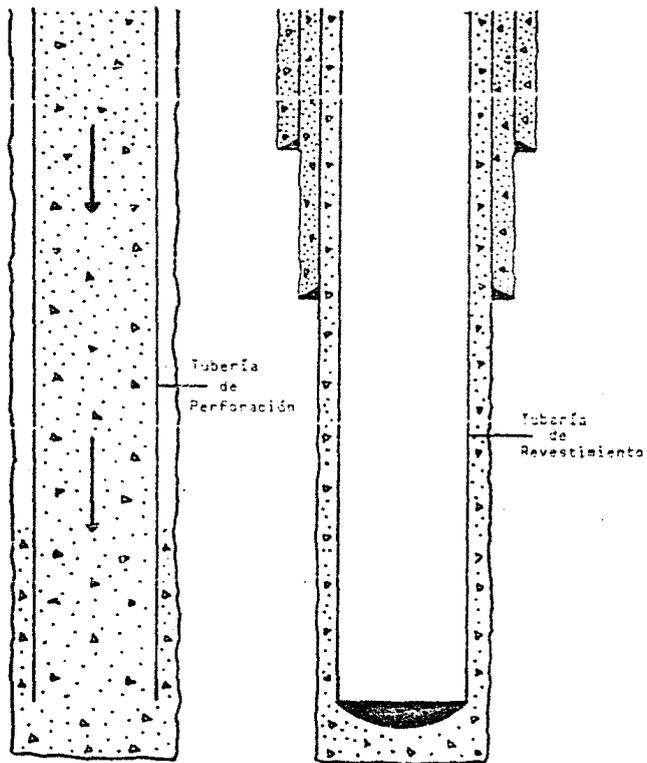


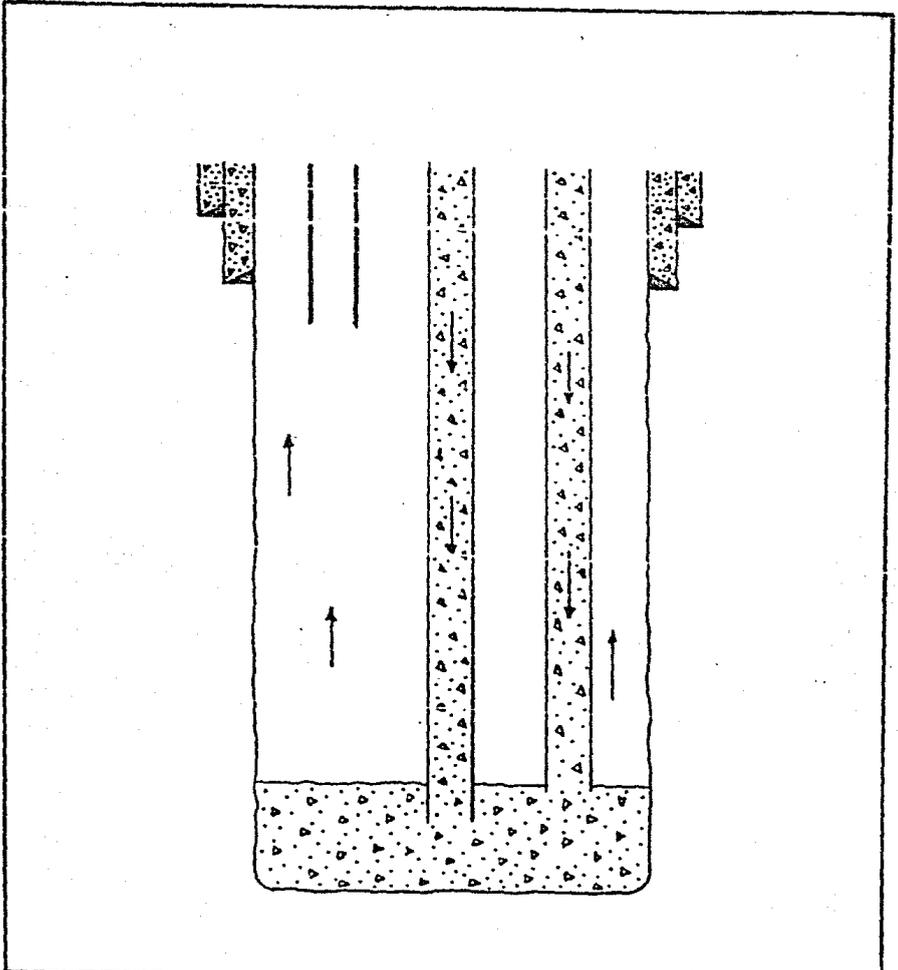
FIG. Nº 6

CAPITULO Nº 3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 Cementación Retardada

MACARIO REYES M.

CEMENTACIONES



|               |   |                    |
|---------------|---|--------------------|
| FIG. Nº 7     | UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO<br>FACULTAD DE INGENIERIA | CEMENTACIONES      |
| CAPITULO Nº 3 | Cementación con Sarta Múltiple                                    | MACARIO REYES MEZA |

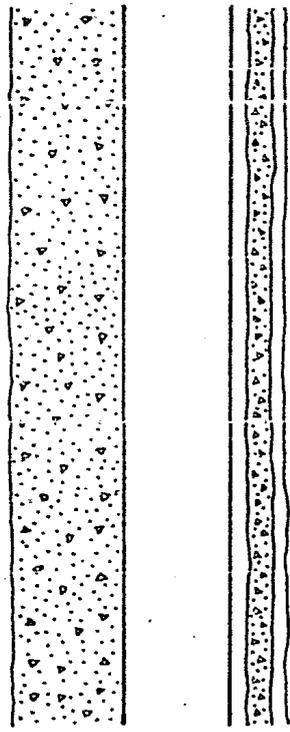
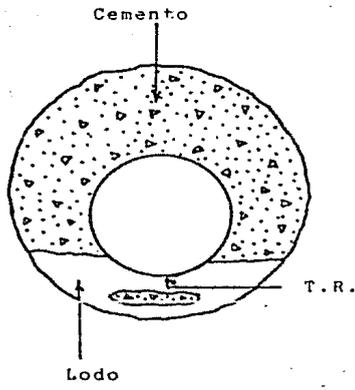
### 3.3 DESPLAZAMIENTO : EL PERIODO CRITICO.

La principal causa de fallas en la cementación se manifiesta en canales o lodo gelado remanente en el espacio anular. Si los canales de lodo son eliminados, cualquier número de composiciones de cemento proporcionará un efectivo sello.

Una evaluación de los factores que afectan el desplazamiento del lodo es necesaria para considerar el flujo patrón en un espacio anular excéntrico; ésto es donde la tubería está más cerrada de un lado del agujero que el otro. La velocidad de flujo en un espacio anular excéntrico no es uniforme y la velocidad más alta ocurre en el lado del agujero con el espacio libre más grande.

Si la tubería de revestimiento está cargada hacia la pared del agujero, como se muestra en la Fig. N° 3.8 no puede ser posible bombear el cemento a un alto ritmo suficiente para desarrollar un flujo uniforme por todas partes del espacio anular.

Estudios de campo han mostrado que la longitud de tiempo de movimiento del cemento para pasar por un punto en el espacio anular en flujo turbulento es importante. Si un canal de lodo está puesto en movimiento, aunque su velocidad es mucho más baja que el cemento fluyendo en el espacio anular más amplio, dará suficiente tiempo al canal de lodo para moverse --



|               |   |                    |
|---------------|---|--------------------|
| FIG. N° 8     | UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO<br>FACULTAD DE INGENIERIA | CEMENTACIONES      |
| CAPITULO N° 3 | Canalización del Cemento  | MACARIO REYES MEZA |

arriba de la zona crítica productiva. El tiempo de contacto no es importante cuando el cemento está en flujo laminar por que aparentemente el cemento no ha ejercido suficiente esfuerzo de arrastre en la pared del pozo.

Hay acuerdos generales de cada uno de los factores en la siguiente exposición y tienen una relación en la remoción del lodo.

1. El centrado de la tubería significativamente ayuda al desplazamiento del lodo.
2. Movimiento de la tubería de rotación o reciprocación, produce un mejor manejo de fuerzas para remover el lodo. El movimiento de la tubería con raspadores sustancialmente mejora el desplazamiento del lodo donde el agujero está agrandado.
3. Un pozo con lodo condicionado (baja viscosidad plástica y bajo punto cedente) ejerce un incremento en la eficiencia del desplazamiento del lodo.
4. Altos ritmos de desplazamiento favorece la remoción del lodo. A iguales ritmos de desplazamiento una delgada lechada de cemento en flujo turbulento es más efectiva que una lechada espesa en flujo laminar.
5. Tiempo de contacto (por lo menos 10 minutos) ayuda en la remoción del lodo si la lechada de cemento está -

en flujo turbulento en alguna parte del espacio anular.

6. La fuerza de flotación debido a la diferencia de densidad entre el cemento y el lodo es un factor en la remoción del lodo a través de una minoría relativa.

En una situación dada no puede ser posible o aún necesario, minimizar cada factor. También algunas condiciones pueden compensarse por otras. En cualquier caso lo más importante de ellos son centralización, movimiento de la tubería y condicionar el lodo.

### 3.4 CONSIDERACIONES DESPUES DE LA CEMENTACION.

Para prevenir la expansión de la tubería de revestimiento y mejorar el enlace, la presión interna de la tubería de revestimiento debe ser liberada cuando se ha establecido que el coque flotador, la zapata gufa y válvula de contrapresión sean utilizados.

La primera práctica fue mantener la presión en la tubería de revestimiento hasta que el cemento fragüe; sin embargo investigaciones de registros de cementación han demostrado que esta práctica crea un microespacio anular entre la tubería de revestimiento y el cemento; así proporcionar un canal potencial de comunicación.

El tiempo de espera del fraguado es variable y las regulaciones de la zona deben ser verificadas en áreas de operación localcs. cuando no existen reglas, un razonable tiempo de espera del fraguado debe permitir al cemento alcanzar suficiente resistencia para anclar la tubería y resistir las subsecuentes operaciones, para sellar zonas permeables y confinar presiones de fractura. Si el cemento densificado (API clase A, G o H) y 2 a 3% de Cloruro de calcio son usados, el tiempo de espera -- del fraguado puede ser más corto que de 4 a 6 horas en temperaturas cálidas y en 6 a 8 horas en temperaturas frías.

El tiempo de espera del fraguado depende de la clase de

cemento, aditivos en el cemento y el tiempo requerido para colocarlo, la temperatura y presión del pozo.

Antes de perforar la mínima fuerza compresiva deseable es de 500 lb/pg<sup>2</sup>, el tiempo recomendado para correr un registro de cementación y perforar para producción o estimulación es de 24 a 72 horas, después el cemento alcanza una fuerza compresiva de 2000 lb/pg<sup>2</sup>. Algunas veces se requiere una prueba de presión de la tubería de revestimiento o una prueba de producción para definir la relación gas-aceite o el contenido de agua y saber si un trabajo de cementación es un éxito o un fracaso.

#### - PRUEBAS DE CEMENTACION.

Un estudio de temperatura es el método excelente para localizar las cimas del cemento. El registro de temperatura -- corrida de 6 a 12 horas, después de que el tapón es bombeado, -- identifica la cima del cemento y registra las anomalías en el gradiente de temperatura. Además, el cemento que está atrás -- de la tubería libera más calor debido a la reacción exotérmica del fraguado del cemento. Cuando la cima del cemento no se lo caliza a la altura deseada, puede suponerse que la canaliza -- ción ha ocurrido.

Los registros de adherencia del cemento son también frecuentemente usados para confirmar como el cemento ha sido --

colocado exitosamente entre la tubería y la formación. Un - - buen enlace indica un trabajo de cementación satisfactorio; un deficiente enlace demuestra una cementación dudosa.

Un estudio de trazador radioactivo puede ser usado para - identificar las cimas del cemento, pero requiere la adición de un material radioactivo en la lechada de cemento para permitir la detección atrás de la tubería. El procedimiento no es am - pliamente usado debido a que se requiere una especial prepara - ción y planeación.

## C A P I T U L O N º 4

### CEMENTACIONES FORZADAS

La cementación forzada es el proceso de aplicar presión - hidráulica a una lechada de cemento contra una formación o una zona porosa. Es el método más común para reparar una cementación y su objetivo es obtener un sello entre la tubería de revestimiento y la formación.

Uno de los primeros problemas en los pozos de aceite fue aislar el agua del fondo del agujero, el cual se resolvió por - el uso de una lechada de cemento represionada en la zona de interés, con el fin de aislar completamente el agujero.

La literatura técnica contiene una amplia información del material para cementaciones forzadas, pero los problemas aún -- persisten, por tal razón se debe hacer las siguientes preguntas:

1. ¿En dónde quedará el cemento en un trabajo forzado?
2. ¿Es necesario fracturar la formación?
3. ¿Cuál es la presión de fractura?
4. ¿El agua o el lodo serán usados para fracturar?

La tecnología en la cementación forzada ha progresado con siderablemente con el conocimiento de :

1. Los mecanismos de fracturamiento de la roca.

2. Las propiedades de filtración de la lechada de cemento presionada contra un medio permeable.

La cementación forzada es ampliamente usada en los pozos petroleros con los siguientes propósitos :

1. Controlar altas relaciones gas aceite. Para aislar - la zona de aceite de una zona de gas adyacente.
2. Con el objeto de controlar excesiva producción de - - agua y gas. En las arenas de gas o agua puede emplearse esta técnica para ayudar a disminuir la relación agua aceite o gas aceite.
3. Con el fin de reparar una fuga en la tubería de revestimiento. El cemento puede ser forzado a través de - los agujeros de la tubería de revestimiento.
4. Sellar zonas ladronas o de pérdida de circulación.
5. Para proteger una zona de producción de la migración de los fluidos.
6. Aislar zonas en terminación permanente. Esta es una práctica común en muchas áreas, después de que un pozo con un potencial en una zona de producción múltiple ha sido cubierta, para aislar la primera zona y poderla controlar, así como producir la otra zona hasta su depresionamiento.
7. Para corregir un trabajo de cementación primaria de -

fectuoso. El problema resulta por la canalización o llenado insuficiente en el trabajo de cementación que puede ser corregido por la cementación forzada.

8. Para prevenir la migración de los fluidos en una zona de abandono. Es empleada para sellar pozos viejos o taponar zonas de producción depresionadas.

#### 4.1 TERMINOLOGIA DE LA CEMENTACION FORZADA.

Los objetivos de las cementaciones forzadas están generalmente definidos por los requerimientos de presión; siendo los siguientes :

1. Técnica de Alta Presión. Consiste en fracturar la -- formación y bombear la lechada de cemento o el filtrado de cemento dentro de la formación hasta que una -- presión superficial específica pueda ser controlada, --  
Figura N° 1.
2. Técnica de Baja Presión. Involucra la colocación de la lechada de cemento sobre el intervalo para ser forzado y aplicar suficiente presión para formar un en -- jarre del filtrado del cemento deshidratado en las -- perforaciones, canales o fracturas que puedan ocasionarse. Figura N° 2.
3. Presión de Fractura. Es la presión necesaria para -- fracturar la formación a fin de poder aceptar los -- flúidos. En cementaciones forzadas con alta presión -- ésta debe de ser alcanzada antes de poner la lechada -- de cemento o el filtrado de cemento dentro de la formación.
4. Gradiente de Fractura. Se define como la variación -- de presión por unidad de longitud requerida para iniciar una fractura.

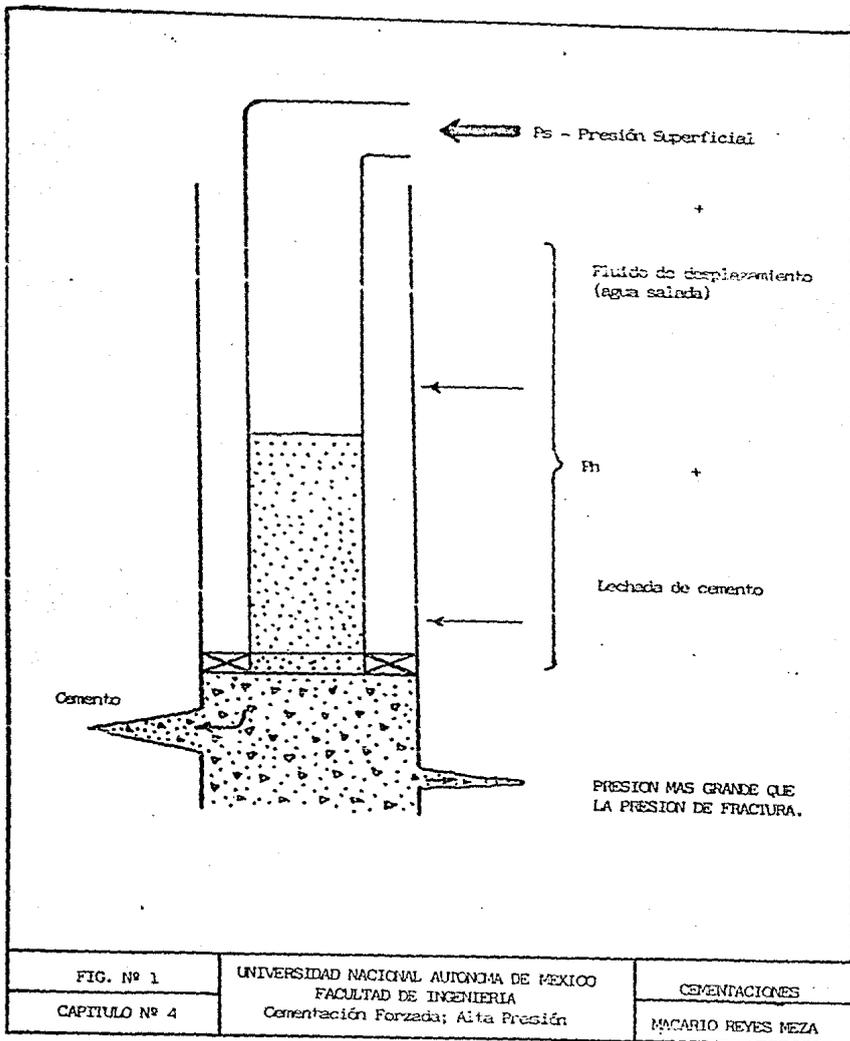


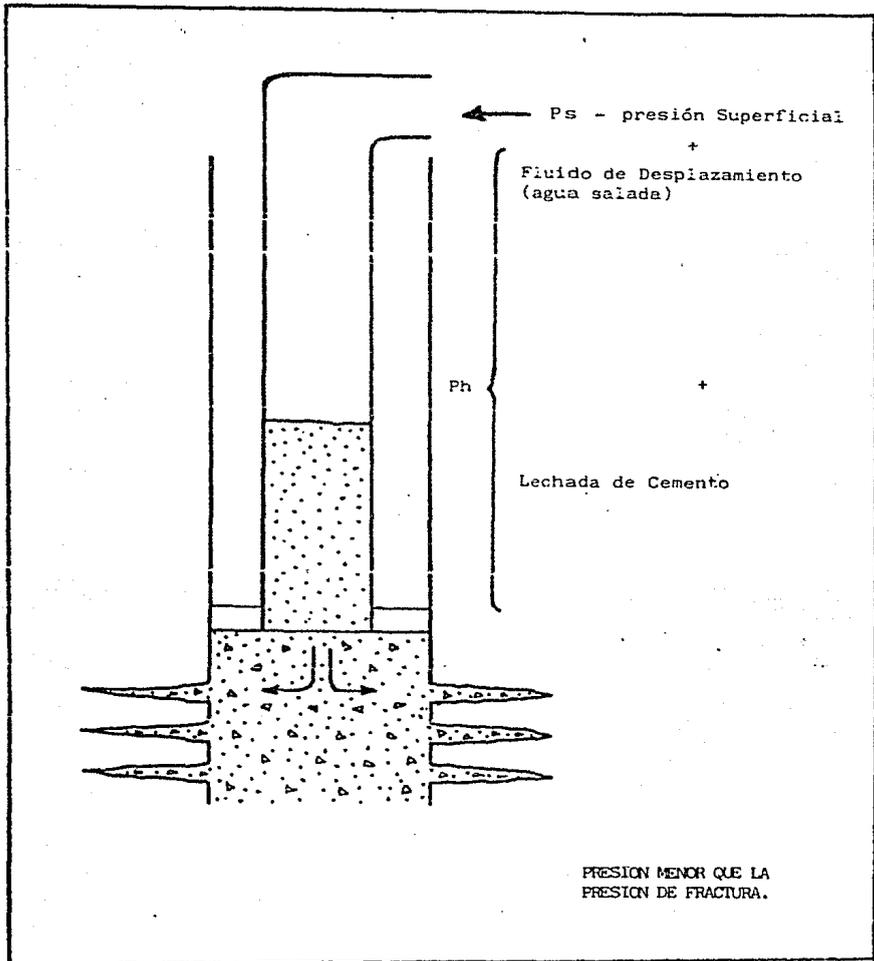
FIG. Nº 1

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 Cementación Forzada; Alta Presión

CEMENTACIONES

CAPTULO Nº 4

MICARIO REYES MEZA



|               |   |                    |
|---------------|---|--------------------|
| FIG. Nº 2     | UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO<br>FACULTAD DE INGENIERIA | CEMENTACIONES      |
| CAPITULO Nº 4 | Cementación Forzada: Baja Presión                                 | MACARIO REYES MEZA |

5. Tratamiento de la Presión en el Fondo del Agujero.

Es la presión ejercida sobre la formación durante -- una operación forzada. Esta es la presión superficial más la presión de la columna hidrostática de -- los fluidos del pozo menos la presión de fricción. Para fracturar una formación esta presión debe ser -- excedida.

6. Deshidratación del Cemento. Es el proceso en el -- cual el agua de la lechada de cemento es forzada con -- tra la formación y un enjarre del filtrado de las -- partículas sólidas es formado en la cara de la formaci -- ción. Si un exceso de presión es ejercido sobre la -- formación ésta se fracturará y la lechada de cemento -- será forzada en esta fractura.

#### 4.2 TECNICAS DE CEMENTACION FORZADA

##### - Cementación Forzada Bradenhead.

El método original de las cementaciones forzadas fue - el Método de Bradenhead, el cual es realizado a través de la - tubería de producción o perforación sin el uso de un empacador.

La presión se incrementa por el cierre de los preventores o las válvulas de control en la cabeza del pozo, después - que la lechada de cemento ha sido bombeada muy cerca del fondo de la sarta de cementación. Una cantidad predeterminada de lechada es bombeada a una altura específica afuera de la tubería de producción o perforación.

Desplazar el fluido bombeado al fondo de la tubería -- hasta que la presión forzada deseada sea alcanzada o hasta que una cantidad específica de los fluidos hayan sido bombeados.

El pozo es cerrado en la superficie, la lechada de cemento es forzada para moverse dentro o contra las zonas de debilidad puesto que no puede circular una mayor longitud arriba del espacio anular.

Este método es usado extensamente en cementaciones forzadas en pozos someros, para taponar y alguna vez forzando parcialmente la zona de pérdida de circulación durante la perforación.

- Cementación Forzada con Empacador o Tapón Puente (permanente).

Este método usa un empacador recuperable o permanente, corrido en la tubería de producción para colocarlo cerca de la cima de la zona para ser forzada; donde su presión de confinamiento se utiliza en un punto específico del agujero.

Antes de que el cemento sea colocado, una prueba de -- presión es realizada para determinar la presión de admisión de la formación. En algunos casos la sección interior del pozo -- para ser forzada debe ser aislada con un tapón mecánico.

Cuando la presión forzada deseada es obtenida, la lechada de cemento remanente es regresada por circulación inversa.

Los objetivos de la cementación forzada y las condiciones del agujero regirán si se usa alta o baja presión.

Requerimiento de la Presión Forzada.

La técnica de alta presión utiliza una cantidad de -- agua salada (o un limpiador químico), para determinar la presión de fractura de la formación y ser forzado el cemento.

1. El lodo no sería usado como un fluido fracturante porque dañaría o taponaría la formación.
2. Después de fracturar, una lechada de cemento y agua -- es bombeada a un gasto bajo.
3. Como el bombeo continúa, la presión comienza a incre-

mentarse hasta que la presión superficial manifiesta un cambio brusco, indicando la deshidratación de la lechada de cemento.

4. La presión es mantenida momentáneamente en la formación para verificar si existen condiciones estáticas y después liberada para determinar si el cemento se detendrá en el lugar.

La técnica de baja presión ha llegado a ser el método más eficiente para forzar la lechada, apoyándose en el desarrollo de los cementos y aditivos para controlar la pérdida del fluido, así como el uso de los empacadores recuperables. Con esta técnica se evitará la fractura de la formación.

Con el método de pausas, el cemento es colocado alternando períodos de bombeo y espera. Las propiedades de la lechada de cemento con pérdida de fluido controlado, forma un enjarre del filtrado en la formación o dentro de las perforaciones, mientras que la lechada principal permanece en estado fluido dentro de la tubería de revestimiento.

La pérdida de fluido de una lechada de cemento pura (cemento y agua) es muy rápida y el enjarre del filtrado del cemento puede fraguar en los orificios superiores de la tubería de revestimiento, antes que la lechada cubra completamente un área dada de la formación. El resultado puede ser un tapón de

cemento a través de las perforaciones abiertas en la cima de una zona y no cubra el cemento, uniformemente a las perforaciones más bajas, como se muestra en las Figuras Nos. 3 y 4.

La lechada de cemento conteniendo un aditivo de control de pérdida de fluido, reacciona frente a la formación con un filtrado más lento que el del cemento puro, así el enjarre es denso y más resistente a la presión.

EL CEMENTO HA DESHIDRATADO EN LA PARTE SUPERIOR.  
PRODUCIENDO UNA RESISTENCIA PARA FLUIR

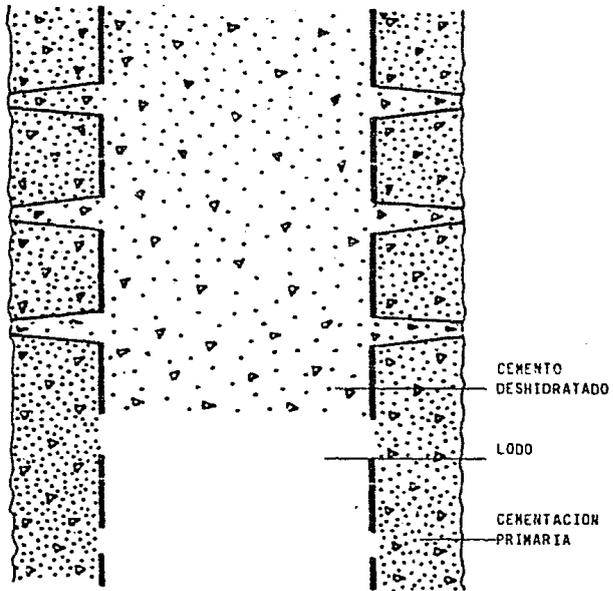


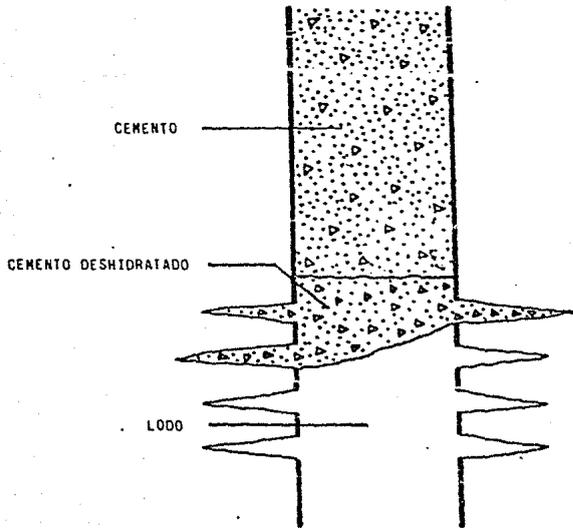
FIG. Nº 3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Cementación Incompleta

CEMENTACIONES

CAPITULO Nº 4

MACARIO REYES HEZA



|               |   |                    |
|---------------|---|--------------------|
| FIG. Nº 4     | UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO<br>FACULTAD DE INGENIERIA | CEMENTACIONES      |
| CAPITULO Nº 4 | Control de la Filtración en Cementación Forzada                   | MACARIO REYES MEZA |

#### 4.3 CEMENTACIONES FORZADAS EN ZONAS FRACTURADAS.

En las cementaciones forzadas en calizas y dolomitas - - fracturadas se debe poner mayor énfasis para sellar efectiva - mente la red fracturada o el sistema de canales que se encuentren en la formación.

Para forzar una formación carbonatada fracturada, es más importante que el cemento llene la fractura o los canales a -- que se incremente un enjarre de filtrado.

Para la operación de cementación forzada se recomienda :

1. Lechada de cemento con aditivos aceleradores.
2. Lechada de cemento de moderada pérdida de fluido.

La lechada de cemento es bombeada hasta alcanzar la formación y es represionada dentro de las zonas de menor resistencia y así dar oportunidad a que trabajen los aceleradores. Una vez que ésto ha ocurrido, la lechada de moderada pérdida - de fluido puede ser forzada dentro de las fracturas menos accesibles. El principal objetivo en el diseño de la lechada es - que sea compatible con las condiciones del fondo del agujero.

En algunos casos una lechada de cemento con moderada pérdida de fluido puede ser usada como una lechada guía para llenar las primeras fracturas existentes y los extremos de los canales; esta lechada es seguida por una lechada de alta resistencia que contenga agentes con la capacidad de puentear.

#### 4.4 PLANEAR EL TRABAJO.

Planear es una etapa importante en operaciones forzadas, donde las condiciones del pozo serán estudiadas y los objetivos cuidadosamente establecidos, así la cementación forzada no debe complicarse ni ser muy costosa. Para planear los siguientes cuestionamientos se emplearán :

1. ¿Cuál es el objetivo de la operación?
  - 1.1. ¿Se está aislando una zona?
  - 1.2. ¿Se está reparando una tubería de revestimiento rota?
  - 1.3. ¿Se está llenando para sellar el pozo?
2. ¿Cuáles son las condiciones del pozo?
  - 2.1. ¿Qué clase de fluido hay en el pozo (ácido, agua, o lodo)?
  - 2.2. ¿Cuál es el gradiente de temperatura?
  - 2.3. ¿Cuál es el tiempo de espera del fraguado?
3. ¿Se usará alta o baja presión?
4. ¿Qué herramientas se requerirán?
  - 4.1. ¿El empacador será perforable o recuperable?
5. ¿Qué clase de lechada se utilizará (qué volumen y con qué características)?
6. ¿Cómo se bombeará (intermitente, lento o rápido)?

Todos los esfuerzos serán hechos para realzar las condi-

ciones del agujero antes y durante la operación forzada. La sarta de la tubería de revestimiento y tubería de producción estarán perfectamente limpias internamente (libre de óxido, es camas de parafina y rebaba de perforación). Las conexiones su perfciales y los preventores de control serán probados a la presión que se espera sea ejercida en ellos.

Si el trabajo forzado es para ser ejecutado a través de la tubería de revestimiento, es necesario calcular la presión-interna y la resistencia de la junta a menos que la tubería es té cementada hasta la superficie.

La temperatura y la presión del pozo influyen en la colo cación y tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, la presión forzada afecta la deshidratación de la lechada. El co nocimiento de la temperatura de la formación es necesario para la colocación exitosa de la lechada de cemento.

En cuanto al tipo de cemento, para la mayoría de las ope raciones forzadas los cementos API clase G o H pueden ser uti- lizados; ya que éstos son fabricados para condiciones forzadas a 2440 m. donde la temperatura estática en el fondo del agujero no excede a los 93° C. Para pozos profundos, los cementos - clase G o H pueden ser adecuadamente retardados en base al - tiempo estimado para realizar la cementación forzada.

El control de la filtración es importante en el diseño -

de la lechada de cemento para un trabajo forzado; cuando el cemento es forzado contra un medio permeable, la presión diferencial fuerza al agua a que penetre en la formación, separándose los sólidos de la lechada y formando un enjarre del filtrado.

La pérdida de filtrado en el cemento puro es de 500 a 1200 c.c. en 30 minutos, por lo que la deshidratación se realiza tan rápidamente que dificulta su medición. La pérdida de filtrado puede reducirse a valores muy bajos de 25 a 100 c.c. en 30 minutos, al agregar bentonita y agentes dispersantes o polímeros, en la Figura N° 5 se aprecia la pérdida de filtrado en diferentes composiciones de lechadas de cemento en 30 minutos.

El fluido de reparación utilizado para un trabajo de baja o alta presión, dependiendo de las condiciones del pozo, será el agua salada o dulce.

Una de las mejores maneras para asegurar un depósito uniforme de cemento, es correr una solución débil de ácido clorhídrico o acético delante del cemento; el ácido contrae las partículas de arcilla y permite que la lechada de cemento penetre más.

DIFERENTES COMPOSICIONES DE LECHADAS DE CEMENTO

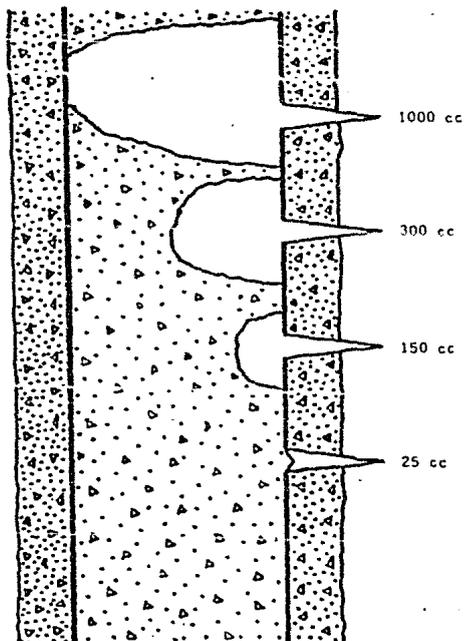


FIG. Nº 5

CAPITULO Nº 4

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Control de la Filtración

CEMENTACIONES

HACARIO REYES MEZA

#### 4.5 EMPACADORES PARA CEMENTACION FORZADA.

El uso de empacadores para cementación forzada hace posible la aplicación de presión más alta en puntos específicos del pozo. Los empacadores usados generalmente son el perforable y el recuperable. El permanente o perforable puede ser perforado después de la operación forzada y el recuperable en un trabajo de cementación forzada y es removido del pozo.

- Empacadores Perforables. Contienen una válvula de -- contrapresión para prevenir contraflujo al terminar de desplazar y una válvula deslizante, para equilibrar presiones con el objeto de controlar el movimiento del fluido en el pozo.

- Empacador Recuperable. A diferencia de los perforables los recuperables pueden ser colocados y soltados tan -- pronto como sea necesario. La mayor objeción para el uso de éstos es que el contraflujo no puede ser prevenido cuando la presión de desplazamiento es liberada a menos que una válvula de contrapresión sea empleada y que la reinversión del exceso de cemento pueda contaminar la lechada que ya ha sido forzada.

El diseño de empacadores recuperables varía, la mayoría son de un material no perforable y están disponibles en diversos tamaños, pesos y grados API.

La selección entre el uso de un empacador perforable o -- recuperable depende de las condiciones del pozo y los requerimientos de presión forzada.

## C O N C L U S I O N E S

Para cementar un pozo es importante conocer las condiciones reales del agujero y así poder hacer un programa de esta operación, que es básica y necesaria para ademar de una manera efectiva el pozo.

Existen diferentes clases de cemento, pero el que se utiliza en el campo es el Clase G mezclado con aditivos, el cual satisface todos los requerimientos necesarios de profundidad, presión, temperatura y litología.

La hidráulica en las cementaciones es fundamental, por tal motivo se debe de diseñar para que exista una presión diferencial entre las columnas hidrostáticas del interior y el espacio anular de la tubería de revestimiento; siendo siempre un poco mayor la presión en la columna del espacio anular y así estar en condiciones de probar el equipo de flotación.

A fin de diseñar una lechada es indispensable tener amplios conocimientos del equipo e instrumentos de laboratorio para obtener la reología, agua libre, filtrado de agua y el tiempo de bombeabilidad de la lechada de cemento.

Al realizar una cementación se debe obtener la información sobre el diseño de la lechada de cemento, cantidad y densidad, rendimiento, agua necesaria, tiempo bombeable, tipo de

bache lavador y espaciador; que precedan al cemento, así como el ajuste de la introducción de la tubería de revestimiento, posteriormente se harán los cálculos de las capacidades, volúmenes, peso de la sarta afectada por el factor de flotación, las presiones diferenciales entre el espacio anular y el interior de la tubería de revestimiento y la presión máxima de trabajo. Después de hacer todos los cálculos necesarios hay que elaborar un programa para cementar el pozo.

De la información que proporcionan el Químico y el Técnico debe de comprobarse personalmente y tener la certeza de que sean los valores reales del diseño elaborado, tales como los volúmenes de agua, cemento y lodo para desplazar.

La técnica en las cementaciones forzadas ha evolucionado considerablemente con el uso de herramientas mecánicas (empacadores y retenedores de cemento) y aditivos agregados a las lechadas de cemento. Este tipo de operaciones se realizan -- utilizando alta o baja presión, la técnica de baja presión -- proporciona un mejor control del cemento dentro de la red de canales o los espacios porosos, debido a que la lechada de cemento contiene aditivos que controlan la filtración del agua y evitan una prematura deshidratación de la lechada de cemento.

## R E F E R E N C I A S

1. American Petroleum Institute, API SPECIFICATION FOR MATERIALS AND TESTING FOR WELL CEMENTS, API Spec 10, Second Edition, Washington, D.C., junio 1984, 16-22.
2. Benitez Hernández, Miguel Angel, Ing., DISEÑO - DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO Y CEMENTACION, Instituto Mexicano del Petróleo, México, D. F., -- 1983, 95-101.
3. Benitez Hernández, Miguel Angel, Ing., Apuntes de "FLUIDOS DE PERFORACION", Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, D. F., Diciembre 1986, 165-174.
4. Halliburton de México, S. A. de C. V., "CEMENTACION HALLIBURTON DE POZOS DE PETROLEO", Revista Julio 1980, México, D. F., 53-91.
5. Halliburton de México, S. A. de C. V., Manual de "FUNCION DE LOS ADITIVOS DEL CEMENTO", México, D.F., 1975, 52 - 553.
6. Halliburton Energy Institute 1-6, CEMENTING, -- Litho U.S.A. 1976, 1-96.
7. Ron Baker, CONCEPTOS BASICOS DE PERFORACION, publicado por El Servicio de Extensión Petrolera, Universidad de Texas, Austin, Texas, 1979, 59-61.
8. Smith, Dwight K., CEMENTING, Published Society of Petroleum Engineers, of AIME, Duncan, Oklahoma, Mayo 1976, 6-9, 57-73, 85-95.
9. Woodruff John, FUNDAMENTOS DE PERFORACION, Tomo 1, Edit. Petroleum Extensión Service, Austin, - Texas, U.S.A. Junio 1961, 6-16 al 6-32