

2  
201



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TIPOS DE CEMENTOS PARA POZOS  
PETROLEROS

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO PETROLERO**  
**P R E S E N T A :**  
JAZMIN ARELLANO MORENO



MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-014

**SRITA. JAZMIN ARELLANO MORENO**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Jorge Manilla Fernández y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

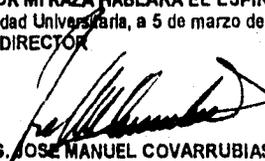
**TIPOS DE CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS**

- INTRODUCCION**
- I CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS**
- II ADITIVOS PARA CEMENTOS**
- III TRABAJOS EN LOS QUE SE EMPLEA EL CEMENTO**
- IV MIGRACION DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Ciudad Universitaria, a 5 de marzo de 1996  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS:RLR/gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL de la Srta. JAZMIN ARELLANO MORENO con número de cuenta 8455053-4 en la carrera de Ingeniero Petrolero, el título de la tesis para su examen profesional es:

" TIPOS DE CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS "

PRESIDENTE: M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO

VOCAL: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA

SECRETARIO: ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO

1ER. SUPTE.: ING. MANUEL VILLAMAR VIGUERAS

2DO. SUPTE.: ING. JOSE MARTINEZ PEREZ

Cd. Universitaria, Abril de 1996

## AGRADECIMIENTOS.

A mis queridos padres:

PEDRO R. ARELLANO SALDANA  
Y  
MARBELLA MORENO ARANDA

Con mucho amor y respeto, para ustedes que son lo mas especial que tengo, gracias por demostrarme siempre ternura, confianza y mantener siempre unida a nuestra familia.

A mis hermanos:

PEDRO R. ARELLANO MORENO  
DENIS A. ARELLANO MORENO  
SANTIEL ARELLANO MORENO  
GABRIEL ARELLANO MORENO  
WISMAR J. ARELLANO MORENO

Con mucho amor para cada uno de mis maravillosos hermanos, por estar conmigo en las buenas y en las malas. Les agradezco todo el apoyo, confianza y cariño que me han dado. No olviden que siempre juntos seremos el mejor equipo.

Al Ing. ALFREDO MOJICA SALGADO ---

Por haber sido un excelente profesor y amigo.

## AGRADECIMIENTOS.

A mis queridos padres:

PEDRO R. ARELLANO SALDANA  
v  
MARBELLA MORENO ARANDA

Con mucho amor y respeto, para ustedes que son lo mas especial que tengo, gracias por demostrarme siempre ternura, confianza y mantener siempre unida a nuestra familia.

A mis hermanos:

PEDRO R. ARELLANO MORENO  
DENIS A. ARELLANO MORENO  
SALTIEL ARELLANO MORENO  
GABRIEL ARELLANO MORENO  
WISMAR J. ARELLANO MORENO

Con mucho amor para cada uno de mis maravillosos hermanos, por estar conmigo en las buenas y en las malas. Les agradezco todo el apoyo, confianza y cariño que me han dado. No olviden que siempre juntos seremos el mejor equipo.

Al Ing. ALFREDO MOJICA SÁLGADO --

Por haber sido un excelente profesor y amigo.

A la familia:

RIVERA BARRERA

Gracias por el apoyo que me dieron para la terminación de este trabajo y por la amistad incondicional que me ofrecieron.

A los ingenieros:

ARMANDO HERRERA CUBELLS  
ENRIQUE PEREZ RODRIGUEZ

Les agradezco la confianza y apoyo que me han brindado

A los ingenieros:

NEHEMIAS HERRERA PATRON  
JORGE MANILLA FERNANDEZ

Por la dirección y asesoría recibidas en la realización de este trabajo

A todos los que hicieron posible este trabajo, en especial a mis amigos JOSE RIVERA BARRERA y SALVADOR VILLALOBOS PEREZ.

Al HONORABLE JURADO

A mis profesores:

Gracias por compartir sus conocimientos.

A mis amigos y compañeros:

Por compartir momentos de superación.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

## TIPOS DE CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS

### CONTENIDO

	PAGINAS
INTRODUCCION	i
OBJETIVO	iii
Capitulo I. CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS	1
1.1 Definición	4
1.2 Propiedades Químicas	4
1.3 Propiedades Físicas	5
1.4 Clasificación de los Cementos	10
1.5 Consideraciones Generales para la Elección del Cemento en la Operación de un pozo petrolero	18
Capitulo II. ADITIVOS PARA CEMENTOS	19
II.1 Aceleradores	21
II.2 Retardadores	32
II.3 Aditivos para Lechadas de Alta y Baja Densidades	39
II.4 Reductores de Fricción	56
II.5 Aditivos de Pérdida de Circulación	60
II.6 Dispersantes	68
II.7 Reductores del Filtrado	69
Capitulo III. TRABAJOS EN LOS QUE SE EMPLEA EL CEMENTO	79
III.1 Cementación Primaria de Tuberías de Revestimiento	81
III.2 Técnicas de Cementación Forzada	94
III.3 Diseño de Tapones de Cemento y su Colocación	109
III.4 Ejemplos de Aplicación	115
Capitulo IV. MIGRACION DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR	132
CONCLUSIONES	170
NOMENCLATURA	172
APENDICE A	174
Técnicas Tradicionales de Recementación	
APENDICE B	206
Nuevas Técnicas de Recementación	
BIBLIOGRAFIA	217

## INTRODUCCION.

La industria del petróleo ha continuado su rápida expansión, tanto en magnitud como en la diversidad de sus productos. En la actualidad el uso de estos productos aumentó en casi todas las ramas de la industria.

La demanda del petróleo continuará regida por la expansión económica mundial, ya que sin la disponibilidad de suministros suficientes de energía, esta expansión económica sería imposible. Los costos son altos y tanto la exploración como la producción demandan ahora más inversión de capital.

La industria petrolera en México ha alcanzado enormes adelantos, creando durante más de cincuenta años de existencia una infraestructura sofisticada que asegura un desarrollo tecnológico de primer nivel. Debido a su importancia económica dentro del país, es un potencial para el desarrollo de México.

La importancia del cemento es vital en la industria petrolera, debido a que de él depende el éxito en las terminaciones de pozos productores. La producción de cemento parece no tener muchos problemas, ya que su composición química es bastante conocida.

El cemento se utilizó por primera vez en 1903, para obturar la entrada de agua en el fondo de un pozo petrolero, esta lechada llevó cerca de 50 sacos de cemento portland; casi cuarenta años después se empezaron a utilizar los aditivos para modificar las propiedades de la lechada de cemento.

En 1940 aparecieron los ocho tipos de cementos especificados por el Instituto Americano del Petróleo (API), para ser usados en pozos petroleros. Dichas especificaciones están basadas en tres factores principales que son: La presión, la temperatura y la cantidad de agua de la mezcla.

Los cementos tienen propiedades químicas y físicas, las cuales se pueden modificar mediante el uso de aditivos.

Actualmente más de 40 aditivos se emplean con tipos de cementos API para obtener características óptimas en las lechadas de cemento en cualquier condición del pozo. Prácticamente, todos los aditivos de cementos que

normalmente se usan son polvos que se han mezclado en seco con el cemento, antes de que éste sea transportado al pozo.

En caso necesario la mayoría de los aditivos se puede añadir al agua en el sitio de trabajo. Utilizados en cantidades previamente calculadas, permiten controlar y solucionar problemas que pudieran presentarse en el pozo, en cualquiera de sus etapas.

La realización de un trabajo exitoso de cementación es un factor importante para la vida productiva de cualquier pozo. Se involucran elementos tales como la lechada de cemento, las herramientas y las técnicas para realizarlas.

Desde el inicio de la perforación de un pozo petrolero es indispensable contener las paredes del mismo; ésto se logra con la columna de lodo. Conforme avanza la perforación y a intervalos determinados, la contención de las paredes del pozo se efectúa por medio de ademes empleando tuberías de revestimiento (T.R.); para lograr este efecto es necesaria la utilización de otro material que es el cemento.

Se pueden solucionar problemas de: Zonas permeables expuestas, mala adherencia del cemento en el espacio anular, migración de fluidos al espacio anular, etc. por medio de una operación de cementación forzada, en la que se bombea una lechada de cemento a cierta presión de inyección.

También se utiliza para desviar un pozo, aislar herramientas atrapadas (pescados) en el pozo, para aislar intervalos, para abandonar el pozo, etc. Esto mediante la colocación de tapones de cemento, los cuales se diseñan considerando algunos parámetros y requieren de un método de colocación adecuado a las necesidades del problema.

La migración de gas es un fenómeno complejo de muchas facetas y en cualquier etapa del pozo es considerado como un problema grave. Esta situación debe solucionarse lo más efectivo que sea posible, debido a las dificultades y pérdidas que origina.

## **OBJETIVO.**

El objetivo de este trabajo, es presentar los elementos involucrados en una lechada de cemento para pozos petroleros, así como diferenciar las características físicas y químicas de ésta, para poder determinar cómo debe utilizarse la mezcla adecuada en cada una de las operaciones de cementación y resolver los problemas que pudieran presentarse en el pozo, en cualquiera de sus etapas.

## CAPITULO I

# CEMENTO PARA POZOS PETROLEROS

El objetivo de este capítulo, es definir conceptos fundamentales como cemento, así como presentar los principales elementos que lo conforman y diferenciar las propiedades físicas y químicas para hacer una adecuada elección.

El cemento está compuesto de materiales secos, los cuales son finamente molidos y mezclados en cualquier proporción, de acuerdo a los dos procesos que existen seco o mojado.

Esta mezcla de ingredientes al ser molida y calcinada en hornos horizontales con corriente de aire, se convierte en un material llamado "clinker" el cual se deja enfriar a temperatura ambiente con corrientes de aire en una área próxima al horno, una vez frío se muele en molinos de bolas, en donde se le da el tamaño deseado de las partículas en la salida del molino se adiciona una cantidad de yeso (sulfato de calcio) con lo que se obtiene el producto denominado "Cemento Portland".

El cemento tal como está no puede ser utilizado tanto en la construcción como en pozos petroleros, por este motivo existen instituciones que se encargan de estudiar y especificar el uso que se puede dar al cemento por sus características.

La ASTM y el API son las dos principales instituciones que estudian y describen sobre las especificaciones para la manufactura del cemento Portland.

1- La ASTM (Sociedad Americana para Prueba de Materiales) proporciona las especificaciones para cinco tipos de cementos Portland, designados como tipo I, II, III, IV y V, los cuales son usados para la construcción.

Estos son manufacturados para usarse a condiciones atmosféricas.

2- El API (Instituto Americano del Petróleo) proporciona las especificaciones para las ocho clases de cementos, designadas como clases A, B, C, D, E, F, G y H, las cuales se utilizan a diferentes rangos de presión y temperatura. Los cementos (API) clase A, B y C corresponden a los de la ASMT tipo I, II y III.

Los cementos basados en la clasificación API son usados generalmente en la industria petrolera para desarrollar trabajos tales como:

-- Cementaciones primarias de tuberías.

- Cementaciones forzadas.
- Represionar las zonas que contengan gas a altas presiones.
- Evitar pérdidas de circulación.
- Proteger a las tuberías de la corrosión.
- Evitar el movimiento de los fluidos entre las diferentes formaciones que los contengan.
- Estabilizar pescados, para recuperarlos.
- Desviar pozos.
- Taponar y abandonar pozos.

## 1.1 DEFINICION.

El cemento para pozos petroleros es una mezcla de caliza, arcilla o pizarras, óxido de fierro y óxido de aluminio, la cual es capaz de formar un cuerpo sólido cuando esta en contacto con agua y se le da un tiempo para que adquiera consistencia.

Es decir el cemento es una mezcla de minerales pulverizados y al añadirle agua se produce una reacción química, la cual provoca que ésta solidifique.

## 1.2 PROPIEDADES QUIMICAS.

El cemento esta compuesto químicamente de:

COMPONENTE	DESIGNACION COMUN	FORMULA
- Silicato Tricálcico	(C <sub>3</sub> S)	3CaOSiO <sub>2</sub>
- Silicato Dicálcico	(C <sub>2</sub> S)	2CaOSiO <sub>2</sub>
- Aluminato Tricálcico	(C <sub>3</sub> A)	3CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
- Aluminoferrato Tetracálcico	(C <sub>4</sub> AF)	4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Las características de cada componente químico son:

- Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S).

El silicato tricálcico es el componente de mayor proporción en la mayoría de los cementos y factor principal que produce la consistencia temprana o inmediata.

- Silicato Dicálcico (C<sub>2</sub>S).

El silicato dicálcico es un compuesto de hidratación lenta, que proporciona la ganancia gradual de resistencia, que ocurre en un largo periodo de tiempo.

- Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A).

El aluminato tricálcico controla el fraguado inicial y tiempo de espesamiento de la lechada siendo también responsables de la susceptibilidad al ataque de los sulfatos sobre los cementos, clasificándose estos en moderados y de alta resistencia al ataque químico.

- Aluminoferrato Tetracálcico (C<sub>4</sub>AF).

El aluminoferrato tetracálcico es un compuesto de bajo calor de hidratación que no influye en el fraguado inicial, todos los cementos son manufacturados en la misma forma y están compuestos de los mismos ingredientes sólo que en diferentes proporciones.

El agua requerida para cada tipo de cemento varía con la fineza de sus granos o cantidad de área superficial en contacto con el agua, los cementos de alta resistencia tienen gran área superficial (grano fino).

### 1.3 PROPIEDADES FÍSICAS.

La selección del tipo apropiado de cemento puede ser un problema demasiado serio debido a que se deben considerar todas las propiedades físicas de éste. No existe ninguna regla especial que contemple todas las situaciones que se puedan presentar. En estos casos debe hacerse una consciente investigación de las propiedades de la lechada de cierta calidad de cemento que debe usarse.

Las lechadas de cemento tienen las siguientes propiedades físicas:

- Densidad.
- Viscosidad.
- Tiempo de Fraguado.
- Resistencia a la Compresión.
- Permeabilidad.
- Pérdida de Agua.
- Resistencia a la Corrosión.

Las características de cada propiedad son:

- Densidad.

La densidad es una propiedad que debe ser calculada en un rango aproximado para evitar la entrada de fluidos a la formación y a su vez no tener pérdida de circulación.

La densidad debe ser igual que la del lodo en el momento de la cementación, esto minimiza las posibilidades de reventones o pérdidas de circulación en la cementaciones. La bentonita es el material más común usado para disminuir la densidad.

Un promedio de la densidad de una lechada de cemento varía entre 1.6 y 2.5 gr/cm<sup>3</sup>.

- Viscosidad.

La lechada de cemento tendrá una viscosidad o consistencia que le permitiera ejecutar un eficiente desplazamiento de lodo y lograr una buena adherencia entre la formación y la tubería.

Al agregar cemento y los aditivos de bajo peso al agua, la tendencia inmediata es que las partículas de los agregados floten. La viscosidad es la propiedad del cemento que controla el rango de colocación de esas

partículas y es un factor importante en el apropiado mantenimiento de la uniformidad de la lechada.

Además, influye en el control de la pérdida de la lechada a la formación, ya que los fluidos viscosos no pueden penetrar fácilmente dentro de pequeñas fisuras. Para mejores resultados la viscosidad deberá ser entre 2500 y 7000 cp.

#### - Tiempo de Fraguado.

El tiempo de fraguado es el lapso durante el cual la mezcla permanece bombeable. Esta propiedad se ve afectada por la presión, temperatura, tipo y porcentaje de aditivos en la mezcla, contenido y características del agua, etc.

El cemento fragua cuando ciertas reacciones químicas tienen lugar. Los aceleradores y retardadores aumentan o bajan el tiempo de fraguado de la lechada, se agregan a la mezcla o al agua. Es necesario el uso de un acelerador en pozos someros y de baja temperatura.

La presencia de agentes químicos en el agua de la mezcla puede también afectar el tiempo de fraguado.

#### - Resistencia a la Compresión.

Es la resistencia para minimizar el tiempo de espera para el fraguado así como soportar los esfuerzos originados en las operaciones. Se considera generalmente una resistencia a la compresión de 35 kg/cm<sup>2</sup> para que exista buena adherencia del cemento entre la formación y la tubería de revestimiento. El cemento deberá desarrollar esta resistencia a la compresión entre las 3 y 6 primeras horas después de su colocación para reducir el tiempo de espera del fraguado.

Esta propiedad está estrechamente relacionada con el tiempo de fraguado de la lechada, por lo que estará afectada por los siguientes factores: Presión, temperatura y relación agua cemento.

#### - Permeabilidad.

La permeabilidad es una de las propiedades de la lechada de cemento que se requieren disminuir para lograr un sello hidráulico efectivo entre las diferentes formaciones penetradas. Las lechadas ya fraguadas tienen valores muy bajos de permeabilidad de 0.1 md aproximadamente, mismos que generalmente son menores a los valores de permeabilidad de las formaciones productoras.

La permeabilidad aumenta al usar aditivos inertes no porosos. La pérdida de permeabilidad del cemento limpio y fraguado es muy baja, pero la acción de aguas ácidas filtrarán algunos componentes solubles y se crearán canales a través del cemento.

#### - Pérdida de Agua.

El enjarre previene la pérdida de agua en la mayoría de los pozos mientras se realiza la operación de cementación. El filtrado de las mezclas de cemento puede introducirse a la zona productora formando una emulsión o un bloqueo de agua.

La pérdida de agua reduce el volumen de la mezcla y consecuentemente se contrae. El uso de una mezcla con baja pérdida de agua tiene la ventaja de evitar la posibilidad de comunicación de los fluidos entre las diferentes zonas.

#### - Resistencia a la Corrosión.

La cubierta de cemento ofrece un grado de protección a la tubería contra el agua de formación la cual es corrosiva. En algunas áreas donde el contenido de sulfatos en el agua es alto hace de la resistencia a la corrosión un factor importante en la selección del cemento, pues muchos cementos se deterioran en tales ambientes.

Este nuevo obstáculo disminuye con altas temperaturas, en consecuencia es más frecuente en pozos superficiales. Los cementos cuyo contenido de aluminio tricálcico sea bajo son menos susceptibles a la acción del sulfato.

#### - Efectos del Agua en las Lechadas.

Todas las lechadas son afectadas por la cantidad de agua usada para hacerlas. La mínima cantidad de agua usada para hacer una lechada es aquella que la hace apenas bombeable, la máxima cantidad de agua es aquella que puede agregarse antes que la separación de la misma ocurra, esta separación afecta el producto colocado.

La principal función del agua en una lechada de cemento es humedecer los sólidos del cemento y conducirlos al fondo del pozo. El agua que se usa para la mezcla del cemento debe estar limpia y libre de sedimentos, de materia orgánica o de otros contaminantes. Los materiales inorgánicos como cloruros, sulfatos, hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, cuando se presentan en concentraciones pequeñas aceleran el fraguado del cemento.

Cuando se mezclan estos materiales y se usan para cementaciones profundas con altas presiones y temperaturas, hacen que la lechada se frague prematuramente, ya que generalmente contiene indicios de carbonatos y bicarbonatos, los cuales disminuyen el tiempo de bombeabilidad. El agua de mar contiene de 30 000 a 40 000 ppm de contenido de cloruros los que frecuentemente causan aereación y espumamiento durante la mezcla de cemento, originando problemas con el peso de la lechada.

Las aguas naturales contienen productos orgánicos para descomponer la vida vegetal o fertilizantes, los cuales retardan el fraguado del cemento, generalmente la sustancia retardadora es el ácido húmico formado por la descomposición de plantas.

## 1.4 CLASIFICACION DE LOS CEMENTOS.

La clasificación de los diferentes cementos para pozos petroleros es especificada por el Instituto Americano del Petróleo (API).

El amplio rango de condiciones que se encuentran en los pozos petroleros ha hecho que se desarrollen cementos con varios tiempos de espesamiento.

El cemento fragua más rápidamente al aumentar la presión y la temperatura, debe modificarse para tener un tiempo de fraguado adecuado a la profundidad de los pozos.

Los cementos clasificados de la A a la H, se usan de la superficie hasta los 2440 m, pueden utilizarse a profundidades mayores empleando aceleradores y retardadores para cubrir un rango mayor de profundidad y de temperatura en el pozo.

Algunas veces se tiene una última clasificación que es la J, la cual cubre profundidades hasta de 4880 m bajo condiciones de presión y temperatura extremadamente altas. Todos los cementos antes mencionados tienen resistencia al sulfato ya sea moderada o alta según sea necesario de acuerdo a la composición típica de estos como se muestra en la tabla 1.1.

Los cementos bajo estas normas se catalogan de la siguiente manera:

- Clase A.
- Clase B.
- Clase C.
- Clase D.
- Clase E.
- Clase F.
- Clase G y Clase H.
- Clase J

COMPOSICION TIPICA DE LOS CEMENTO [%]					
CLASE	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Ca SO <sub>4</sub>
A	53	24	8	8	3.58
B	47	32	3	12	2.9
C	58	16	8	8	4.1
D, E, F	26	54	2	12	3
G	52	32	3	12	3.2
H	52	32	3	12	3.3

TABLA 1.1

Cada clase está especificada para los siguientes rangos de condiciones:

- Clase A.

Los cementos clase A son empleados desde la superficie hasta profundidades de 1830 m y temperatura de 77°C, cuando no se requieren propiedades especiales. (es similar al tipo I ASTM).

- Clase B.

Los cementos clase B se emplean desde la superficie hasta profundidades de 1830 m y para temperatura de 77°C, cuando se requiere que sea resistente a la acción de los sulfatos en concentraciones moderadas y elevadas (similar al tipo II ASTM).

- Clase C.

Los cementos clase C son usados desde la superficie hasta profundidades de 1830 m y temperatura de 77°C, cuando se requiere alta resistencia a la compresión inmediata, disponible en mediana y alta resistencia a la acción de los sulfatos.

- Clase D.

Los cementos clase D se emplean para profundidades de 1830 a 3050 m, en donde se tiene temperatura moderada de 110°C y presión disponible de media a alta. Resistencia a la acción de los sulfatos.

- Clase E.

Los cementos clase E son usados en profundidades de 3050 a 4270 m. para una temperatura de 143°C, en donde se tiene alta temperatura y presión. disponible en mediana y alta resistencia a la acción de los sulfatos.

- Clase F.

Los cementos clase F se emplean para profundidades de 3050 a 4880 m. para una temperatura de 160°C, en donde se tiene presión y temperatura extremadamente altas. disponible en mediana y alta resistencia a la acción de los sulfatos.

- Clase G y Clase H.

Los cementos clase G y H se emplean básicamente para profundidades de 0 a 2440 m, hasta una temperatura de 93°C. son compatibles con aceleradores o retardadores, para usarse sobre el rango de profundidades que cubren los cementos de la clase A a la clase D y son similares en composición química al cemento de clase B (resistencia a la acción de los sulfatos).

Los cementos clase G o H deben emplearse de la superficie hasta 2400 m. tal como se fabrican, pudiendo ser modificados con aceleradores o retardadores y ser utilizados en un amplio rango de condiciones de temperatura. Son fabricados con especificaciones más rigurosas, tanto físicas como químicas, resultando un producto más uniforme.

El cemento clase G requiere el 44% en peso de agua y el cemento clase H requiere del 38% en peso de agua.

– Clase J.

Los cementos clase J son usados en profundidades de 4880 m en adelante a condiciones de temperaturas y presiones extremadamente altas o puede usarse con aceleradores y retardadores para cubrir una amplia gama de temperaturas y profundidades del pozo.

En la tabla 1.2 se muestran las condiciones que requiere cada clase de cemento.

– Cementos Especiales.

Los cementos especiales utilizados en pozos petroleros son:

1. Cemento Látex.
2. Cemento Puzolánico.
3. Cemento Tixotrópico.
4. Cemento -Yeso.
5. Cemento Pozmix.
6. Cemento Aceite-Diesel.
7. Cemento de Emulsión de Aceite en Agua.

Cada tipo de cemento especial tiene las siguientes características:

1. Cemento Látex.

El cemento látex se utiliza para reducir la pérdida de circulación, tiene como componentes un activador de superficie y agua. Una característica especial es cuando a la lechada se le aplica presión, el compuesto de látex se comprime dentro de la formación permeable formando un sello. Es especialmente resistente a la contaminación con aceite y/o lodo, además tiene un alto poder de unión con otros materiales.

CONDICIONES PARA CADA TIPO DE CEMENTO				
CLASIFICACION API	AGUA DE LA MEZCLA l/sc	PESO DE LA LECHADA gr/cm	PROFUNDIDAD m	TEMPERATURA °C
A	19.7	1.9	0 - 1830	27 - 77
B	19.7	1.9	0 - 1830	27 - 77
C	23.8	1.8	0 - 1830	27 - 77
D	16.3	2	1830 - 3050	77 - 127
E	16.3	2	3050 - 4270	127 - 143
F	17	1.9	3050 - 4880	110 - 160
G	18.9	1.9	0 - 2440	27 - 93
H	16.3	2	0 - 2440	27 - 93

TABLA 1.2

## 2. Cemento Puzolánico.

Los materiales naturales o artificiales que contiene un porcentaje suficientemente grande de sílice susceptible de combinarse con el hidróxido de calcio y formar un cemento de propiedades hidráulicas, se conoce con el nombre de puzolanas.

Pueden utilizarse como un aditivo para cemento ordinario o como una combinación puzolana-cal.

La puzolana natural es en su mayor parte de origen volcánico, mientras que las puzolanas artificiales son obtenidas mediante el tratamiento con calor a materiales naturales como arcillas, esquistos y ciertas rocas silíceas. El cemento puzolana ha demostrado ser bueno para utilizarse en pozos profundos.

La ceniza, producto de la combustión del carbón es usada ampliamente en la industria petrolera como puzolana. Cuando la ceniza esta presente en el cemento combinada con el hidróxido de calcio, constituyen una gran resistencia e impermeabilidad del cemento.

## 3. Cemento Tixotrópico.

El cemento tixotrópico se utiliza como aditivo que sirve para aumentar la viscosidad de la lechada. Este cambio de viscosidad ocurre repentinamente cuando se incrementa o decrecienta alternativamente el esfuerzo cortante.

## 4. Cemento - Yeso.

El cemento-yeso es una mezcla especial que contienen una concentración alta de ingredientes y tiempo de colocación fácilmente controlables.

El yeso es el componente básico, su uso principal es el de proveer tapones temporales durante los trabajos y pruebas de reparación.

El fraguado es muy rápido, pero se deteriora al contacto con el agua. Este no se combina con cementos clase A, G o H con una concentración de 8% a 10%, originando buenas propiedades lixotrópicas, excepto en mezclas con cemento portland.

#### 5. Cemento Pozmix.

El cemento pozmix es la combinación de cemento portland con puzolana y aproximadamente el 2% de bentonita. Por definición una puzolana es un material de sílice que al reaccionar con agua y cal forma un silicato de calcio el cual tiene propiedades cementantes. El cemento portland libera cerca del 15% de cal cuando reacciona con agua, por lo que al adicionar puzolana reacciona con la cal libre, formando una masa más dura de silicato de calcio.

La composición del cemento pozmix es menos costosa que otro material de cementación básico, ya que se usa más agua para darle peso al material.

#### 6. Cemento Aceite-Diesel.

El cemento aceite-diesel es una mezcla de cemento portland, aceite, diesel o kerosina y un dispersante químico. Se han empleado en trabajos de reparación de pozos para sellar la comunicación con el estrato de agua. Este material no se fija hasta que esta en contacto con el agua y en consecuencia tiene un tiempo ilimitado de bombeo. Se ha usado también en la prevención de pérdida de circulación.

#### 7. Cemento de Emulsión de Aceite en Agua.

Los cementos de emulsión de aceite en agua son mezclas con poca pérdida de agua y baja densidad, pero de adecuada concentración y tiempo de fraguado. Se preparan con kerosina, agua, cemento y de 2% al 4% de bentonita.

El lignosulfonato de calcio se usa como agente emulsificante y retardador. Estos cementos tienen aplicación en las cementaciones primarias y la reparación de pozos.

## 1.5 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA ELECCION DEL CEMENTO EN LA OPERACION DE UN POZO PETROLERO.

1- Se debe tomar en cuenta la clasificación API de cementos para diferentes profundidades de pozos y en condiciones estáticas de temperatura, así como la recomendación para la cantidad de agua de la mezcla y la densidad de la lechada resultante.

2- La selección de un cemento para una aplicación específica en un pozo petrolero es una elección económica del material cementante que:

- a) Pueda ser colocado satisfactoriamente con el equipo que se tiene.
- b) Tenga un esfuerzo a la compresión tan pronto sea colocado.
- c) Pueda inmediatamente conservar las propiedades necesarias para aislar las formaciones.
- d) Pueda soportar y proteger la tubería de revestimiento.

## CAPITULO II

### ADITIVOS PARA CEMENTOS

El objetivo en este capítulo, es dar a conocer los diferentes materiales que se utilizan para modificar las propiedades físicas y químicas de las lechadas de cemento, a las condiciones requeridas en el pozo.

Los cementos tienen características o propiedades químicas y físicas, las cuales son modificadas con aditivos, como son: Los aceleradores, retardadores, aditivos para lechadas de alta y baja densidad, reductores de fricción, aditivos de pérdida de circulación, dispersantes y reductores de filtrado.

La aceleración, el retardamiento o cualquier otra alteración que se le realiza a las lechadas de cemento involucran varias reacciones, éstas no son independientes debido a que una reacción es acelerada en función de otra. La fabricación de cemento de fraguado lento, se elabora bajo los siguientes dos métodos:

Un método es ajustando la composición del cemento para que el aluminato tricálcico permanezca en baja concentración, la hidratación del silicato tricálcico controla el fraguado inicial, causando una baja velocidad de hidratación.

El otro método es ajustar el tamaño de las partículas del cemento, este fraguará más lentamente si se muele a un tamaño de grano grueso, de esta forma se tiene que el tamaño del grano acelera o retarda el fraguado.

La velocidad con la que sea enfriado el "clinker" determina en cierto grado la cantidad de aluminio tricálcico disponible para la hidratación, ya que un enfriamiento más rápido da lugar a que se forme menos aluminato, es decir, un enfriamiento rápido origina un fraguado lento.

Los fabricantes de cemento siguen cualquiera de los procedimientos citados. Se debe tener sumo cuidado con el uso de los retardadores para no originar un deterioro enorme en el desarrollo de la consistencia del producto fraguado, principalmente cuando el retardador es adicionado al cemento justo al momento de utilizarlo.

## II.1 ACELERADORES.

Los aceleradores son aditivos químicos que se agregan a las lechadas de cemento cuando existen temperaturas bajas en pozos someros o en pozos perforados en zonas frías, estos aceleran el fraguado del cemento ahorrando tiempo y dinero.

Acortan el tiempo de bombeabilidad de la lechada e incrementan la resistencia a la compresión del cemento fraguado. Los componentes orgánicos son utilizados para retardar el fraguado del cemento y los inorgánicos aceleran el fraguado del cemento.

Los compuestos inorgánicos particularmente los cloruros de calcio y sodio, hacen la mejor función de aceleración, tomando parte en la hidratación del cemento. El grado de aceleración es influenciado por cualquier factor que tenga un efecto sobre la reacción química.

Los factores que pueden influenciar la velocidad de reacción son:

- Presión.
- Temperatura.
- Concentración de cada aditivo.
- Partículas ionizadas presentes.
- Naturaleza química de la mezcla.

Los aceleradores más comunes son los siguientes:

- Cloruro de Calcio.
- Cloruro de Sodio.
- Cal-Seal o Yeso Semihidratado.
- Diacel A.
- Ecnolite.
- Cementos Densificados (con dispersantes y agua reducida).
- Agua de Mar.

Las características de cada uno son:

- Cloruro de Calcio.

Esta sal se dosifica del 2% al 4% por peso de cemento, dependiendo del tiempo de fraguado que se desea obtener, este producto es el que exhibe mayor control en bombeabilidad.

\* Utilidad.

- Disminuye el tiempo bombeable.
- Incrementa la resistencia a la compresión inicial.
- Reduce el tiempo de fraguado.

El grado anhidro es preferido por las siguientes razones:

1. No absorbe humedad atmosférica como el grado regular.
2. No forma lapones en el sistema de dosificaciones cuando se presentan cantidades pequeñas de agua en el sistema del compresor.
3. Después de que se ha modificado en el cemento es rápidamente soluble en la lechada.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica: 1.96 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: 0
- Volumen Absoluto: 0.07 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 1830 m
- Temperatura: 4.4 - 49°C
- Concentración: 1% - 4% por peso de cemento, normalmente 2% es suficiente

\* Efectos del cloruro de calcio sobre las propiedades del cemento.

- |  |   |
|--|---|
| - Densidad   | Ningún efecto.  |
| - Viscosidad   | Puede reducir o incrementar, causando menor efecto.                 |
| - Agua para mezclar<br>(cuando se utiliza en<br>altas concentraciones) | Ningún efecto.  |
| - Tiempo bombeable   | Reduce, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.     |
| - Resistencia inicial  | Incrementa, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos. |
| - Resistencia final  | Reduce, causando un efecto menor.                                   |
| - Pérdida de fluido<br>(Filtrado)                                      | Incrementa, causando un efecto menor.                               |
| - Durabilidad  | Ningún efecto.  |
| - Cloruro de Sodio.  |   |

Esta sal dosificada del 2% al 5% por peso de cemento, mantiene las propiedades de acelerador hasta 10% por peso de agua, arriba de estas concentraciones pierde su propiedad de acelerador actuando como dispersante, ayudando en su trabajo a los retardadores. Las lechadas saladas presentan mayor fluidez y menos pérdida de agua. Al 18% por peso de agua tiene la mayor dilatación permisible del cemento fraguado y la pérdida de fluido causa poco daño a la formación y a los fluidos de la misma.

\* Utilidad.

- Mejora la adherencia del cemento en zonas de lutitas bentoníticas.
- Disminuye el daño en zonas que son sensibles a aguas dulces.
- Aumenta la expansión del cemento para obtener mejores adherencias.

\* Propiedades.

- Gravedad Específica: 2.17 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: 0 %
- Volumen Absoluto: Variable y depende de la concentración

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 1830 m
- Temperatura: 10 - 49°C
- Concentración: 1.5% - 5.0% por peso de cemento  
3.0% - 18% por peso de agua de la mezcla

\* Efectos del cloruro de sodio sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Incrementa, causando menor efecto.
- Viscosidad Puede reducir o Incrementar, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Ningún efecto.
- Tiempo bombeable Reduce-baja concentración o Incrementa-alla concentración, causando un menor efecto.
- Resistencia inicial Incrementa-baja concentración, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.

- Resistencia final            Reduce, causando un menor efecto.
- Pérdida de fluido            Incrementa, causando un efecto menor.  
    (Filtrado)
- Durabilidad                  Ningún efecto.

- Cal-Seal o Yeso Semihidratado.

La cal-seal es un aditivo que da un endurecimiento rápido al cemento después de mezclarse con agua, se pueden usar concentraciones del 5% al 90% por peso de cemento. El agua requerida es de 40 a 46 lt/100 kg de mezcla, puede ser bombeado sin problemas en tiempos cortos de hasta 10 minutos.

\* Utilidad.

- La resistencia a la compresión inicial se alcanza rápidamente a bajas temperaturas.
- La expansión aumenta después de que el cemento ha fraguado.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica:            2.75 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:        20 lt por peso de cal-seal
- Volumen Absoluto:              0.3705 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:                    0 - 300 m
- Temperatura:                  4.5 - 26.5°C
- Concentración:                2% - 90% por peso de cemento,  
  normalmente 5% es  
  suficiente

\* Efectos del cal-seal o yeso semihidratado sobre las propiedades del cemento.

- Densidad                      Reduce, causando menor efecto.
- Viscosidad                    Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar        Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable        Reduce, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Resistencia inicial        Incrementa, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Resistencia final         Reduce, causando un efecto menor.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)                Ningún efecto.
- Durabilidad                Ningún efecto.

- Diacel A.

El diacel A es un tipo de acelerador que se utiliza en combinación con el retardador diacel LWL, el cual controla las pérdidas de fluido de la lechada de cemento.

\* Utilidad.

- Disminuye el tiempo bombeable de cemento con diacel LWL.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica:                      2.62 gr/cm<sup>3</sup>

- Requerimiento de Agua: 0 (en combinación con el Diacel LWL, requiere aproximadamente 3.03 lt/sc de agua adicional)
- Volumen Absoluto: 0.3822 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 1830 m
- Temperatura: 10 - 49°C
- Concentración: 1% - 5% por peso de cemento

\* Efectos del diacel A sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa-poco, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa-poco, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Reduce, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Resistencia inicial Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia final Ningún efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Ningún efecto.
- Durabilidad Ningún efecto.

- Ecnolite.

El ecnolite es normalmente usado para preparar mezclas de cemento considerando su peso, no es recomendable que se utilice con cloruros de calcio ni con altas concentraciones de cloruro de sodio.

\* Utilidad.

- Reduce la densidad de la lechada.
- Al agregarle agua incrementa el rendimiento y reduce la resistencia a la compresión.

\* Propiedades.

- Gravedad Específica: 2.4 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: Variable (depende de la cantidad utilizada)
- Volumen Absoluto: 0

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 2440 m
- Temperatura: 27 - 93°C
- Concentración: 1% - 3% por peso de cemento, dependiendo del peso deseado de la mezcla de 1.2 a 1.7 kg/lit

\* Efectos del ecnolite sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Reduce, causando un efecto menor.
- Resistencia inicial Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia final Reduce, causando un menor efecto.

- Pérdida de fluido (Filtrado) Ningún efecto.

- Durabilidad Ningún efecto.

- Cementos Densificados (con dispersantes y agua reducida).

Al agregar aceleradores a las lechadas de cementos se disminuye el tiempo normal del fraguado del cemento. Cuando se reduce la cantidad de agua en la lechada disminuye la densidad de la mezcla.

Estas mezclas de cemento son empleadas para cementar tuberías superficiales y para la colocación de taponés. Los tiempos de bombeo son cortos debido al rápido fraguado del cemento.

Las clases A, G y H son los cementos más comúnmente empleados. El peso de la lechada es de 2.10 gr/cm<sup>3</sup> con una proporción de agua de 129 lt/sc. Son empleados también para la colocación de taponés en pozos desviados. Se requiere de 6.8 a 9.1 kg de arena por saco de cemento para obtener una densidad de la lechada de 2.16 gr/cm<sup>3</sup>, en igual proporción de agua.

Generalmente una mezcla de estas características provoca altas presiones de bombeo por lo que son diseñadas para tiempos cortos de bombeo.

\* Utilidad.

- Alta resistencia a la compresión inicial para emplearse en la colocación de taponés.

\* Propiedades.

- Aditivo Dispersante:	CFR-2
- Gravedad Específica:	1.3 gr/cm <sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:	0
- Volumen Absoluto:	-----

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: Hasta 2348 m (si no se emplean retardadores)
- Temperatura: 40 - 150°C
- Concentración: 0.75% - 1.0% de CFR-2 (mezclado)  
de 13.34 lt/sc a 15.1 lt/sc

\* Efectos de los cementos densificados (con dispersantes y agua reducida) sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Incrementa, causando un menor efecto.
- Viscosidad Reduce, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Reduce, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia inicial Incrementa, causando un menor efecto.
- Resistencia final Incrementa, causando un menor efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Reduce, causando un menor efecto.
- Durabilidad Ningún efecto.

- Agua de Mar.

En áreas costeras es a veces necesario usar agua de mar para la preparación de mezclas de cemento. El agua de mar contiene de 1.5% a 2.0% de cloruros solubles, las mezclas de cemento preparadas con agua de mar se emplean en tiempos cortos de bombeo.

La aceleración lograda con agua de mar no es muy rápida y es llevada a cabo con un 2% de cloruros de calcio. Se emplea en la cementación de tuberías superficiales.

En pozos marinos se aumenta la resistencia a la compresión inicial debido a la existencia de grandes volúmenes de agua.

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:	0 - 1830 m
- Temperatura:	4.4 - 71°C
- Concentración:	-----

\* Efectos del agua del mar sobre las propiedades del cemento.

- Densidad	Incrementa, causando un menor efecto.
- Viscosidad	Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar	Ningún efecto.
- Tiempo bombeable	Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia inicial	Incrementa, causando un menor efecto.
- Resistencia final	Ningún efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado)	Incrementa, causando un menor efecto.
- Durabilidad	Ningún efecto.

## II.2 RETARDADORES.

Son aditivos químicos, que incrementan el tiempo del fraguado de las lechadas de cemento para trabajarlo en un amplio rango de temperatura y presión.

El retardador modifica la velocidad de reacción del agua y cemento por un proceso de absorción. Estos procesos son sensibles a la temperatura y presión.

Los aditivos mezclados en la lechada afectan el comportamiento de los retardadores y el tiempo bombeable de la lechada depende de las concentraciones de dispersantes, aditivos para el control del filtrado, requerimiento de agua y el desempeño del retardador. Tales efectos prevalecen en temperaturas de circulación menores de 260°C.

Aditivos como bentonita absorben fuertemente cantidades de retardadores lo cual debe ser función del cemento.

Altas concentraciones de sal reducen la solubilidad del retardador, a concentraciones bajas se producen efectos mínimos.

El retardamiento del fraguado se logra por el uso de un aditivo agregado ya sea en la elaboración del cemento o al ser usado.

Los aditivos para este propósito son generalmente productos de la celulosa y lignosulfatos, que afectan las propiedades superficiales de las partículas del cemento, formando una película protectora temporal que los separa del agua, evitando la humedificación e hidratación subsecuente.

Los retardadores más comunes son los lignosulfonatos de calcio y cromolignosulfonatos de calcio, así como otros que son mezclas químicas, unos trabajan a temperaturas bajas y otros a altas temperaturas, su dosificación es de 0.1% a 2.5% por peso de cemento. Varias teorías se han desarrollado para explicar el mecanismo de los retardadores. Algunas

teorías que se han propuesto para la explicación de éste mecanismo consideran dos factores:

1. La naturaleza química del retardador.
2. La fase del cemento (Silicato o Aluminato) sobre la que actúan los retardadores.

Se han propuesto cuatro teorías, las cuales son:

#### 1. Teoría de la Absorción.

El retardamiento es debido a la absorción del retardador sobre la superficie de un producto de hidratación, evitando el contacto de éste con el agua.

#### 2. Teoría de la Precipitación.

La reacción del retardador con calcio y/o iones de hidroxil en la fase acuosa, forman una capa insoluble e impermeable alrededor de los granos de cemento.

#### 3. Teoría de la Nucleación.

La absorción del retardador en el núcleo de productos de hidratación, modifica el comportamiento de la lechada de cemento.

#### 4. Teoría de la Complexación.

Los iones de calcio están separados por el retardador previniendo la formación de núcleos.

Es muy probable que los efectos antes mencionados tengan que ver en el proceso de retardación, existiendo una clase de retardadores químicos así como sus mecanismos de acción.

Los retardadores más comunes son:

- Diacel LWL.

- Lignosulfonatos.
- Acidos Hidroxicarboxilicos.
- Compuestos Sacáridos.
- Derivados de Celulosa.
- Organofosfonatos.
- Componentes Inorgánicos.

Los retardadores tienen las siguientes características:

- Diacel LWL.

El diacel LWL es empleado para controlar pérdidas de fluidos de las lechadas de cemento y retardar el fraguado de la mezcla. El diacel puede ser empleado a temperaturas desde 43 a 149°C en el fondo del pozo.

Información especial.

El diacel incrementa la viscosidad de la mezcla, aumentando su espaciamento. Cuando existen altas concentraciones de diacel en la mezcla de cemento, provoca altas viscosidades.

Es un retardador particularmente fuerte, si existen bajas temperaturas de circulación puede ser empleado como acelerador.

La combinación del diacel LWL y el diacel A no es compatible con el cloruro de calcio, ya que estos no pueden emplearse juntos debido a que el diacel LWL al mezclarse con agua fría aumenta los problemas de viscosidad.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica: 1.36 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento del agua: 0 %
- Volumen absoluto: 0.7361 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 1830 - 4270 m
- Temperatura: 43 - 149°C
- Concentración: 0.1% - 2.5% por peso de cemento

\* Efectos del diacel LWL sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Resistencia inicial Reduce, causando un efecto menor.
- Resistencia final Reduce, causando un efecto menor.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Durabilidad Ningún efecto.
  
- Lignosulfonatos.

Los retardadores más comunes son la sal de sodio y la sal de calcio de ácidos lignosulfónicos.

Los lignosulfonatos son polímeros derivados de la pulpa de la madera sin refinar y que contengan componentes sacáridos.

Desde que los lignosulfonatos purificados perdieron muchos de sus poderes de retardación, la acción de retardamiento de estos aditivos se modifica frecuentemente con la presencia de carbohidratos con peso molecular bajo, como: Pentosas, exosas, glucosas y ácidos aldónicos especialmente xilonic y ácidos glucónicos.

Los retardadores de lignosulfonatos son efectivos con toda clase de cemento y son utilizados generalmente en concentraciones de 0.1% a 1.5% por peso de cemento.

Estos son efectivos a los 122°C en el fondo del pozo. El índice de temperatura de fondo se puede extender o elevar a más de 315°C cuando se mezcla con sodio. El mecanismo de retardación de lignosulfonatos se lleva a cabo generalmente a través de teorías de combinación de la absorción y nucleación.

En 1972 Remachandran, demostró que el sulfonato y los grupos de hidroxil se absorben sobre la capa de gel. Algunos lignosulfonatos permanecen en la fase acuosa, pudiendo estar en estado libre y/o conectados con iones de calcio a través de interacciones electroestáticas, esto ha demostrado que los lignosulfonatos bajos en concentración originan el aumento de cristales de hidróxido de calcio.

Un cambio muy significativo en el tamaño y forma del cristal de hidróxido de calcio se puede observar cuando el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) se hidrata en presencia de lignosulfonato. El retardador del lignosulfonato reacciona mejor con cementos bajos en aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A). Cuando el aluminato tricálcico se hidrata en presencia de aditivos orgánicos como los lignosulfonatos, la concentración de aditivos disminuye fácilmente.

#### - Ácidos Hidroxicarboxílicos.

Los productos de hidratación del aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) tienen mejor absorción que los del silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) conteniendo grupos de hidroxilos y carboxilos en su estructura molecular, las sales del gluconato y glucoptonato son las más usadas, tienen un poderoso mecanismo de

retardamiento y pueden causar retraso durante la circulación de la lechada de cemento aproximadamente a temperaturas de 93°C.

Otro ácido hidroxicarboxilo que posee grandes efectos de retardación es el ácido cítrico, efectivo como dispersante de cemento y se usa normalmente en concentraciones entre 0.1% al 0.3%.

La acción retardadora de los ácidos hidroxicarboxílicos y sus sales se atribuye a la presencia de grupos de hidroxicarboxílicos alfa y beta, los cuales son capaces de reforzar un catión de metal, tales como el calcio, al igual que a los lignosulfonatos los ácidos hidroxicarboxílicos son más efectivos en cementos bajos de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A).

#### - Compuestos Sacáridos.

Los compuestos sacáridos o azúcares son excelentes retardadores del cemento, los mejores son la sucrose y la fainose, no son muy empleados en la cementación de pozos, ya que el grado de retardación es muy sensible a pequeñas variaciones en su concentración.

El retardamiento de estos compuestos ha sido estudiado y ha demostrado ser susceptible a la degradación por medio de hidrólisis alcalina.

Los azúcares son convertidos a ácidos sacarínicos que contienen grupos de hidroxicarbonil alfa, que se absorben bien sobre superficies de gel.

#### - Derivados de Celulosa.

Los polímeros de celulosa son polisacáridos de la madera o vegetales y se estabilizan en condiciones alcalinas de la lechada, la retardación en la tubería es el resultado probablemente de la absorción del polímero en la superficie por el cemento hidratado.

El retardador carboximetilhidroxietil celulosa (CMHEC) es efectivo para temperaturas arriba de los 120°C. Frecuentemente es utilizado como agente de control de pérdida de fluido, además ayuda a incrementar la viscosidad de la lechada.

- Organofosfonatos.

Los ácidos fosfónicos alcalinos y sus sales han sido identificados como aditivos retardadores para la cementación de pozos, tienen excelentes estabilizadores hidrolíticos y dependiendo de la firmeza molecular puede circular efectivamente a temperaturas más altas de los 240°C.

Los organofosfonatos son muy sensibles a variaciones en la composición de la lechada de alta densidad y tienden a disminuir la viscosidad de la misma, se conoce muy poco acerca de su mecanismo de acción, pero es probable que se absorban sobre la superficie del cemento hidratado como los demás retardadores.

- Componentes Inorgánicos.

Muchos componentes inorgánicos retardan la hidratación del cemento, algunas clases de ellos son:

- Ácidos y sales Bóricos, Fosfóricos, Hidrofluórico y Crómico.
- Cloruro de calcio concentraciones mayores de 20%.
- Óxidos de Zinc y Plomo.

En las cementaciones de pozos el óxido de zinc es utilizado para retardar cementos lixotrópicos, ya que no afecta la hidratación del aluminato tricálcico. Los efectos de retardación del óxido de zinc son atribuidos a la precipitación del hidróxido de zinc sobre los granos que se transforman en hidroxizincato de calcio cristalino.

El sodio tetraboral o decahidratado se usa comúnmente como retardador auxiliar, tiene la capacidad de extenderse efectivamente en índice de

temperatura de muchos de los retardadores de lignosulfonato a más de 350°C.

### 11.3 ADITIVOS PARA LECHADAS DE ALTA Y BAJA DENSIDAD.

#### Aditivos para Lechadas de Alta Densidad.

Los aditivos para lechadas de alta densidad se usan en formaciones de alta presión, pozos inestables y formaciones plásticas deformables, que son controladas con presiones hidrostáticas altas. Bajo estas condiciones las densidades del lodo se encuentran por arriba de 2.16 gr/cm<sup>3</sup>.

Un método para incrementar la densidad de la lechada, es simplemente reducir la cantidad de agua para la mezcla. Para mantener la bombeabilidad de la lechada se requiere agregar un dispersante, su desventaja es el control de pérdida de fluido, la fuerza de compresión y la adherencia no serán uniformes durante los intervalos cementados. La densidad máxima de la lechada obtenida por este método es precisamente 2.16 gr/cm<sup>3</sup>.

Cuando se requieren lechadas con densidades más altas, se agregan materiales con una gravedad específica alta.

#### Criterios para los materiales de gravedad específica alta:

- La distribución del tamaño de las partículas del material debe ser compatible con el cemento, las partículas asentadas del fluido incrementan la viscosidad de la lechada.
- El agua requerida debe ser una cantidad adecuada para hidratar el cemento.
- El material debe ser inerte con respecto a la hidratación del cemento y compatible con otros aditivos del cemento.
- La gravedad específica en el rango de 4.5 a 5.0 gr/cm<sup>3</sup>.

temperatura de muchos de los retardadores de lignosulfonato a más de 350°C.

### II.3 ADITIVOS PARA LECHADAS DE ALTA Y BAJA DENSIDAD.

#### Aditivos para Lechadas de Alta Densidad.

Los aditivos para lechadas de alta densidad se usan en formaciones de alta presión, pozos inestables y formaciones plásticas deformables, que son controladas con presiones hidrostáticas altas. Bajo estas condiciones las densidades del lodo se encuentran por arriba de 2.16 gr/cm<sup>3</sup>.

Un método para incrementar la densidad de la lechada, es simplemente reducir la cantidad de agua para la mezcla. Para mantener la bombeabilidad de la lechada se requiere agregar un dispersante, su desventaja es el control de pérdida de fluido, la fuerza de compresión y la adherencia no serán uniformes durante los intervalos cementados. La densidad máxima de la lechada obtenida por este método es precisamente 2.16 gr/cm<sup>3</sup>.

Cuando se requieren lechadas con densidades más altas, se agregan materiales con una gravedad específica alta.

#### Criterios para los materiales de gravedad específica alta:

- La distribución del tamaño de las partículas del material debe ser compatible con el cemento, las partículas asentadas del fluido incrementan la viscosidad de la lechada.
- El agua requerida debe ser una cantidad adecuada para hidratar el cemento.
- El material debe ser inerte con respecto a la hidratación del cemento y compatible con otros aditivos del cemento.
- La gravedad específica en el rango de 4.5 a 5.0 gr/cm<sup>3</sup>.

- La resistencia a la compresión no debe reducirse.
- El tiempo bombeable de la lechada debe ser mínimo.
- El tamaño de las partículas debe ser uniforme de un bache a otro.
- No altere los registros tomados en el pozo.

Los agentes que generan peso más comunes para la lechada de cemento son:

- Ilmenita.
- Hematita.
- Barita.
- Arena Ottawa.
- Limadura de Fierro.

**ADITIVOS PARA AUMENTAR LA DENSIDAD.**  
(Cantidad usada por cada saco de cemento)

MATERIAL	kg/se DE CEMENTO
Hematita	2.11 a 55.20
Barita	5.26 a 57.30
Ilmenita	2.70 a 53.00
Arena	2.70 a 65.30
Sal	2.07 a 8.54
Dispersante	0.23 a 0.92

Se describen las propiedades físicas de los aditivos más comunes:

- Ilmenita.

La ilmenita es un material de aspecto negro granulado, tiene una gravedad específica de 4.45 gr/cm<sup>3</sup>, tiene un efecto sobre el tiempo de

espaciamiento de la lechada de cemento y el desarrollo de la fuerza de compresión. El tamaño de las partículas de la ilmenita es bastante granular, es por eso que la viscosidad de la lechada tiene que ser cuidadosamente ajustada para prevenir la sedimentación. Se puede obtener una densidad de lechada de 2.5 gr/cm<sup>3</sup>.

-- Hematita.

La hematita es un agente de peso muy eficiente, con una gravedad específica de 5.02 gr/cm<sup>3</sup>, el material se presenta en granos cristalinos rojos. Para una alta concentración de hematita, se requiere de un dispersante para prevenir el exceso de la viscosidad de la lechada.

Esta se utiliza para preparar lechadas de cemento con densidades arriba de 2.28 gr/cm<sup>3</sup>, se pueden preparar hasta densidades de 2.64 gr/cm<sup>3</sup>.

\* Utilidad.

Es inerte, el efecto a otros aditivos en la mezcla al igual que en el tiempo bombeable y a la compresión.

\* Propiedades.

- Gravedad Específica: 5.02 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: 3% por peso de hematita
- Volumen Absoluto: 0.1995 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 1950 m
- Temperatura: 27 - 260°C
- Concentración: -----

\* Efectos de la hematita sobre las propiedades del cemento.

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| - Densidad                        | Incrementa, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos. |
| - Viscosidad                      | Incrementa, causando menor efecto.                                  |
| - Agua para mezclar               | Incrementa, causando menor efecto.                                  |
| - Tiempo bombeable                | Ningún efecto.  |
| - Resistencia inicial             | Reduce, causando un menor efecto.                                   |
| - Resistencia final               | Reduce, causando un efecto menor.                                   |
| - Pérdida de fluido<br>(Filtrado) | Ningún efecto.  |
| - Durabilidad                     | Ningún efecto.  |
| - Barita.                         |   |

La barita es un material de aspecto blanco pulverizado, es un agente de peso eficiente comparado con la ilmenita y la hematita, tiene una gravedad específica alta de 4.33 gr/cm<sup>3</sup>, se requiere agua adicional para humedecer sus partículas y su efectividad como densificador es disminuida significativamente. El agua disminuye la fuerza de compresión del cemento. Las densidades de la lechada obtenida es de 2.28 gr/cm<sup>3</sup>.

Este mineral ha sido ampliamente usado para densificar una lechada de cemento, requiere cerca de 10 lt de agua por cada 50 kg con lo cual decrece la resistencia a la compresión y se diluyen otros aditivos químicos.

- Arena Ottawa.

Por la dureza que le da al cemento, la arena Ottawa es especialmente eficiente al colocar taponés por circulación para desviar un pozo. El efecto en el tiempo bombeable es mínimo.

\* Propiedades.

- Gravedad Específica:	2.63 gr/cm <sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:	0 %
- Volumen Absoluto:	0.3806 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:	0 - 6100 m
- Temperatura:	27 - 204°C
- Concentración:	37 kg/sc de cemento

\* Efectos de la arena Ottawa sobre las propiedades del cemento.

- Densidad	Incrementa, causando un mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Viscosidad	Ningún efecto.
- Agua para mezclar	Ningún efecto.
- Tiempo bombeable	Ningún efecto.
- Resistencia inicial	Incrementa, causando un menor efecto.
- Resistencia final	Incrementa, causando un menor efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado)	Ningún efecto.

- Durabilidad Incrementa, causando un menor efecto.

- limadura de Fierro.

La limadura de fierro es un producto metalico que tiene un peso específico de  $5.2 \text{ gr/cm}^3$  y la cantidad de agua que requiere es del 3% de su propio peso. Se emplea del 34% al 50% por peso de cemento dependiendo de la cantidad de lechada que se desea obtener.

Otro procedimiento empleado para aumentar la densidad de la lechada es reducir el agua de la mezcla, adicionando un agente reductor de fricción.

#### Aditivos para Lechadas de Baja Densidad.

Los aditivos para lechadas de baja densidad se utilizan cuando la formación no soporta la columna de la lechada debido a su densidad, entonces es necesario reducir la densidad de la misma utilizando aditivos para aligerarla.

Las lechadas de cemento pueden reducir su densidad, agregando aditivos que requieran agua o agregando aditivos con una gravedad específica baja. El método más económico es el de agregar grandes cantidades de agua o emplear los siguientes aditivos:

- Puzolana(Pozomix).
- Bentonita.
- Tierra Diatómacea.
- Ecnolite.
- Perlite.
- Gilsonita.
- Spherulita.

Siendo estos muy efectivos y funcionan con obturantes. Cuando son combinados los aditivos granulares (Gilsonita) con aditivos que requieren altas concentraciones de agua como la bentonita, son más efectivos.

El método más común actualmente para aligerar la presión hidrostática en zonas donde exista pérdida de circulación es atomizando el volumen delantero con nitrógeno y la aplicación de cementos espumosos.

Las características de cada aditivo son:

- Puzolana (Pozomix).

La puzolana es un material sílice o natural o artificial, es compatible con todos los cementos API, puede ser mezclada con agua aumenta su tamaño original.

\* Propiedades.

- Gravedad específica: 2.65 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua: 4.9 lt por cada 2% de bentonita. Por peso de cemento se emplea hasta 2%
- Volumen absoluto: 0.3780 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 3658 m
- Temperatura: 15.5 - 110°C
- Concentración: 0.1% - 12% por el peso del cemento

\* Efectos del puzolana (pozomix) sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.

- Agua para mezclar      Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable      Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia inicial      Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final      Reduce, causando menor efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)      Reduce, causando menor efecto.
- Durabilidad      Reduce, causando menor efecto.

- Bentonita.

La bentonita es una arcilla coloidal que proporciona viscosidad y propiedades lixotrópicas mediante el uso de agua dulce por hinchamiento de sus partículas, que al ser hidratadas aumentan su volumen original. La bentonita origina una disminución en el peso de la mezcla.

La bentonita prehidratada se emplea donde no existe equipo para dosificarla en el cemento. Se puede agregar directamente en el agua antes de ser mezclada con el cemento.

La acción de la bentonita para disminuir la densidad de la lechada de cemento, se obtiene debido a su bajo peso específico y a que su capacidad para hidratarse permite usar mayor volumen de agua para mezclado.

Además de disminuir la densidad, también disminuye el costo de la lechada, sin embargo un alto porcentaje de bentonita causará una reducción en la resistencia a la compresión del cemento y el tiempo de bombeabilidad. También, el alto contenido de agua bajará la resistencia al ataque de los sulfatos e incrementará la permeabilidad del cemento fraguado.

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 3658 m
- Temperatura: 15.5 - 110°C
- Concentración: 0.03% - 4% por el peso de cemento

\* Efectos de la bentonita sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia inicial Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final Reduce, causando menor efecto.
- Pérdida del fluido (Filtrado) Reduce, causando menor efecto.
- Durabilidad Reduce, causando menor efecto.

-- Tierras Diatomáceas.

Esta requiere de altos porcentajes de agua, se pueden usar en cementos de baja densidad y es más expansiva que la bentonita. Cuando se usa en altos porcentajes no incrementa la viscosidad de la lechada.

El diacel D es una tierra especial de diatomáceas que aumenta el rendimiento de las lechadas reduce la densidad de la mezcla, tiene las siguientes características:

\* Propiedades.

- Gravedad específica: 2.10 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua: 12.5 - 28 lt por cada 10% de diacel D agregado al cemento
- Volumen absoluto: 0.4774 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 4270 m
- Temperatura: 27 - 143°C
- Concentración: 10% - 40% por peso de cemento

\* Efectos del diacel D sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Viscosidad Ningún efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final Reduce, causando menor efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Ningún efecto.

- Durabilidad Ningún efecto.

- Ecnolite.

En el caso del ecnolite el requerimiento de agua es alto aumentando por ello el volumen de la lechada.

\* Propiedades.

- Gravedad específica: 2.4 gr/cm<sup>3</sup>  
- Requerimiento de agua: Variable según la concentración  
- Volumen absoluto: 0.4168 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 2438 m  
- Temperatura: 27 - 93°C  
- Concentración: 1% - 3% por peso de cemento.  
En función de densidad de la lechada de 1.2 - 1.7 lt/kg

\* Efectos del ecnolite sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.  
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.  
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.  
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.  
- Resistencia inicial Reduce, causando menor efecto.

- Resistencia final                      Reduce, causando menor efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)                              Ningún efecto.
- Durabilidad                              Reduce causando efecto menor.
- Gilsonita.

La gilsonita es un hidrocarburo sólido que se presenta en forma natural, este se extrae y después se criba. En la lechada de cemento actúa como aditivo de peso ligero y como un agente de pérdida de circulación.

\* Utilidad.

- La gilsonita aumenta el rendimiento de la lechada
- Es un buen agente obturante en casos de pérdidas de circulación.

\* Propiedades.

- Gravedad específica:                      1.07 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua:                      0.334 lt/kg
- Volumen absoluto:                              0.9364 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:                                      0 - 3660 m
- Temperatura:                                      16 - 110°C
- Concentración:                                      5% - 58.5% por saco de cemento

\* Efectos de la gilsonita sobre las propiedades del cemento.

- Densidad    Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.

- Viscosidad                      Ningún efecto.
  - Agua para mezclar            Incrementa, causando menor efecto.
  - Tiempo bombeable            Ningún efecto.
  - Resistencia inicial            Reduce, causando menor efecto.
  - Resistencia final              Ningún efecto.
  - Pérdida de fluido  
    (Filtrado)                    Ningún efecto.
  - Durabilidad                    Ningún efecto.
- Spherelite.

El uso de spherelite en general resulta una relación de cemento y bajo volumen de agua, ayudando a obtener una mejor resistencia a la compresión inicial, además de generar una alta resistencia a la compresión final en comparación con otros cementos ligeros.

\* propiedades.

- Gravedad específica:            0.685 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua:        95% por peso de spherelite
- Volumen absoluto:                Depende de la presión hidráulica  
    aplicada

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:                    0 - 2440 m
- Temperatura:                    41 - 428°C
- Concentración:                  4.54 - 95.34 kg/sc de cemento

\* Efectos del spherelite sobre las propiedades del cemento.

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| - Densidad                     | Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos. |
| - Viscosidad                   | Incrementa, causando menor efecto.                           |
| - Agua para mezclar            | Incrementa, causando menor efecto.                           |
| - Tiempo bombeable             | Incrementa, causando menor efecto.                           |
| - Resistencia inicial          | Reduce, causando menor efecto.                               |
| - Resistencia final            | Reduce, causando menor efecto.                               |
| - Pérdida de fluido (Filtrado) | Incrementa, causando menor efecto.                           |
| - Durabilidad                  | Ningún efecto.   |

Expandidores.

Los expandidores son aditivos que dilatan el producto hidratado, sin que esto sea originado por efecto de temperatura, los mas comunes son:

- Cloruro de Sodio.
- Cloruro de Potasio.
- Arcillas.
- Silicato de Sodio.

Los expandidores tienen las siguientes características:

- Cloruro de Sodio.

El cloruro de sodio (sal de mesa común), es un catalizador efectivo para cemento puro en concentraciones de 1.5% a 5% por peso de cemento, de

2% a 3.5% da un máximo de catalización, excepto cuando se emplean lechadas de mayor porcentaje de agua.

Su máxima dilatación es obtenida con el 18% del peso de agua, a concentraciones mayores se contrae el cemento fraguado.

- Cloruro de Potasio.

Este producto además de ser un eficiente estabilizador de arcillas, al 5% por peso de agua de mezcla, exhibe la misma dilatación que el 18% del cloruro de sodio en el cemento.

Otra característica del cloruro de potasio, es que el 2% por peso de agua hace que el filtrado de las lechadas que lo contienen sea compatible con la mayoría de los aceites, reduciendo considerablemente la tensión interfacial, evitando la formación de emulsiones estables y el hinchamiento de las arcillas de la formación.

Todas las expansiones de cemento obtenidas con cloruro de potasio y con cloruro de sodio son controladas y nunca pasan de lineales a geométricas, es decir no se presentan agrietamientos en el cuerpo del cemento.

- Arcillas.

Es el material compuesto de uno o más minerales arcillosos. El expandidor de arcilla más común es la bentonita, conocida como "gel" que contiene menos del 85% de smectita (también llamada montmorillonita), la cual está compuesta por láminas lisas de silicato tetrahedra aplastando una lámina lisa de alumina octahedra.

La bentonita tiene una propiedad única para expandirse varias veces a su volumen original cuando es saturada con agua resultando una alta viscosidad de fluido, esta se agrega a la mezcla en concentraciones arriba del 6%, los expandidores son necesarios para reducir la viscosidad de la mezcla y la resistencia del gel.

La hidratación completa de la bentonita sucede en 30 minutos, el tiempo de fraguado de la lechada de cemento con la bentonita prehidratada es generalmente el mismo que el de la lechada preparada con bentonita seca de la misma densidad.

La bentonita puede ser prehidratada en agua de mar o en una salmuera ligera, ya que la sal impide la hidratación y reduce el volumen de la lechada. La bentonita no es un expandidor efectivo en lechadas de cemento altamente salinas, en tales circunstancias se emplea atapulguita.

- Silicato de sodio.

Los expandidores de silicatos reaccionan con cal en el cemento o con clorato de calcio para formar un gel de silicato de calcio, la estructura del gel da viscosidad suficiente que permite usarse en grandes cantidades.

El silicato de sodio se usa con más frecuencia como expandidor y se puede conseguir en forma sólida o líquida.

Sus ventajas son:

- La eficiencia.
- Su facilidad para ser almacenado y manejado.
- Tiende a reducir la efectividad de otros aditivos en especial la de los retardadores y los agentes de pérdida de fluido.

El silicato de sodio y metasilicato de sodio, normalmente se mezclan en seco con el cemento, si se agregan antes de mezclar el agua a la lechada preparada no se puede formar un gel, a menos que se agregue cloruro de calcio. La concentración recomendable de metasilicato de sodio es del 0.2% a 3% y una densidad de la lechada que va desde 1.75 a 1.35 gr/cm<sup>3</sup>.

El silicato de sodio líquido, llamado cristal de agua se agrega antes de mezclar el agua a la lechada. Si el cloruro de calcio está incluido en la mezcla, se tiene que agregar el agua antes de adicionar el silicato de sodio para obtener las propiedades adecuadas. Otros materiales se pueden añadir

en cualquier momento, el índice normal de concentración es de 0.76 a 2.25 l/se de cemento.

Los efectos provocados por estos expandidores son:

- Reductores de la densidad de la mezcla.

La reducción de la densidad de la mezcla trae consigo la disminución de la presión hidrostática de la lechada de cemento durante la cementación, ayudando a prevenir la pérdida de circulación inducida a causa del debilitamiento de formaciones, también puede reducir el número de etapas que se requiere para cementar un pozo.

Los expandidores reducen la cantidad de cemento que se necesita para dar volumen a una lechada de cemento, resultando muy económico, dependiendo del mecanismo de acción se divide en varias categorías, con frecuencia más de una clase de expandidores se usan de la misma mezcla.

- Expandidores de agua.

Las arcillas y varios agentes viscosificantes del agua permiten el exceso de la misma para lograr la dispersión de la mezcla, manteniéndola homogénea, previniendo el exceso de agua. La densidad de la mezcla disminuye cuando se presentan cantidades significativas de expandidores.

- Expandidores gaseosos.

El nitrógeno o el aire se emplean en la preparación de cementos espumosos con densidades bajas y una fuerza compresiva eficiente.

Recomendaciones API:

-- Se agrega el 5.3% de agua adicional por cada 1% de bentonita para todas las clases de cemento API.

- La permeabilidad del cemento se incrementa con la concentración de bentonita siendo menos resistentes para aguas sulfatadas y fluidos corrosivos e improvisa el control de pérdida de fluidos. La bentonita es un expandidor efectivo para altas temperaturas.

- La presencia de altas concentraciones de iones de calcio en la fase acuosa de la lechada, inhibe la hidratación de la bentonita. Las propiedades pueden aumentar considerablemente si el material cede a la hidratación completamente.

- Una lechada debe contener el 2% de bentonita prehidratada que equivale al 8% de mezcla seca de bentonita.

## II.4 REDUCTORES DE FRICCIÓN.

Los reductores de fricción son productos que con bajo gasto de bombeo ayudan en el régimen turbulento a reducir la fricción entre granos en las paredes de la tubería y de la formación, para obtener mejores resultados en la cementación.

Los reductores de fricción, actúan como dispersantes en las lechadas de cemento para reducir la viscosidad aparente de la lechada. De acuerdo a los estudios realizados por los laboratorios de investigación de varios países, se ha llegado a la conclusión de que la mayor eficiencia en limpieza del todo del espacio anular se logra en régimen turbulento, es decir cuando la lechada de cemento y los volúmenes de limpieza se desplazan a una velocidad que corresponde a un Número de Reynolds de 3000 a 4000, en función de sus características reológicas.

Los aditivos que se usan como dispersantes en la lechada de cemento son:

- 1) CFR-1.
- 2) CFR-2.
- 3) Halad-9 (en cementos con gel).

Los reductores de fricción tiene las siguientes características:

1) CFR-1.

El reductor patentado como CFR-1, alcanza buenas propiedades de flujo para lechadas ligeras o pesadas sin causar separación de agua libre, cuando se utiliza el agua recomendada en la operación. Este producto se disuelve fácilmente y se puede agregar directamente en el agua que se va a emplear para la mezcla.

\* Propiedades.

- Gravedad Específica: 1.63 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: 0 %
- Volumen Absoluto: 0.6142 l/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: Variada
- Temperatura: 93 - 260°C
- Concentración: 0.05% - 0.3% Por peso de cemento

\* Efectos del CFR-1 sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando un menor efecto.
- Viscosidad Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Agua para mezclar Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Resistencia inicial Reduce, causando un menor efecto.



\* Efectos del CFR-2 sobre las propiedades del cemento.

- Densidad                      Reduce, causando un menor efecto.
- Viscosidad                    Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Agua para mezclar        Reduce, causando un efecto menor.
- Tiempo bombeable        Reduce, causando un efecto menor.
- Resistencia inicial        Incrementa, causando un menor efecto.
- Resistencia final        Ningún efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)                Reduce, causando un menor efecto.
- Durabilidad                Incrementa, causando un menor efecto.

3) Halad-9 (en cemento con gel).

El reductor Halad 9, patentado como tal para cementos con gel, permite flujos turbulentos con gastos bajos en las lechadas que contienen el 6% o más de bentonita.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica:        1.22 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:    0 % En concentraciones de 0.5%  
   1.51 - 1.89 lt/sc de cemento. En con-  
   centraciones mayores  
   de 0.5%
- Volumen Absoluto:        0.8212 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 4270 m
- Temperatura: 27 - 97°C
- Concentración: 0.5% - 1.5% Por peso de agua

\* Efectos del halad-9 (en cementos con gel) sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Resistencia final Incrementa, causando menor efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Durabilidad Ningún efecto.

## II.5 ADITIVOS DE PERDIDA DE CIRCULACION.

Los aditivos de pérdida de circulación son:

- Fibrosos.
- Granular.

- Laminados.
- Formulación de Fraguado Rápido.
- Cementos de Fraguado Rápido.
- Cementos Tixotrópicos.
- Aditivos Ligeros

Las características de los aditivos reductores de pérdida de circulación son las siguientes:

- Fibrosos.

Las fibras forman una malla en la superficie de la formación con alta permeabilidad o formaciones regulares, forman tapones cuando penetran a la formación en canales y fracturas.

- Granular.

Los granos de malla grande se aplican cuando existen fracturas, canales o áreas donde se originan irregularidades formando tapones debido al efecto de concentración que se crea cuando el lodo o lechada se pierde como filtrado.

- Laminados.

Estos materiales son empleados para sellar o resellar fracturas angostas y como aditivos para controlar las pérdidas de filtrado.

- Formulación de Fraguado Rápido.

Estas formulaciones son lechadas delgadas o fluidos que forman materiales semisólidos cuando se mezclan con agua o fluido de perforación base agua. Normalmente la mezcla se lleva a cabo dentro del pozo en la vecindad del agujero o dentro de la zona de pérdida de circulación.

- Cementos de Fraguado Rápido.

Estas son lechadas de cemento con tiempos de fraguado muy cortos. Estando todavía la lechada no muy viscosa, es bombeada a la vecindad de la zona de pérdida de circulación. Estos se fraguan durante el desplazamiento o inmediatamente después de entrar a la zona de pérdida de circulación.

- Cementos Tixotrópicos.

Las lechadas de cemento tixotrópico son formuladas especialmente para que tengan una viscosidad baja cuando se están mezclando y desplazando. Sin embargo, la viscosidad de la lechada se incrementa gradualmente cuando el gasto de desplazamiento es bajo.

- Aditivos Ligeros.

La función principal de los aditivos ligeros, es bajar la densidad de la lechada y así reducir la presión hidrostática en el pozo. La reducción de la densidad es generalmente por el requerimiento de agua, gravedad específica baja o una combinación de ambas.

Los aditivos ligeros son:

- 1) Gilsonita.
- 2) Perlita Regular.
- 3) Perlita-Seis.
- 4) Tuf-Plug.
- 5) Flocele.
- 6) Bengum.

Estos tienen las siguientes características:

1) Gilsonita.

La gilsonita es un buen agente obturante y produce un cemento que resiste el fracturamiento cuando se dispara. No afecta significativamente el tiempo de fraguado del cemento.

\* Propiedades.

- Gravedad Especifica:	1.07 gr/cm <sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:	0.33 lt/kg
- Volumen Absoluto:	0.94 lt/kg

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad:	Variada
- Temperatura:	16 - 135°C
- Concentración:	5.7 - 13.22 kg

\* Efectos de la gilsonita sobre las propiedades del cemento.

- Densidad	Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Viscosidad	Ningún efecto
- Agua para mezclar	Incrementa, causando un menor efecto.
- Tiempo bombeable	Ningún efecto
- Resistencia inicial	Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia final	Reduce, causando un menor efecto.

- Pérdida de fluido (Filtrado) Ningún efecto.
- Durabilidad Ningún efecto.

## 2) Perlita Regular.

La perlita regular es un obturante para formaciones porosas y fracturadas.

### \* Propiedades.

- Gravedad Específica: 2.20 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua: 4.17 lt/kg
- Volumen Absoluto: 1.49 lt/kg a presión atmosférica y  
0.46 lt/kg a una presión de 3000 psi

### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad: Variada
- Temperatura: 15.6 - 127°C
- Concentración: 0.14% - 0.50% por sc de cemento  
0.34% en pozos de inyección de vapor

### \* Efectos de la perlita regular sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Viscosidad Ningún efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando un menor efecto.

- Resistencia inicial      Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia final      Reduce, causando un menor efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)              Ningún efecto.
- Durabilidad              Reduce, causando un menor efecto.

### 3) Perlita-Seis.

El aditivo para pérdida de circulación conocido como perlita-seis es una mezcla de perlita regular y pozmix A.

#### \* Utilidad.

Se utiliza como agente obturante en formaciones porosas y fracturadas.

#### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad:              Variada
- Temperatura:              16 - 127°C
- Concentración:              0.14% - 0.50% por sc de cemento  
   0.34% en pozos de inyección de vapor

#### \* Efectos de la perlita-seis regular sobre las propiedades del cemento.

- Densidad                      Reduce, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.
- Viscosidad                    Ningún efecto.
- Agua para mezclar          Incrementa, causando un efecto mayor o uso principal para aditivos.

- Tiempo bombeable      Ningún efecto.
- Resistencia inicial      Reduce, causando un menor efecto.
- Resistencia final      Reduce, causando un menor efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)      Ningún efecto.
- Durabilidad      Reduce, causando un menor efecto.

#### 4) Tuf-Plug.

La patente tuf-plug es un material fuerte y no poroso, que es muy efectivo para sellar formaciones no consolidadas y fracturadas. Es químicamente inerte y no afecta el fraguado del cemento.

#### \* Propiedades.

- Gravedad Específica:      1.28 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:      0 %
- Volumen Absoluto:      0.783 lt/kg

#### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad:      Variada
- Temperatura:      16 - 143°C
- Concentración:      0.45% - 2.7% por sc de cemento

#### \* Efectos de tuf-plug sobre las propiedades del cemento.

- Densidad      Incrementa, causando un menor efecto.
- Viscosidad      Ningún efecto.

- Agua para mezclar      Ningún efecto.
- Tiempo bombeable      Ningún efecto.
- Resistencia inicial      Ningún efecto.
- Resistencia final      Ningún efecto.
- Pérdida de fluido  
    (Filtrado)      Ningún efecto.
- Durabilidad      Ningún efecto.

#### 5) Flocele.

Las escamas de flocele retienen su resistencia aún estando mojadas. Tienen un área superficial grande. En cantidades pequeñas, este aditivo en la lechada es suficiente para un excelente sellado de los poros de la formación.

#### \* Propiedades.

- Gravedad Especifica:      1.42 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de Agua:      0 %
- Volumen Absoluto:      -----

#### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad:      Variada
- Temperatura:      15.6 - 127°C
- Concentración:      0.57 - 6.2 kg/sc

#### \* Efectos del flocele sobre las propiedades del cemento.

- Densidad      Ningún efecto.

- Viscosidad	Incrementa, causando minimo efecto.
- Agua para mezclar	Ningún efecto.
- Tiempo bombeable	Ningún efecto.
- Resistencia inicial	Ningún efecto.
- Resistencia final	Ningún efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado)	Ningún efecto.
- Durabilidad	Ningún efecto.

## II.6 DISPERSANTES.

Los dispersantes son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua. El contenido de sólidos puede ser tan alto como el 70%.

La reología de las suspensiones es retardada para el soporte de líquido reológico, la fracción del volumen del sólido es igual al volumen de partículas entre el volumen total.

En una lechada, el fluido intersticial es una solución acuosa de muchas especies iónicas y aditivos orgánicos, es por eso que la reología puede diferir gradualmente a la del agua.

El contenido de sólidos de la lechada es una función directa de la lechada. La interacción de la partícula depende primeramente de la distribución de la carga en la superficie.

Ionización de la superficie de partículas de cemento en un medio acuoso.

Los iones de calcio libres, reaccionan con soluciones de grupos de cargas negativas en la superficie de los granos, una porción de granos de cemento puede ser carga dos positivamente debido a la absorción de calcio, otra

parte se carga negativamente, como resultado ocurre una interacción entre partes opuestamente cargadas.

Los granos de cemento pueden ser cubiertos uniformemente por cargas positivas encabezados por dispersión espontánea.

Viscosidad plástica de la lechada y el mecanismo de dispersión.

Cuando el cemento pulverizado y el agua se mezclan, se forma una estructura de lechada con un esfuerzo cortante, el valor obtenido es resultado de la interacción electrostática entre partículas, una presión baja de esfuerzo cortante da como resultado una lechada sólida.

Los esfuerzos cortantes altos en un pozo, en el Modelo de Bingham son definidos como viscosidad plástica.

La viscosidad aparente, el esfuerzo cortante y su índice de esfuerzo cortante no son constantes.

Una vez que el valor del esfuerzo cortante se ha excedido, llega a ser una unidad singular, después los agregados se desintegran y las partículas originan movimientos entre unas y otras. Este agregado contiene atrapada agua intersticial, como resultado, el volumen efectivo de las fases dispersantes es más grande que el de los granos del cemento.

El volumen de la fase dispersante es el factor clave que determina la reología de la dispersión.

## 11.7 REDUCTORES DE FILTRADO.

Los reductores de filtrado, son productos derivados de celulosa y se dosifican del 0.5% al 1.5% por peso de cemento. Se utilizan para colocar el cemento en el lugar deseado, sin que este sufra de deshidratación al pasar por zonas permeables.

El control del filtrado es un factor muy importante en la cementación de tuberías de revestimiento y en las cementaciones forzadas.

El éxito de una operación depende de la lechada de cemento y de la cantidad de aditivo para controlar el filtrado que sea agregado o si el pozo es de gas o de aceite. Se debe tener un control de la pérdida de filtrado estipulado por la API, variando de acuerdo al tipo de operación:

- Cementación de T.R	200 - 300 cm <sup>3</sup>
- Cementación de Liners (tubería corta)	100 - 150 cm <sup>3</sup>
- Cementación Forzada	50 - 100 cm <sup>3</sup>

La pérdida de agua se mide en cm<sup>3</sup> por cada 30 min. bajo una presión diferencial de 1000 psi.

Cuando un aditivo provoca un gran retardamiento, puede incrementar el tiempo de la pérdida del filtrado, pero si existe hidratación el tiempo de la pérdida del filtrado disminuye.

Los reductores de filtrado son:

- 1) Halad-4.
- 2) Halad-9.
- 3) Halad-14.
- 4) Halad-22A.
- 5) Látex.

Las características de cada uno son las siguientes:

- 1) Halad-4.

El halad-4, es un reductor compatible con todos los cementos API y cementos puzolánicos, en el control del filtrado es excelente con cementos ligeros.

No retarda el tiempo bombeable del cemento y tiende a acelerar un poco el fraguado del cemento.

\* Propiedades.

- Gravedad específica: 1.37 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua: 0
- Volumen absoluto: 1.9 lt/kg a concentraciones menores de 0.5%  
1.7 lt/kg a concentraciones mayores de 0.5%

\* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 4270 m
- Temperatura: 27 - 97°C
- Concentración: 0.4% - 1.5% por peso de cemento

\* Efectos del halad-4 sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final Incrementa, causando menor efecto.
- Pérdida de fluido (Filtrado) Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Durabilidad Ningún efecto.

## 2) Halad-9

El halad-9, utilizado como reductor es compatible con todos los cementos API y cementos puzolánicos. Mejora las propiedades de flujo en los cementos que contienen más del 4% de bentonita, es compatible con retardadores y aceleradores.

### \* Propiedades.

- Gravedad específica: 1.22 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua: 0 % a concentraciones menores de 0.5%  
1.7 - 1.9 lt/kg a concentraciones mayores de 0.5%
- Volumen absoluto: -----

### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad: 0 - 4270 m
- Temperatura: 27 - 97°C
- Concentración: 0.4% - 1.5% por peso de cemento

### \* Efectos del halad-9 sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa, causando mínimo efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando mínimo efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final Incrementa, causando menor efecto.

- Pérdida de fluido (Filtrado)      Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Durabilidad      Ningún efecto.

### 3) Halad - 14.

El reductor halad-14, funciona como controlador de filtrado a altas temperaturas, resulta más eficiente al mejorar las propiedades de flujo.

#### \* Propiedades.

- Gravedad específica:      1.31 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua:      0 %
- Volumen absoluto:      0.7644 lt/kg

#### \* Rangos normales de uso.

- Profundidad:      1829 - 4877 m
- Temperatura:      76 - 160°C
- Concentración:      1.0% - 2.0% por peso de cemento

#### \* Efectos del halad-14 sobre las propiedades del cemento.

- Densidad      Ningún efecto
- Viscosidad      Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar      Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable      Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial      Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final      Ningún efecto.

- Pérdida del fluido (Filtrado) Reduce, causando mayor efecto o uso principal para aditivos.
- Durabilidad Ningún efecto.

#### 4) HALAD-22A.

El reductor de patente halad-22A, es un agente para el control de filtrado en las lechadas del cemento, es efectivo a altas temperaturas.

##### \* Propiedades.

- Gravedad específica: 1.43 gr/cm<sup>3</sup>
- Requerimiento de agua: 1.77 - 2.32 lt/sc
- Volumen absoluto: 0.8212 lt/kg

##### \* Rangos normales de uso,

- Profundidad: 1220 - 6100 m
- Temperatura: 80 - 182°C
- Concentración: 0.4% - 2.5% por peso de cemento.  
A baja temperatura la concentración requerida es menor

##### \* Efectos del halad-22A sobre las propiedades del cemento.

- Densidad Ningún efecto.
- Viscosidad Incrementa, causando menor efecto.
- Agua para mezclar Incrementa, causando menor efecto.
- Tiempo bombeable Incrementa, causando menor efecto.



- Tiempo bombeable      Incrementa, causando menor efecto.
- Resistencia inicial      Reduce, causando menor efecto.
- Resistencia final      Ningún efecto.
- Pérdida del fluido  
  (Filtrado)      Reduce, causando mayor efecto o uso principal  
  para aditivos.
- Durabilidad      Incrementa, causando mayor efecto o uso  
  principal para aditivos.

En las tablas 2.1 y 2.2 se concentra información acerca de los aditivos utilizados en las lechadas de cemento.

TABLA DE ADITIVOS			
TIPO DE ADITIVO	COMPOSICION QUIMICA	BENEFICIO	TIPO DE CEMENTO
ACELERADORES DE FRAGUADO	Cloruro de calcio. Cloruro de sodio. Yeso.	Acelerar fraguado. Obtener alta resistencia inicial.	Todos los API.
RETARDADORES DE FRAGUADO	Lignosulfatos ácidos. orgánicos y modificados.	Incrementar el tiempo de bombeo, mejorando las propiedades de flujo.	Clases D, E, G G y II.
DENSIFICADOS	Hematita. Ilmenita. Barita.	Aumentar la densidad.	Clases D, E, G G y II.
REDUCTORES DE DENSIDAD	Bentonita-Atapulgita. Gilsonita. Perlita. Nitrógeno.	Disminuye la densidad.	Todos los API.
REDUCTORES DE FILTRADO	Gilsonita. Cáscara de nuez. Papel celofán. Fibras de nylon.	Puentear fractura. Evitar pérdidas de circulación.	Todos los API.
REDUCTORES DE FRICCIÓN	Polimeros. Dispersantes.	Menor volumen de cemento.	Todos los API.

TABLA 2.1

EFECTOS DE LOS ADITIVOS DEL LODO EN EL CEMENTO		
ADITIVO	PROPOSITO	EFEECTO EN EL CEMENTO
SULFATO DE BARIO	Para densificar el lodo.	Aumenta la densidad y reduce la resistencia.
CAUSTICAS	Para ajustar el pH.	Acelerador.
COMPUESTOS DE CALCIO	Para acondicionar el pozo y controlar el pH.	Acelera el fraguado.
HIDROCARBUROS (petróleo, diesel y crudo alquilado)	Para controlar la pérdida del fluido y para lubricar el pozo.	Baja densidad.
SELLADORES (celulosa, hule, etc)	Para control de pérdida de circulación.	Retarda el fraguado.
ADELGAZADORES (taninos, lignosulfonatos, quebracho, revestimientos, etc)	Para dispersar los sólidos del lodo.	Retarda el fraguado.
EMULSIFICANTES (lignosulfonatos, alquileno, sulfonato de hidrocarburo)	Para formar lodos de aceite en agua o agua en aceite.	Retarda el fraguado.
BACTERICIDAS (fenoles sustituidos, formaldehidos, etc)	Para proteger los aditivos orgánicos contra la descomposición.	Retarda el fraguado.
ADITIVOS DE PÉRDIDA DE CONTROL DEL FLUIDO (cmc, almidón, guar, poliacrilamidos, lignosulfonatos)	Para reducir la pérdida de filtrado, del lodo a la formación.	Retarda el fraguado.

TABLA 2.2



## CAPITULO III

# TRABAJOS EN LOS QUE SE EMPLEA EL CEMENTO

El objetivo en este capítulo, es presentar la aplicación que se le da a la lechada de cemento en cada una de las operaciones de cementación mencionadas en esta sección.

La cementación de pozos es el proceso que consiste en mezclar y desplazar una lechada de cemento hacia el fondo del pozo a través de la tubería de revestimiento (T.R.) y luego hacia el espacio anular (E.A.) en donde fraguará dando así una adherencia de la tubería a la formación. En general las cementaciones pueden clasificarse en tres tipos:

1- Primaria: Las cementaciones primarias se ejecutan inmediatamente después de que se ha corrido una tubería de revestimiento y dentro de sus objetivos se tienen:

- Adherir a la tubería con la formación.
- Aislar horizontes productores.
- Aislar zonas de alta presión.
- Aislar zonas de pérdida de circulación.

2- Forzada (secundaria): Las cementaciones forzadas pueden describirse como el proceso de forzar a presión una lechada de cemento a través de las perforaciones de la T.R. o hacia el espacio anular. Estas cementaciones se utilizan para:

- Remediar una mala cementación primaria.
- Abandonar zonas productoras agotadas.
- Tapar roturas en la T.R.
- Reducir la relación agua-gas o agua-aceite.

3- Tapones de cemento: La colocación de tapones de cemento se realiza para:

- Aislar parte del agujero perforado.
- Desviar el pozo.
- Tratar de sellar zonas de pérdida de circulación.
- Abandonar el pozo.

En el apéndice A, se identifican y seleccionan adecuadamente las herramientas que se utilizan en las diferentes operaciones de cementación, ya que juegan un papel de suma importancia para el éxito de éstas. En el apéndice B, se mencionan dos nuevas técnicas de recementación aplicadas ya en México.

### III.1 CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

Entre las operaciones que se realizan para llevar a cabo una terminación eficiente, la cementación primaria ocupa un lugar sumamente importante, ya que es una técnica que consiste en colocar lechadas de cemento en el espacio que queda entre la tubería de revestimiento (T.R. o tubería de ademe) y el agujero, dicho espacio se le conoce como espacio anular.

El cemento fragua formando un sello hidráulico en las paredes del pozo, previniendo la migración de fluidos de formación por el espacio anular. La cementación primaria es por lo tanto una de las etapas más críticas durante la perforación y terminación de un pozo, ya que dicho procedimiento debe ser cuidadosamente planeado y ejecutado para lograr una operación exitosa.

El cemento además de proporcionar un aislamiento adecuado a la formación, deberá también soportar las sartas de tuberías de revestimiento y protegerlas contra la corrosión del fluido de perforación.

En principio, las técnicas de cementación primaria son las mismas sin importar los fines y el tamaño de la sarta de tubería, las lechadas de cemento son bombeadas al fondo del pozo dentro de la tubería a ser cementada, con salida en la parte inferior de la misma, desplazando el fluido de control por el espacio anular.

Se necesita una serie de sartas de tuberías de revestimiento para terminar un pozo petrolero y que éste quede en óptimas condiciones de producción.

Aditivos en la lechada de cemento.

La función de los aditivos en la lechada de cemento es adecuar las propiedades de esta, para realizar una óptima cementación.

Los aditivos permiten:

- Variar la densidad de la lechada.
- Incrementar o disminuir su resistencia a la compresión.
- Acelerar o retardar el tiempo de fraguado.
- Controlar la pérdida de agua durante el fraguado.
- Reducir o aumentar la viscosidad de la lechada.

En el capítulo anterior se mencionan los diferentes tipos de aditivos, sus características y las concentraciones en que deben ser utilizados.

Mecanismos de desplazamiento en una cementación primaria.

Primeramente veremos cuál es el tipo de flujo de fluido en que se convierte la lechada de cemento, los cuales son:

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

Las características de estos son:

- Fluidos Newtonianos.

Estos fluidos se comportan de acuerdo a la ley de viscosidad de Newton, dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \mu (dv / dy) \text{ ----- (1)}$$

Donde:

- $\tau$  = Esfuerzo cortante ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ )
- $\mu$  = Viscosidad del fluido ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )
- $dv/dy$  = Cambio de la velocidad con respecto a la distancia ( $\text{m}/\text{s}/\text{m}$ )

Dichos fluidos se caracterizan por tener un comportamiento lineal, a este grupo pertenece el agua.

## -- Fluidos No Newtonianos.

Los fluidos no Newtonianos son más complejos, a este tipo de fluidos corresponde el lodo o fluido de control para la perforación y las lechadas de cemento.

Se ha demostrado experimentalmente que los modelos más adecuados para predecir las propiedades de flujo de estos fluidos, son el modelo plástico de Bingham y el modelo de la Ley de las Potencias. Los fluidos que se comportan de acuerdo con el modelo plástico de Bingham, puede presentar resistencias para fluir (resistencia del gel) cuando se aplica una presión. Los fluidos con resistencia del gel pueden fluir a muy bajo gasto en forma de tapón.

Los fluidos en el modelo plástico de Bingham pueden tener tres tipos de regimenes de flujo: Tapón, laminar y turbulento, con zonas de transición entre cada una. En la figura 3-1 se muestra el perfil de velocidad de régimen de flujo del modelo plástico de Bingham.

### Flujo de tapón.

En este flujo las partículas viajan a la misma velocidad y es lo que le da un comportamiento de tapón.

### Flujo laminar.

En este flujo la partícula se mueve hacia adelante en línea recta y la velocidad en la pared es cero, la velocidad en cualquier punto alejado de la pared es proporcional al promedio del gasto e inversamente proporcional a la viscosidad.

### Flujo turbulento.

En este flujo las partículas no se mueven en línea recta, en general todas las partículas se desplazan en diferentes direcciones con la misma velocidad, tanto en el centro del flujo como en las paredes.

### PERFIL DE VELOCIDAD DE REGIMEN DE FLUJO

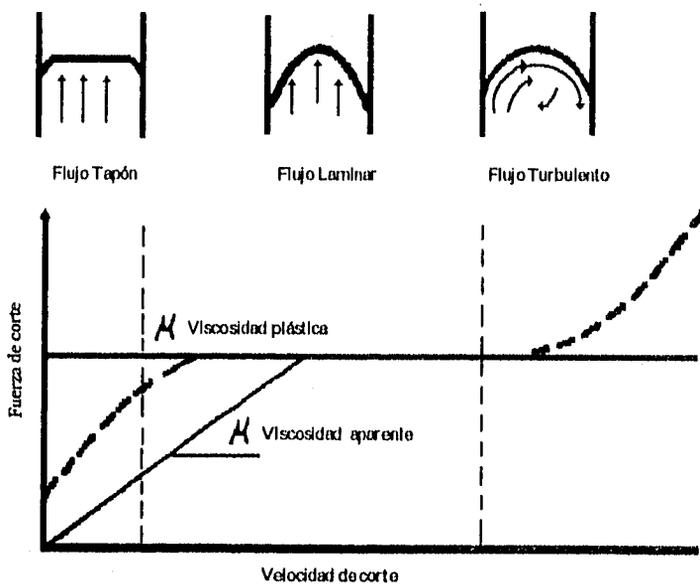


FIGURA 3-1 MODELO PLASTICO DE BINGHAM

- Fuerza de arrastre y remoción del enjarre.

En fluidos no Newtonianos es posible el flujo turbulento, cuando se cumplen ciertas condiciones como son:

- a) A medida que se incrementa el flujo, la fuerza de arrastre se incrementa.
- b) A medida que la viscosidad decrece, el área afectada por el flujo y la fuerza de arrastre incrementan.
- c) Cuando la tubería está sin movimiento decrece el desplazamiento del lodo por la lechada de cemento. En este caso debe evitarse el estancamiento del lodo en el espacio anular aumentando el gasto.
- d) Cuando la viscosidad y la fuerza del gel del lodo aumentan, el gasto de desplazamiento necesita incrementarse, para evitar estancamientos.

-- Como mejorar la cementación primaria.

Las principales condiciones que debe cumplir una cementación primaria son:

- a) Acondicionar el lodo de perforación, antes de introducir la tubería de revestimiento (T.R. o tubería de ademe).
- b) Centrar la tubería de revestimiento dentro del pozo, mediante los accesorios que hay para estos casos.
- c) Mover la tubería de revestimiento durante la última circulación, así como el desplazamiento de la lechada de cemento al espacio anular.
- d) Controlar el gasto de desplazamiento y la reología de la lechada, según el diseño de la cementación.

## Clasificación de las tuberías de revestimiento (T.R. o tubería de ademe).

Cada columna de tubería de revestimiento y su cementación tiene un propósito distinto.

Las tuberías de revestimiento más comunes son:

- Tubería conductora.
- Tubería superficial.
- Tubería intermedia.
- Tubería de producción.
- Tubería corta o liner.

La siguiente información da un resumen de la finalidad de las columnas de tuberías de revestimiento más comunes.

- Tubería conductora.

Esta es una tubería de revestimiento especial que se usa solamente en ciertas regiones para empezar el pozo, en una dirección vertical y para evitar derrumbes en zonas donde exista exceso de material de superficie o agua. El cemento debe hacerse circular al asentarse la tubería conductora, aunque este procedimiento no se sigue siempre, también se usa cuando hay posibilidades de encontrar arenas poco profundas, de modo que se puede tener suficiente equipo instalado en el pozo y evitar "reventones" al perforar.

- Tubería superficial.

Además de evitar la contaminación del agua dulce, la tubería de revestimiento de superficie sirve como ancla para el equipo preventivo de "reventones" durante la perforación del pozo y para el cabezal de la tubería de revestimiento cuando el pozo ya está en producción. La tubería superficial evita los derrumbes del pozo, y en ciertas regiones donde hay depósitos minerales comerciales, sirve para protegerlos cuando se perfora a través de ellos, el factor más importante en el uso de la tubería de superficie durante la perforación a través de depósitos minerales, es el de

tener seguridad adicional para evitar la migración de fluidos de las formaciones productoras de aceite y gas hacia estos depósitos.

El cemento que rodea la tubería superficial no sólo protege las fuentes de abastecimiento de agua dulce, evitando su contaminación por la migración de fluidos, sino que también protege la tubería de superficie contra la corrosión exterior.

Una función importante del cemento es la de proteger la tubería de revestimiento sirviéndole de soporte durante la perforación del pozo hasta su profundidad total, esto se refiere especialmente a la zapata de la tubería que puede desenroscarse por el efecto de la rotación de la barrena y la columna de perforación.

- Tubería intermedia.

En algunas regiones se coloca una o más tuberías de revestimiento intermedias, mientras que en otras no se usan. La función principal de la tubería intermedia es la de proteger el pozo, es decir, evitar que la pared del pozo se derrumbe, y así eliminar problemas al perforar a mayor profundidad. La tubería intermedia cementada, se usa para sellar formaciones como una zona de agua a alta presión o aquellas en que ha habido pérdida de lodo de circulación y en las que no se puede perforar económicamente usando aditivos de lodo. Algunas veces esta tubería intermedia se emplea para sellar ciertas zonas que contienen fluidos altamente corrosivos, en las que no es posible aislar la formación con cemento por el método de etapas múltiples de la columna de producción.

Ocasionalmente, las formaciones salinas o de anhídritas pueden contaminar el lodo o deslavar el pozo, a tal grado que es necesario asentar y cementar una tubería intermedia antes de perforar a mayor profundidad. Esta columna con su cementación se usa para sellar zonas antiguas de producción en las que se perforan nuevos pozos a mayor profundidad.

Cuando la perforación se conduce en, o cerca de operaciones de minería, los reglamentos exigen dos y a un tres columnas de tubería, las que deben asentarse a través de la parte interior del depósito de mineral. Por lo tanto, puede ser necesario usar una o más columnas intermedias.

- Tubería de producción.

Esta tubería es la más importante en el pozo productor de hidrocarburos, sirve para aislar el contenido de la formación: Aceite, gas o condensado, de los fluidos indeseables, como agua o exceso de gas, que pudieran estar presentes en la formación productora. En campos de zonas productoras múltiples, es necesario aislar las diferentes arenas productoras.

Cuando las formaciones son excepcionalmente blandas, es necesario colocar la tubería de producción antes de que pueda hacerse la prueba de formación, este procedimiento es costoso cuando la zona resulta estar seca, pero algunas veces es necesario seguirlo.

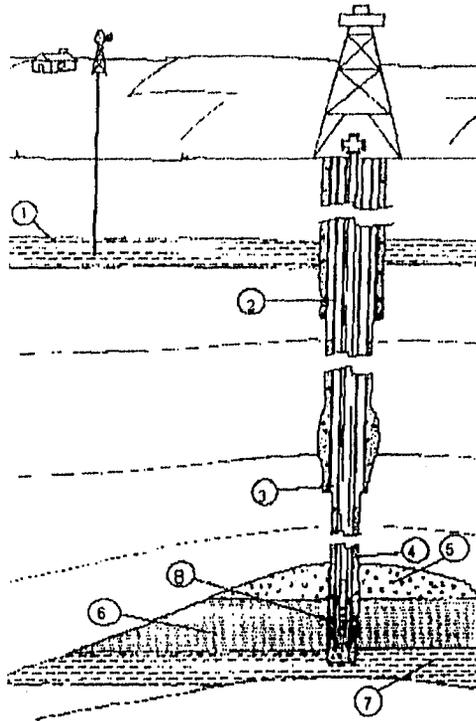
- Tubería corta o liner.

Hay instalaciones especiales de tuberías de producción en las que no se necesita una columna completa. Por ejemplo, cuando la tubería intermedia puede asentarse a 2440 m y la formación debe producir a 3660 m, la tubería de producción puede asentarse desde la profundidad total extendiéndose sólo de 30 a 90 m encima de la zapata de la columna intermedia. En este caso, la columna de producción consistiría de una camisa de 1300 m asentada al fondo y de 2440 m de tubería intermedia, este procedimiento no es una regla pero en algunos casos se ha usado con buenos resultados.

Son diversas las razones por las que se usa una tubería corta o liner cuyas funciones son:

1. Evitar problemas en la perforación del pozo, como pérdidas de lodo, intentos de pegaduras, etc.
2. Permite incrementar la densidad del lodo en zonas geopresionadas o en su defecto disminuirlas.
3. Revestir agujeros que se perforan con menor diámetro, por falta de capacidad de equipo o por la necesidad de profundizar un pozo.

La figura 3-2 muestra los tipos de tuberías de revestimiento.



**DESCRIPCION:**

- 1.- Abastecimiento de agua dulce
- 2.- TR superficial cementada
- 3.- TR intermedia cementada
- 4.- TR de producción cementada
- 5.- Gas natural en el yacimiento

- 6.- Petróleo crudo en el yacimiento
- 7.- Agua salada en el yacimiento
- 8.- Perforaciones en la TR de producción y en el cemento que lo rodea

**FIGURA 3-2 ESQUEMA DE COLUMNAS TIPICAS DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO**

## Diseño del programa de tuberías de revestimiento.

La columna de tubería de revestimiento más económica es la más ligera de peso, que puede resistir los varios esfuerzos que resultan de la presión de compresión lateral, tensión y acción interna que se ejercen sobre ella. Bajo condiciones normales, los costos de la tubería de revestimiento se pueden reducir sin disminuir el margen total de seguridad.

Esto se logra con la aplicación de factores de seguridad moderados y con la sustitución de grados y pesos ligeros de tubería en las porciones intermedias del pozo, en regiones en las que hay pozos de cateo, o cuando se sabe que existen dificultades con la tubería de revestimiento, el buen criterio puede exigir factores de diseño que produzcan grandes márgenes de seguridad. En estos casos, la economía en el costo de la tubería es de importancia secundaria.

Al efectuar el diseño del programa de tubería de revestimiento se debe de considerar lo siguiente:

- Profundidad de asentamiento.
- Condición de la formación.
- Objetivos de perforación.
- Fuerzas externas (compresión lateral).
- Presiones internas.
- Diámetro de la tubería exigida.
- Diámetro de la barrena.
- La duración del pozo.
- Densidad del fluido de control.
- Columna de fluidos.
- Disponibilidad de la tubería.
- Resistencia de materiales.
- Métodos de manufactura como:
  - a) Tuberías sin costura.
  - b) Soldadura eléctrica.
  - c) Soldadura a tope.
  - d) Soldadura a solapa.
- Pesos por pie y roscas.
- Grado del acero.

- Juntas o uniones.

La tubería de revestimiento también se debe diseñar para resistir los esfuerzos mecánicos y químicos del pozo. En la figura 3-3 muestra el procedimiento usual de una cementación primaria, y los accesorios que lleva la tubería que se introduce en un pozo petrolero.

Instalación de la tubería de revestimiento.

Cada compañía tiene sus propias ideas sobre los procedimientos que se han de seguir para la instalación de la tubería de revestimiento, el API ha determinado algunos procedimientos generales para que el trabajo sea más efectivo.

1. Toda tubería de revestimiento nueva, usada o reacondicionada deberá manejarse siempre con los protectores en las roscas.
2. Los elevadores de cuñas se recomiendan para las columnas largas, los elevadores deberán estar limpios y en buenas condiciones para que se ajusten adecuadamente a la tubería. Las cuñas deben ser extragrandes para columnas pesadas.
3. Si se usan elevadores que estiren los coples, la superficie de contacto debe inspeccionarse cuidadosamente para determinar si hay distribución uniforme del peso que se aplica sobre la superficie del contacto del cople.
4. Los elevadores de cuñas y de araña deberán examinarse para estar seguros de que bajen correctamente, sino bajan uniformemente hay peligro de que marque la tubería o de cortarla con las cuñas.
5. Debe tenerse mucho cuidado particularmente cuando se instalan columnas largas, para asegurarse que el buje de la cuña está en buenas condiciones.
6. Las siguientes precauciones deberán seguirse en la preparación de las roscas de la tubería de revestimiento antes de apretarlas:

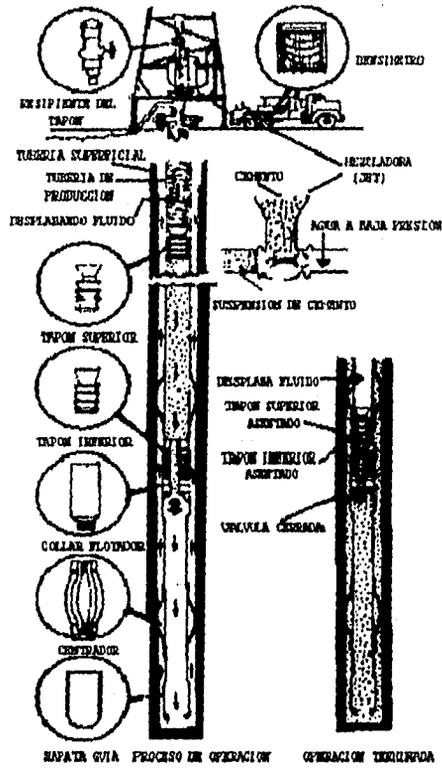


FIGURA 3-3 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UNA CEMENTACION

a) Inmediatamente antes de bajar la tubería, se deben de retirar los protectores de las roscas en los extremos de los tubos y limpiar cuidadosamente las roscas. Este procedimiento debe de repetirse según los tramos que sea necesario.

b) Se inspecciona cuidadosamente las roscas, si están dañadas aunque sea ligeramente deberán separarse a menos que haya medios satisfactorios para corregir el daño.

c) Colocar en cada tubo un protector limpio en el extremo de la rosca para que esta no se dañe al rodar o llevar el tubo hasta la torre.

d) Antes de enroscar los tubos se aplica suficiente compuesto (grasa) sobre toda la sección de las roscas tanto en las roscas internas como en las externas.

7. Bajar o rodar cada tramo de tubería cuidadosamente al piso sin dejarla caer, usando un cable amortiguador si es necesario, evitando los golpes de la tubería contra la torre u otro equipo.

8. No se debe remover el protector del extremo de la rosca de la tubería hasta que esté listo para centrarse en el cople.

9. Cuando sea necesario, aplicar compuesto (grasa) sobre la superficie completa de la rosca antes de empezar a centrarla.

10. Para centrar la tubería, bajar cuidadosamente evitando que se dañen las roscas. El tubo deberá hacerse girar muy despacio al principio para asegurarse de que las roscas están agarrando bien.

11. Un método para determinar la eficacia al apretar las roscas es el de aplicar la mano a intervalos frecuentes sobre el cople, cuando se usa el método adecuado el cople está uniformemente lizo cualquier lugar caliente en el cople indica que hay una rozadura.

12. Las juntas que no se sabe si están adecuadamente apretadas deberán separarse para inspeccionarse y repararse si resulta práctico.

13. Si el tubo tiene tendencia a moverse demasiado en su extremo superior al enroscarlo, indicando que la rosca puede no estar en línea con el eje de la tubería, la velocidad de rotación deberá disminuirse para evitar las rozaduras de las roscas.

Si el movimiento persiste a pesar de la disminución de la velocidad de rotación el tubo deberá extraerse para inspeccionarse.

14. Las columnas deben elevarse y bajarse cuidadosamente teniendo la precaución de usar cuñas para evitar cargas de choque.

15. Debe haber instrucciones específicas disponibles en cuanto al diseño de la columna combinada, incluyendo los diferentes grados de acero, pesos, y tipos de uniones o coples. Debe tenerse mucho cuidado de meter la tubería de revestimiento exactamente en el orden en que se ha diseñado.

16. Inmediatamente después de apretar cada tubo, de bajar la tubería y de colocar las cuñas, la tubería de revestimiento debe llenarse de lodo en toda su longitud. La explicación anterior no es necesaria si se usa una tubería de revestimiento con zapatas y collares de relleno automático.

### III.2 TECNICAS DE CEMENTACION FORZADA.

La cementación forzada es un proceso que consiste en aplicar presión hidráulica para forzar una lechada de cemento hacia la formación o canales en la cementación primaria, a través de las perforaciones efectuadas en la tubería de revestimiento o contra una zona porosa. Es el tipo de cementación más común en la etapa de reparación de un pozo.

Generalmente, la cementación forzada requiere presiones que varían en un rango muy amplio y se efectúa mediante el uso de diferentes herramientas, las cuales se colocan hacia arriba del tramo donde se necesitan que el cemento sea forzado.

Además, en la operación satisfactoria de cementación forzada, se usan fluidos para limpiar y abrir las perforaciones en el área en que va a ser forzado y desplazado el cemento.

Hoy en día el uso más común de la cementación forzada es para aislar una zona productora de hidrocarburos de aquéllas que producen otros fluidos. Se han demostrado que se pueden hacer cementaciones forzadas sin fracturar la formación, controlando que las presiones de inyección sean bajas; sin embargo, el objetivo de una cementación forzada es colocar el cemento en los puntos correctos.

La cementación forzada se puede utilizar también para:

- a) Controlar la relación gas-aceite.
- b) Controlar el agua excesiva.
- c) Reparar fugas en la tubería de revestimiento.
- d) Sellar zonas débiles o con pérdidas de circulación.
- e) Proteger contra la migración de fluidos dentro de una zona productora.
- f) Aislar zonas en terminación de pozos.
- g) Corregir un trabajo de cementación primaria defectuosa.
- h) Prevenir la migración de fluidos de zonas o pozos abandonados.

El bloqueo por cemento, arriba y abajo de una zona a producir (aislamiento) y la reparación de una cementación primaria defectuosa se evitan por medio de prácticas de ademe satisfactorias. Las razones más comunes para aplicar una cementación forzada son el abandono, el control del gas y la entrada de agua en un pozo.

La entrada de fluidos indeseables es inevitable, debido a que el espesor de la zona de aceite disminuye con el agotamiento del yacimiento; el gas y el agua se conifican. Aparte del abandono del pozo, el control de entrada de gas y agua al mismo, es probablemente la razón más común para hacer una cementación forzada. Manteniendo el daño a la formación al mínimo o estableciendo una reparación al pozo, se minimiza esta entrada de fluidos y se disminuye la tendencia a la conificación.

## Factores que intervienen en una cementación forzada.

Existen parámetros propios de una zona determinada, que de una u otra forma ayudan a determinar las condiciones en que se desarrollará un trabajo de cementación forzada, estos factores son:

- Historia del pozo.
- Zona de pérdida pozo arriba o pozo abajo, derrumbes.
- Resultados de los registros de adherencia del cemento.
- Localización de contactos originales y actuales.
- Diseño de tuberías de revestimiento:
  - \* Peso.
  - \* Tipo.
  - \* Resistencia al colapso/ruptura.
- Daño potencial a la formación.
- Propiedades de las rocas:
  - \* Permeabilidad.
  - \* Porosidad primaria y secundaria.
  - \* Fractura.
- Temperatura de fondo (estática y dinámica).
- Presiones de fondo:
  - \* Presión estática.
  - \* Presión de sobrecarga.
  - \* Presión de fractura.
- Gradiente de fractura y orientación de la misma.

Todos los factores mencionados anteriormente deben ser considerados al planear una cementación forzada, sin considerar las razones para tomar una acción como remedio. La cementación forzada es uno de los tipos de reparación más complejos y depende de un buen planteamiento anterior a la operación. Si no se comprenden perfectamente bien las condiciones en que se desarrollará la operación, podrá fallar.

Cuando se efectúa una cementación forzada se pueden usar uno o varios recursos tales como:

- Registro de inspección de tubería de revestimiento.
- Registro de adherencia del cemento.

- Escariadores y rimas.
- Sarta de tubería de prueba.
- Máximo diámetro interior posible de la sarta de reparación.
- Diseño y selección de la lechada cementante:
  - † Baja pérdida de agua.
  - † Baja densidad.
  - † Alta temperatura, etc.
- Tipos de herramientas (permanentes o recuperables).
- Disparos.

Uno de los recursos principales disponibles es el cemento con baja pérdida de agua (BPA). Estas lechadas de cemento tienen grandes ventajas debido a que existe poco cambio en la relación agua-cemento. Esto origina tiempos de espaciamiento uniforme y una lechada que permanece fluida mientras se bombea, lo que a su vez origina:

- Menor presión de desplazamiento.
- Menores problemas de pérdida de circulación.

Así mismo, por el pequeño cambio en la relación agua-cemento, los volúmenes de llenado y desplazamientos son más confiables. Finalmente el daño potencial a la fractura y el peligro de fraguado instantáneo, se reduce al mínimo. A medida que las restricciones en la presión de fondo lo permiten (presiones estáticas y de fractura), los cementos de baja pérdida de agua permiten cementaciones forzadas en una sola etapa y con mayores volúmenes.

El uso de cementos sin aditivo tiene las siguientes restricciones:

- La pérdida de agua de la lechada ocasiona un aumento en la viscosidad del cemento lo que crea presiones mayores de desplazamiento.
- En casos extremos, la pérdida de agua causará un fraguado instantáneo, originando falsas presiones de cementación.

Si la pérdida de agua es demasiado alta, la velocidad de filtración bajo presión, deshidrata el cemento tan rápido como para que el enjarre pueda

cubrir completamente la tubería de revestimiento e impedir que la lechada penetre en las perforaciones más bajas o cuando se comprime en un canal, el enjarre puede bloquear su extremo e impedir que el canal se llene. Bajas velocidades de filtración forman solamente delgados enjarres (50cm<sup>3</sup>/30 min). Por definición API, una alta pérdida de fluidos es aquella entre 600 y 2500 cm<sup>3</sup>/30 min y una baja pérdida oscila entre 25 y 100 cm<sup>3</sup>/30 min.

En la figura 3-4 se representan las ventajas de usar un cemento con baja pérdida de agua.

#### Procedimiento para efectuar una cementación forzada.

Para efectuar una cementación forzada es necesario romper la formación y esto sirve para suponer de una manera práctica el grado de resistencia que se tendrá al efectuar la inyección del cemento y así determinar la cantidad de cemento que se debe usar en la operación, a fin de alcanzar una presión final máxima (Pfi)<sub>max</sub> recomendable para que la operación sea satisfactoria.

En ocasiones cuando no se logra romper la formación con lodo, se puede presentar poca permeabilidad en el intervalo abierto, entonces se opta por otros tipos de fluidos, tales como, agua, aceite, diesel y cuando las formaciones son calcáreas se emplea ácido clorhídrico.

Puede decirse que la cantidad necesaria de cemento para efectuar una operación de cementación forzada, será la máxima cuando la presión de ruptura sea mínima o viceversa. En la práctica se hace uso de la siguiente expresión empírica que está en función de la profundidad a la que se efectúa la operación y al tipo de fluido de la formación a oblturar.

$$(Pfi)_{max} = 0.4 \times H + k \text{ -----(2)}$$

Donde:

(Pfi)<sub>max</sub> = Presión máxima de inyección (lb/pg<sup>2</sup>)

COMPORTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO  
EN UNA CEMENTACION FORZADA

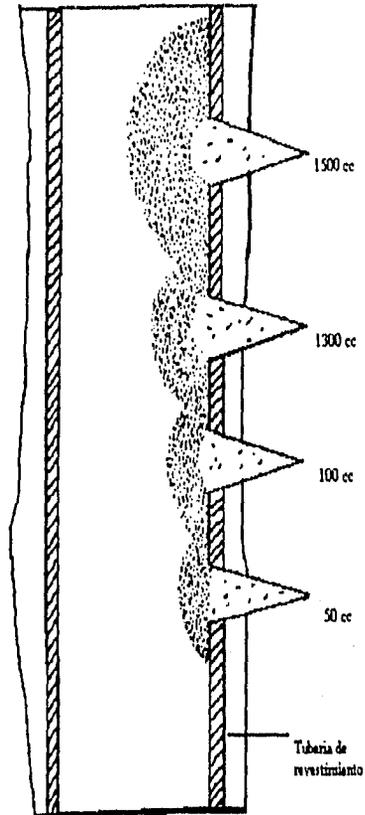


FIGURA 3-4 EFECTO DE PÉRDIDA DE AGUA EN LA HIDRATACION DE CEMENTO

- H = Profundidad media del intervalo disparado (pie)  
k = Factor que depende de los fluidos que contiene la formación por obturar (adimensional)

### Conceptos y bases.

En el campo existen tres teorías predominantes sobre cementaciones forzadas, que pueden contribuir a procedimientos y aplicaciones inadecuados, debido a su interpretación.

1. Todo el cemento entra en la formación: Este falso concepto guía para que la cantidad de cemento bombeada detrás de la tubería y el valor de la presión aplicada, se toma en consideración, cuando realmente estos factores afectan poco los resultados de la cementación. La verdad es que no todo el cemento entra en la formación.

2. Al inyectar únicamente lodo, la ruptura abre automáticamente todas las perforaciones. En realidad, es raro encontrar todas las perforaciones abiertas y que reciban el fluido. Para alcanzar esto se requiere un esfuerzo considerable, como se muestra en la figura 3-5.

3. Se forma un sólo sello o cuña horizontal de cemento alrededor del agujero. Las indicaciones son, debido a que el cemento no puede entrar en la formación el filtrado se separa de las perforaciones. Cuando la formación se fractura, la mezcla de cemento puede entrar en una serie de cuñas irregulares, como se muestra en la figura 3-6.

Como anteriormente se dijo, planear la cementación forzada en una operación, es un paso muy importante. Se deben estudiar las condiciones del pozo y establecer los objetivos cuidadosamente, ya que la cementación forzada puede resultar complicada y costosa, las presiones que se deben de considerar son:

- Presión de fractura.

Presión de fractura es la fuerza por unidad de área necesaria para vencer la presión de formación y la resistencia de la roca. El grado de resistencia

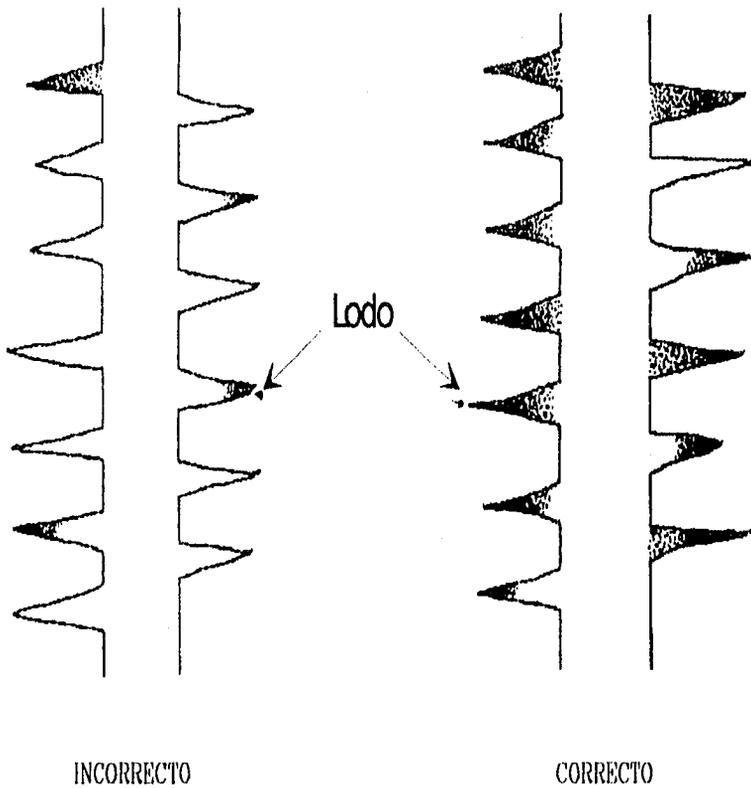
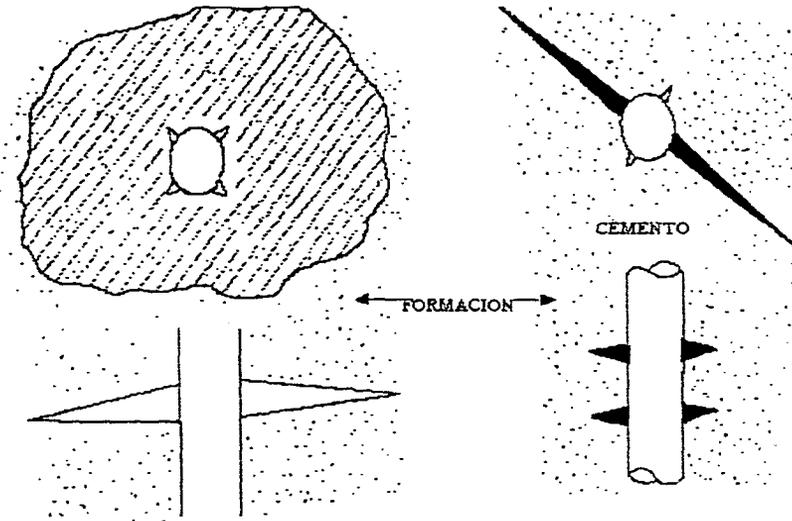


FIGURA 3-5 NO ESTAN ABIERTAS TODAS LAS PERFORACIONES EN EL POZO



Se considera que:

Se requiere fracturar si se desplaza mucho cemento. Habrá fracturas verticales abajo de los 900 m. probablemente fracturas verticales abajo de los 450 m. puede ser horizontal arriba de los 450 m.

FIGURA 3-6 FORMA DE UN "PASTEL" DE CEMENTO ALREDEDOR DEL POZO

que ofrece una formación a su fracturamiento depende de la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de compresión a los que está sometida.

La densidad es una propiedad muy importante para el fluido de control y se deben considerar varios parámetros para seleccionarlo, como son la profundidad y el gradiente de fractura, los cuáles se toman en cuenta para determinar la presión hidrostática.

El gradiente de fractura describe el rompimiento de la formación en función de un gradiente de fluido. Para causar una fractura, la presión del fluido deberá ser mayor que la presión de formación (P) y el esfuerzo de la matriz de la roca (N).

En una dirección vertical, el esfuerzo de la matriz de la roca se describe como la diferencia entre el peso de la sobrecarga (S) y la presión de formación (P), o sea (S-P), el peso de sobrecarga se distribuye también como un esfuerzo horizontal, el cuál es mayor que el esfuerzo vertical. La relación de esfuerzos (k'), es la relación de los esfuerzos horizontal y vertical.

La presión sobre la formación de un pozo causará una fractura en la dirección del esfuerzo menos resistente. En formaciones relacionadas tectónicamente, el menor esfuerzo de la matriz de la roca es horizontal y se describe por la ecuación:

$$M = (S - P) \times k' \text{ -----(3)}$$

Donde:

M = Esfuerzo de la matriz de la roca

S = Peso de la sobrecarga (lb)

P = Presión de formación (lb/pg<sup>2</sup>)

k' = Relación de los esfuerzos (adimensional)

Finalmente la presión de fractura o gradiente de una formación, descrito en términos de la presión de formación y el menor esfuerzo de la matriz de la roca, se convierte en la ecuación:

$$PF = P + (S - P) \text{ -----(4)}$$

La ecuación anterior donde la presión de fracturamiento de la formación en términos de presión, gradientes o densidades equivalentes, siempre que sus unidades sean constantes.

La presión de la fractura puede estimarse en el campo mediante la siguiente ecuación:

$$PF = GF \times D \text{ -----(5)}$$

Donde:

PF = Presión de fractura (lb/pg<sup>2</sup>)  
 GF = Gradiente de fractura (lb/pg<sup>2</sup>/pie)  
 D = Profundidad (pie)

-- Gradiente de fractura.

El gradiente de fractura, es el cociente presión/profundidad que define la manera en que varía la presión de fracturamiento, al variar la profundidad.

A partir de los datos obtenidos de algunas cementaciones a presión donde se haya efectuado fracturamiento de la formación, se puede estimar en el campo el gradiente de fractura, adicionando la presión de la superficie observada al suspender instantáneamente el bombeo.

$$GF = (P_{ci} + P_h) / D \text{ -----(6)}$$

Donde:

$P_{ci}$  = Presión instantánea de cierre (lb/pg<sup>2</sup>)

$P_h$  = Presión hidrostática (lb/pg<sup>2</sup>)

A través de experiencias de campo y laboratorio se ha encontrado que la presión que soporta una roca sin que se fracture, es función principalmente de su resistencia y de los esfuerzos a los que se encuentra sometida en el subsuelo.

La resistencia que ofrece la formación por sí misma raras veces asciende a más de 250 lb/pg<sup>2</sup> y se ha observado que las formaciones se fracturan a presiones inferiores a la presión de sobrecarga.

- Presión de cementación de fondo.

La presión de cementación de fondo es la presión ejercida en la formación durante una operación de cementación forzada. Esta es la presión en superficie, mas la presión hidrostática de los fluidos en el pozo menos las pérdidas por fricción.

En forma de ecuación se expresa:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h - p_f \text{ ----- (7)}$$

Donde:

$P_{tr}$  = Presión de cementación de fondo (lb/pg<sup>2</sup>)

$P_{wh}$  = Presión en la cabeza del pozo o presión superficial aplicada por las bombas (lb/pg<sup>2</sup>)

$p_f$  = Pérdidas por fricción (lb/pg<sup>2</sup>)

En cementaciones forzadas, las pérdidas por fricción son relativamente bajas y generalmente se desprecia en los cálculos.

La ecuación anterior se convierte en:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h \text{ -----(8)}$$

La presión de fondo debe ser usada como el criterio para elegir la operación. Debido a que el fracturamiento es indeseable en algunos casos, la presión máxima de trabajo en el fondo, debe ser menor que la presión de la fractura.

Si el exceso de cemento se debe regresar, la presión mínima de trabajo en el fondo debe ser de 300 a 500 lb/pg<sup>2</sup>. Se formará un enjarre de cemento en las perforaciones por deshidratación. Las altas presiones de trabajo no aumentan la posibilidad del éxito sino incrementan la posibilidad de fracturar la formación.

#### - Presión de inyección superficial.

La presión de inyección superficial se observa cuando la formación, después de romper empieza a admitir fluidos y es la presión de bombeo registrada en la superficie, mediante la cual se inyecta el cemento a la formación. La presión de inyección es el promedio de las observadas durante la inyección de la lechada, antes de alcanzar la presión máxima.

#### - Presión máxima.

La presión máxima se registra en la superficie al alcanzar la mayor lectura de presión en el manómetro, al finalizar la inyección de la lechada de cemento dentro de la formación. Es importante pensar como está reaccionando el pozo, la actividad en el trabajo deberá regirse por las presiones superficiales, considerando siempre los que está sucediendo en el fondo del pozo.

La presión máxima se debe preestablecer por medio de un estudio que tome en cuenta las condiciones particulares del pozo, recordando siempre

que el principal objetivo es el de construir una capa de cemento frente al intervalo y no el de alcanzar altas presiones.

- Presión final.

La presión final equivale en algunos casos a la presión máxima alcanzada y en otros, a la presión instantánea de cierre. Esta se registra en la superficie al estabilizarse el sistema una vez que se ha cesado de bombear totalmente la lechada.

- Presión hidrostática.

La presión hidrostática es la ejercida por una columna de un fluido a una profundidad vertical dada y actúa de igual forma en todas direcciones, de otra manera:

$$Ph = D \times \rho_f / 10 \text{ -----(9)}$$

Donde:

Ph = Presión hidrostática (kg/cm<sup>2</sup>)

D = Profundidad (m)

$\rho_f$  = Densidad del fluido de control (gr/cm<sup>3</sup>)

- Presión de cierre instantáneo.

La presión de cierre instantáneo es la registrada en un manómetro en el momento preciso de parar la inyección de cualquier fluido.

- Pruebas de admisión.

Se le llama prueba de admisión a la operación de aplicar presión hidráulica a la formación para establecer un gasto determinado. La presión de admisión variará de acuerdo a las diferentes áreas o campos de trabajo,

ya que en cada campo se presentan columnas geológicas de diversos tipos de rocas.

Para llevar a cabo una prueba de admisión generalmente se usa una herramienta cementadora recuperable (RTTS) que se muestra en el apéndice A en la figura A-1, la cual una vez anclada permite ejercer la presión hidráulica en un punto o intervalo deseado.

Invariablemente los datos más importantes que aporta una prueba de admisión son:

- Presión de admisión.
- Presión de inyección.
- Presión máxima de inyección.
- Presión final.
- Gasto.
- Volumen bombeado.
- Volumen regresado.

Procedimiento para efectuar la prueba de admisión.

1. Anclar el RTTS con peso y torsión aproximadamente 10 a 20 m arriba del intervalo a probar.
2. Probar líneas superficiales.
3. Cerrar el preventor anular.
4. Probar efectividad de empaque.
5. Inyectar el fluido con que se va a efectuar la prueba de admisión midiéndolo en el depósito de la unidad de alta presión.
6. Anotar las presiones obtenidas así como los volúmenes manejados.
7. Medir el volumen regresado, en su caso.

### III.3 DISEÑO DE TAPONES DE CEMENTO Y SU COLOCACION.

#### Diseño de tapones de cemento.

El diseño de tapones de cemento depende mucho del objetivo que se requiere que cumpla el tapón. Algunos parámetros a considerar son:

1. Volumen de lechada.
2. Densidad y resistencia a la compresión del cemento.
3. Tiempo bombeable para alcanzar la resistencia buscada.
4. Técnica de colocación de la lechada de cemento.
5. Acondicionamiento del pozo.

Las características de cada uno son las siguientes:

#### 1. Volumen de lechada.

El volumen de la lechada depende de los objetivos del tapón, por ejemplo, los tapones de abandono tendrán una longitud que puede variar de 40 a 50 m. Un exceso de cemento, se remueve por circulación inversa y puede ser necesario cuando se quiere afinar la cima del tapón.

#### 2. Densidad y resistencia a la compresión del cemento.

Una resistencia a una compresión elevada es indispensable para tapones de desvío, la resistencia a la compresión de un cemento es función directa de la razón agua-sólidos en la lechada, densidades elevadas dan resistencias elevadas.

#### 3. Tiempo bombeable para alcanzar la resistencia buscada.

El tiempo bombeable esta en función de las condiciones dinámicas de la lechada de cemento, ya que la lechada en condiciones estáticas reduce su tiempo bombeable al 50%, disminuyendo el tiempo de fraguado del cemento.

#### 4. Técnica de colocación de la lechada de cemento.

La técnica para la colocación de la lechada de cemento depende exclusivamente de las condiciones del agujero, así como la finalidad que deberá cubrir el tapón de cemento.

El método más usual es de columnas balanceadas que es la base para la colocación de cualquier tapón de cemento, posiblemente existan otras técnicas para la colocación de tapones de cemento pero las diferencias con respecto a este método son mínimas. La colocación de un tapón de cemento requiere de ciertas técnicas y cuidados que deberán aplicarse antes de su colocación para asegurar el éxito de la operación.

#### 5. Acondicionamiento del pozo.

Se debe circular el fluido de perforación hasta que la densidad de entrada sea la misma en la salida, el agujero estará con esto limpio de sólidos indeseables, así no tendrá ninguna descompensación de la columna hidrostática y que en algún momento afectaría en el desplazamiento del tapón.

#### Método de colocación de columnas balanceadas.

1. Antes de iniciar a bombear la lechada al pozo, será indispensable circular el fluido de control el tiempo necesario, ya sea que se trate de salmuera lodo de emulsión inversa o lodo bentonítico, para que la columna hidrostática permanezca uniforme y no afecte el equilibrio del tapón de cemento, por esta razón será necesario verificar la densidad de entrada y de salida del fluido.

2. Una vez que ha sido circulado el fluido dentro del pozo se probarán las conexiones superficiales de la unidad de alta presión, para prevenir problemas al ser bombeada la lechada en sus respectivos baches.

3. Revisados estos dos puntos se procede a colocar el tapón de cemento por circulación a la profundidad programada.

4. Se bombea el primer bache espaciador, que quedara alojado en la tubería, después se procede a bombear la lechada, verificando que la densidad de la lechada sea homogénea para ajustarse a las especificaciones. Después de este paso se procederá a bombear el segundo bache espaciador que será del mismo volumen que el primero.

5. Una vez bombeada la lechada de cemento con sus respectivos baches se procede a desplazarla a la profundidad programada con fluido de control. El desplazamiento se lleva hasta la profundidad de la cima del segundo bache espaciador.

6. Una vez distribuidos los fluidos en el espacio anular (espacio entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción ó perforación), se procede a levantar la tubería hasta alcanzar la zona de seguridad.

Se recomienda levantar el doble del tirante de cemento después de circular a la inversa para limpiar la tubería.

Para el caso de que no exista pérdida de fluido en el pozo, después de limpiar la tubería debe sacarse para continuar con el programa operativo ya establecido.

En el supuesto caso que el intervalo por aislar u obturar, presente pérdida de circulación, se recomienda que después de limpiar la tubería se cierren preventores y tubería, para anular el efecto de la presión atmosférica y así evitar que la lechada se pierda.

#### Colocación de taponos de cemento.

Una operación frecuente y sencilla aparentemente es la colocación de un tapón de cemento, sin embargo, es la más difícil para asegurar un éxito completo y satisfactorio. Estas operaciones revisten un interés muy especial en el transcurso de la perforación y terminación de un pozo, ya que son colocados en agujero descubierto o ademado, de allí la necesidad de aplicar la técnica más adecuada para la colocación de estos.

Cada operación de taponamiento es un problema diferente debido al volumen relativamente pequeño del cemento que será colocado en un volumen enorme de fluido en el pozo, por ello es recomendable tomar las medidas necesarias en la colocación de taponos de cemento, ya que de lo contrario estas operaciones pueden resultar fallidas por tal razón se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) La temperatura del intervalo a taponar.
- b) La profundidad del intervalo a taponar o aislar.
- c) Si se colocará en agujero descubierto o ademado.
- d) La densidad de la lechada de cemento.
- e) Las características del fluido de control.

De acuerdo a estos parámetros se procede a efectuar un diseño adecuado de la lechada de cemento, así como de los aditivos necesarios para la operación. Una vez colocado el tapón de cemento, el tiempo de fraguado puede variar de 8 a 48 horas esto dependiendo de la función que se requiere desempeñe. Los taponos de cemento para desviar un pozo requieren un tiempo de fraguado mayor para aumentar la resistencia a la compresión del cemento.

Antes de colocar un tapón de cemento, el fluido de control del pozo se deberá circular bien evitando con esto una descompensación de la columna hidrostática, que en un momento dado podrá desplazar el tapón de la profundidad programada.

Además es conveniente colocar volúmenes de agua antes y después de bombear la lechada de cemento al pozo evitando que la cima del tapón de cemento quede en contacto con el fluido de control y así evitar la contaminación de la lechada de cemento, que afectaría sus propiedades físicas.

Existen varios casos en los cuales se colocan taponos de cemento, entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Tapón para aislar intervalos.
- Tapón en agujero descubierto para aislar zonas de pérdida de control.
- Tapón para aislar herramientas atrapadas en el pozo (pescados).

- Tapón para desviar pozos.
- Tapón para aislar intervalos de producción en forma temporal.
- Tapón para pruebas de producción.
- Tapón para recementaciones o cementaciones forzadas.
- Tapón para abandono de pozos.

Las características de estos son:

- Tapón para aislar intervalos.

En un pozo con dos o más intervalos, algunas veces resulta benéfico abandonar una zona depresionada o que ya no resulte económica para su explotación, a través de la colocación de un tapón de cemento permanente, esto ayuda a prevenir posibles pérdidas en producción o migración de fluidos del intervalo inferior.

- Tapón en agujero descubierto para aislar zonas de pérdida de control.

Durante la perforación algunas veces se presenta la pérdida parcial o total del lodo y es posible restaurar la circulación colocando un tapón de cemento en la zona de pérdida y después de esperar el tiempo de fraguado necesario se reanuda la perforación.

- Tapón para aislar herramientas atrapadas en el pozo (pescados).

Estas operaciones son diseñadas para desviar el agujero sobre un pescado que no fue posible recuperar y es necesario colocar un tapón de cemento a cierta profundidad para ayudar a soportar la herramienta desviadora y darle la dirección deseada.

- Tapón para desviar un pozo.

El tapón de cemento para desviar un pozo, se coloca durante la perforación del mismo ya sea por alguna falla debida a la mal aplicación de las condiciones de la perforación o falla mecánica de la sarta y/o equipo, ocasionando que el agujero sea desviado de su objetivo, siendo necesario colocar un tapón con la herramienta desviadora corrigiendo el rumbo y así poder alcanzar el objetivo deseado.

- Tapón para aislar intervalos de producción en forma temporal.

Los tapones de cemento para aislar intervalos de producción en forma temporal son colocados cuando existe alguna falla del equipo subsuperficial, mientras sea reparada la falla y también cuando se evalúe algún otro intervalo en el mismo pozo.

- Tapón para pruebas de formación.

Los tapones de cemento para pruebas de formación son colocados algunas veces bajo una zona que será probada, la cual está a una distancia considerable del fondo y no es posible colocar un tapón mecánico para el caso.

- Tapón para recementaciones o cementaciones forzadas.

Los tapones de cemento para recementaciones o cementaciones forzadas se utilizan para corregir una cementación primaria de tubería de revestimiento, para reafirmar la zapata de la misma con una densidad adecuada del lodo y a la vez tener un control seguro sobre el pozo, además corregir roturas en tuberías de revestimiento.

- Tapón de abandono del pozo.

Los tapones de cemento de abandono son colocados para sellar un pozo no productivo, cuando está depresionado, invadido de algún fluido indeseable, es incosteable económicamente, etc.

Se coloca un tapón de cemento de fondo a una profundidad determinada, previniendo la comunicación o migración de fluidos que pudieran ocasionar contaminación de los mantos freáticos, flujos o presiones no deseables en la superficie.

### III.4 EJEMPLOS DE APLICACION.

Los siguientes ejercicios son ejemplos de aplicación de los temas desarrollados en este capítulo.

#### Ejemplo III.1 Cementación Primaria de Tuberías de Revestimiento.

- Programa de cálculo para la operación.

##### 1. Datos del pozo:

- Profundidad del pozo = 950 m
- Diámetro de la barrena = 22 "
- Diámetro de la tubería de revestimiento = 16 ", J-55, 84 lb/pg<sup>2</sup>
- Diámetro interior de la tubería de revestimiento = 15.01"
- Profundidad a cementar = 950 m
- Porcentaje de exceso del cemento = 100 %
- Tipo de cemento = "G" sin aditivos
- Rendimiento de la lechada = 38.11 lt/sc
- Requerimiento de agua = 22.18 lt/sc
- Distancia del cople de retención-zapata = 20 m
- Densidad de la lechada = 2.03 gr/cm<sup>3</sup>
- Última tubería cementada de 24" a 20 m
- Diámetro interior de la última TR = 23"
- Gasto de la bomba = 7 bl/min

##### 2. Los cálculos a realizar son:

1. Capacidad en el espacio anular (VEA), entre el agujero y la tubería.

$$VEA = 0.5067 (d_a^2 - d_{TR}^2) \text{ -----(1)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (1):

$$VEA = 0.5067 ( 22^2 - 16^2 ) = 115.53 \text{ lt/m}$$

2. Capacidad anular entre tuberías de revestimiento (VA).

$$VA = 0.5067 (diTRu^2 - dTR^2) \text{ -----(2)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2):

$$VA = 0.5067 (23^2 - 16^2) = 138.33 \text{ l/m}$$

3. Capacidad de la tubería de revestimiento (VTR).

$$VTR = 0.5067 \times diTR^2 \text{ -----(3)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3):

$$VTR = 0.5067 \times 15.01^2 = 114.16 \text{ l/m}$$

4. Volumen anular total (VAL).

$$VAL = VEA \times \text{prof.} + VA \times \text{prof} \text{ -----(4)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (4):

$$VAL = 115.53 \times 900 + 138.33 \times 50 = 110894 \text{ l}$$

5. Volumen entre cople y zapata (Vc+z).

$$Vc+z = VTR \times \text{Longitud del cople-zapata} \text{ -----(5)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (5):

$$Vc+z = 114.16 \times 20 = 2283 \text{ l}$$

6. Volumen total de lechada (Vl).

$$Vl = VAL + Vc+z \text{ -----(6)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (6):

$$V_l = 110894 + 2283 = 113177 \text{ lt}$$

7. Volumen de la lechada más exceso ( $V_{ex}$ ).

$$V_{ex} = V_l + V_l \text{ -----(7)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación:

$$V_{ex} = 113177 + 113177 = 226354 \text{ lt}$$

8. Número de sacos a utilizar y cantidad de cemento (No. de sc).

$$\text{No. de sc} = V_{ex}/\text{rendimiento del cemento} \text{ -----(8)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (8):

$$\text{No. de sc} = 226354/38.11 = 5939 \text{ sc}$$

$$\text{Cantidad de cemento} = 5939 \times 50 = 296950 \text{ kg}$$

9. Volumen de agua necesario para preparar la lechada (Vagua).

$$V_{agua} = \text{No de sc} \times \text{requerimiento de agua/sc} \text{ -----(9)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (9):

$$V_{agua} = 5939 \times 22.18 = 131727 \text{ lt}$$

10. Volumen de lodo para desplazar el cemento ( $V_d$ ).

$$V_d = VTR \times \text{Prof del cople} \text{ -----(10)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (10):

$$V_d = 114.16 \times 930 = 106169 \text{ lt} = 668 \text{ bl}$$

11. Tiempo requerido para desplazar el cemento ( $T_d$ ).

$$T_d = V_d / Q_d \text{ -----(11)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (11):

$$T_d = 668/7 = 95 \text{ min}$$

### Ejemplo III.2 Técnicas de Cementación Forzada.

-- Programa de cálculo de una cementación forzada.

Con los datos que a continuación se presentan, se realizó una cementación forzada como parte del programa de una reparación mayor efectuada a un pozo petrolero del distrito de ciudad Pemex, Tabasco.

#### 1. Objetivo de la operación.

Obturar el intervalo 1019-1022 m correspondiente a las arenas Z-13, bloque XII, por encontrarse invadido de agua salada y abrir a producción el intervalo 782-802 m. De la arena Z-6 bloque VI.

#### 2. Intervalo a cementar.

El intervalo por cementar es de 3 m según el programa, medido a una profundidad de 1019 a 1022 m.

#### 3. Datos del pozo.

- Tuberia de revestimiento 9<sup>5/8</sup>" J-55, 40 lb/pie de 0.0 a 399 m
- Tuberia de revestimiento 6<sup>5/8</sup>" J-55, 24 lb/pie de 0.0 a 1082 m
- PI 5110 lb/pg<sup>2</sup> = 359 kg/cm<sup>2</sup>
- PC 4560 lb/pg<sup>2</sup> = 321 kg/cm<sup>2</sup>
- Tuberia de producción 2<sup>3/8</sup>" N-80, 4.7 lb/pie
- PY 11200 lb/pg<sup>2</sup> = 788 kg/cm<sup>2</sup>
- PC 11780 lb/pg<sup>2</sup> = 828 kg/cm<sup>2</sup>
- Profundidad del cementador RTTS a 990 m

- Densidad del fluido de control = 1.20 gr/cm<sup>3</sup>
- Factor de seguridad = 10 (adim)
- Densidad de la terminación = 1.20 gr/cm<sup>3</sup>
- Densidad de la perforación = 1.4 gr/cm<sup>3</sup>
- Profundidad media de los disparos = 1020.5 m
- Resistencia a la presión interna de la TR = 359 kg/cm<sup>2</sup>
- Presión al colapso de la TR = 321 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4. Cálculo de las presiones máximas permisibles.

Desde el punto de vista mecánico, se pueden alcanzar presiones en la tubería de producción como en la tubería de revestimiento, las cuales a continuación se calculan.

a) Cálculo de la presión hidrostática (Ph) a la profundidad en que se encuentra el RTTS, con la ecuación (9) del tema III.2, se sustituyen valores.

$$P_h = (1.20 \times 990) / 10 = 119 \text{ kg/cm}^2 = 1700 \text{ (lb/pg}^2\text{)}$$

b) Presión máxima en la tubería de revestimiento (PmTR).

$$P_{mTR} = (P_{ITR} / F_{seg}) - [D_{md} \times (\rho_1 - \rho_2) / 10] \text{ -----(1)}$$

Donde:

PmTR = Presión máxima en tubería de revestimiento (kg/cm<sup>2</sup>)

PITR = Resistencia a la presión interna de la TR (kg/cm<sup>2</sup>)

Dmd = Profundidad media de los disparos (m)

$\rho_1$  = Densidad en la terminación (gr/cm<sup>3</sup>)

$\rho_2$  = Densidad en la perforación (gr/cm<sup>3</sup>)

Fseg = Factor de seguridad (adimensional)

Sustituyendo los valores en la ecuación (1).

$$P_{mTR} = (359 / 1.75) - [1020.5 \times (1.20 - 1.40) / 10] = 225 \text{ kg/cm}^2$$

c) Cálculo de la presión máxima en la tubería de producción (PmTP).

$$P_{mTP} = P_{aac} + (P_{cTR} / 1.125) - [(\rho_f \times D_c) / 10] \text{ -----(2)}$$

Donde:

PmTP = Presión máxima en la tubería de producción (kg/cm<sup>2</sup>)

Paac = Presión aplicada arriba del cementador (kg/cm<sup>2</sup>)

PcTR = Presión al colapso de la tubería de revestimiento (kg/cm<sup>2</sup>)

$\rho_f$  = Densidad del fluido de control (gr/cm<sup>3</sup>)

Dc = Profundidad del cementador (m)

1.125 = Factor de seguridad al colapso (adimensional)

$$P_{aac} = P_{mTR} + (\rho_1 \times D_c) / 10 \text{ -----(3)}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3).

$$P_{aac} = 225 + (1.20 \times 990) / 10 = 344 \text{ kg /cm}^2 = 4891 \text{ lb/pg}^2$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2).

$$P_{mTP} = 344 + (321 / 1.125) - [(1.54 \times 990) / 10] = 476.84 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{mTP} = 6783 \text{ lb/pg}^2$$

d) Cálculo de la presión de fractura (PF).

Con los datos de densidad de lodo y la profundidad de 990 m y por gráfica de gradiente de fractura, se encuentra un valor de 14.20 (valor de gradiente de fractura).

$$GF = 0.73873 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

La presión de fractura (PF) se calcula con la ecuación (5) del tema III.2 , se sustituyen valores.

$$PF = 0.73873 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} \times 3247 \text{ pie} = 2395.65 \text{ lb/pg}^2 = 169 \text{ kg/cm}^2$$

e) Cálculo de la presión superficial sin romper la formación (Ps).

$$Ps = PF + PTP + Pd - Ph \text{ -----(4)}$$

Donde:

- Ps = Presión superficial (kg/cm<sup>2</sup>)
- PF = Presión de fractura (kg/cm<sup>2</sup>)
- PTP = Caída de presión en la T.P. (kg/cm<sup>2</sup>)
- Pd = Caída de presión en los disparos (kg/cm<sup>2</sup>)
- Ph = Presión hidrostática (kg/cm<sup>2</sup>)

Sustituyendo los valores en la ecuación (4) se tiene:

$$Ps = 169 - 119 = 50 \text{ kg/cm}^2 = 711 \text{ (lb/pg}^2)$$

5. Cálculo de volúmenes.

a) Datos de laboratorio de la lechada.

- Densidad de la lechada = 1.85 gr/cm<sup>3</sup>
- Rendimiento de la lechada = 30 lt/sc
- Cantidad de agua = 22 lt/sc
- Tiempo bombeable = 2:42 h
- Aditivos = 40% HALAD-9

b) Cantidad de cemento a utilizar.

$$5 \text{ toneladas} = 5000 \text{ kg}$$

c) Cálculo del número de sacos (sc).

$$5000/50 = 100 \text{ sc}$$

d) Cálculo del volumen de la lechada.

$$100 \times 38 = 3800 \text{ lt} = 24 \text{ bl}$$

e) Cálculo de la cantidad de agua requerida.

$$100 \times 22 = 2200 \text{ lt} = 14 \text{ bl}$$

f) Cálculo de la capacidad de la tubería de producción.

$$990 \times 2.02 = 2000 \text{ lt} = 12 \text{ bl}$$

#### 6. Programa operativo.

a) Con la herramienta desanclada se establece circulación con el mismo fluido de control, verificando la densidad de entrada con la salida de 1.20 gr/cm<sup>3</sup> observando la presión de circulación.

b) Probar líneas superficiales con 5000 lb/pg<sup>2</sup> (350 kg/cm<sup>2</sup>).

c) Anclar la herramienta y probar efectividad de empaques de la misma, observándose satisfactoriamente.

d) Efectuar prueba de admisión al intervalo por cementar con los siguientes resultados:

- Presión de admisión = 126 kg/cm<sup>2</sup>
- Presión máxima de inyección = 154 kg/cm<sup>2</sup>
- Presión final = 77 kg/cm<sup>2</sup>
- Gasto = 0.5 bl/min
- Volumen bombeado = 1.5 m<sup>3</sup>
- Volumen regresado = 2 bl = 318 lt

c) Abrir la válvula de circulación de la herramienta.

f) Bombear bache de agua dulce 3 bl (477 lt).

g) Bombear lechada de cemento 9 bl (1426 lt).

h) Cerrar válvula de circulación RTTS.

i) Continuar bombeando lentamente lechada de cemento 15 bl (2374 lt).

j) Bombear segundo bache de agua dulce 5 bl (795 lt).

k) Volumen inyectado mediante la técnica de baja presión y con períodos de bombeo intermitente (24 bl de lechada + 5 bl de agua dulce).

Anotándose las siguientes presiones:

Presión máxima de inyección = 233 kg/cm<sup>2</sup>

Presión final = 224 kg/cm<sup>2</sup>

Gasto = 0.5 bl/min

l) Descargar presión a 0 kg/cm<sup>2</sup>, regresando 2 bl de lodo.

m) Desanclar RTTS y circular en inversa regresando 1 bl de lechada de cemento.

n) Esperar tiempo de fraguado y checar cima de cemento a 988 m.

Ejemplo III.3 Diseño de tapones de cemento y su colocación.

- Programa de cálculo para tapón de cemento por circulación.

Para efectuar el cálculo de un tapón por circulación, es necesario que se tomen en cuenta dos factores:

1. Altura que ocupará la lechada de cemento en las tuberías de revestimiento.

2. El volumen del fluido necesario para el desplazamiento, de tal manera que las columnas queden balanceadas.

### 1. Objetivo de la operación.

Colocar un tapón de cemento por circulación de 4100 a 4300 m para aislar un intervalo de 4150-4175 m. Se usarán 50 sacos de cemento clase "G" al 30% en peso por saco de cemento de arena silica, colocando baches separados de agua dulce que cubran 200 m en la tubería de trabajo y espacio anular.

### 2. Datos complementarios.

- Rendimiento por saco = 51.90 lt
- Agua necesaria = 29 lt por sc
- Densidad de lechada = 1.87 gr/cm<sup>3</sup>
- TR 7<sup>5/8</sup> pg 39 lb/pie, diámetro interior 4.276 pg
- TR 5 pg 18 lb/pie, de 3580 a 4350 m, diámetro interior 4.276 pg
- TP 3<sup>1/2</sup> pg 9.5 lb/pie grado "G", diámetro interior 2.992 pg
- TP 2<sup>7/8</sup> pg 8.7 lb/pie Hydril PH-6, diámetro interior 2.259 pg

### 3. Solución.

- a) Capacidad TP 2<sup>7/8</sup> pg  
Hydril PH-6 8.7 lb/pie  
Capacidad TP =  $0.5067 (d_i)^2$  lt/m  
Capacidad TP =  $0.5067 (2.259)^2 = 2.586$  lt/m
- b) Capacidad TP 3<sup>1/2</sup> pg IF 9.5 lb/pie  
Capacidad TP =  $0.5067 (2.992)^2 = 4.536$  lt/m
- c) Capacidad TR 5 pg 18 lb/pie  
Capacidad TR =  $0.5067 (4.276)^2 = 9.26$  lt/m
- d) Capacidad espacio anular  
(TR 5 pg y TP 2<sup>7/8</sup> pg)  
Capacidad EA =  $0.5067 (d^2 - d_1^2)$

$$\text{Capacidad EA} = 0.5067 (4.276^2 - 2.875^2) = 5.076 \text{ lt/m}$$

e) Cálculo del volumen de baches separadores ( $V_b$ ).

1er. bache:

$$\begin{aligned} V_b &= \text{Capacidad EA} \times \text{altura por cubrir} \\ V_b &= 5.0766 \text{ lt/m} \times 200 \text{ m} = 1015.32 \text{ lt} \end{aligned}$$

2o. bache:

$$\begin{aligned} V_b &= \text{Capacidad T.P. } 27^{\text{th}} \text{ pg} \times \text{altura por cubrir} \\ V_b &= 2.586 \text{ lt/m} \times 200 \text{ m} = 517.2 \text{ lt} \end{aligned}$$

Volumen total de los baches separadores ( $V_{tb}$ ).

$$V_{tb} = 1015.32 \text{ lt} + 517.2 \text{ lt} = 1532.52 \text{ lt}$$

Una vez que se han calculado los volúmenes, se procede a comprobar la altura que ocupan los baches ( $h_A$ ), tanto en el E.A. como en el interior de la T.P., para lo cual utilizaremos la siguiente expresión:

$$h_A = V_{tb} / (B + VEA) \text{ -----(1)}$$

Donde:

$h_A$  = Altura que ocupan los baches (m)

$V_{tb}$  = Volumen total de baches (lt)

$B$  = Capacidad TP (lt/m)

$VEA$  = Capacidad EA (lt/m)

Sustituyendo valores en la ecuación (1).

$$h_A = 1532.52 \text{ lt} / (2.586 \text{ lt/m} + 5.0766 \text{ lt/m}) = 200 \text{ m}$$

f) Cálculo del volumen de la lechada ( $V_L$ ).

$$V_L = RS \times Cs \text{ -----(2)}$$

Donde:

VL = Volumen de lechada (lt)

RS = Rendimiento de lechada por saco (lt/sc)

Cs = Cantidad sacos de cemento (sc)

Sustituyendo valores en la ecuación (2).

$$VL = 51.90 \text{ lt/sc} \times 50 \text{ sc} = 2595 \text{ lt}$$

g) Cálculo del agua necesaria para la mezcla (Am).

$$Am = Va/s \times Cs \text{ -----(3)}$$

Donde:

Am = Agua necesaria (lt)

Va/s = Volumen de agua por saco (lt/sc)

Sustituyendo valores en la ecuación (3).

$$Am = 29 \text{ lt/sc} \times 50 \text{ sc} = 1450 \text{ lt}$$

h) Cálculo de la altura balanceada (hL) que ocupa la lechada en el espacio anular y la tubería de producción, para esto se utiliza la expresión siguiente:

$$hL = VL / VEA+B \text{ -----(4)}$$

Donde:

hL = Altura balanceada que ocupa la lechada (m)

VL = Volumen de lechada (lt)

B = Capacidad de la tubería de producción (lt/m)

VEA = Capacidad de espacio anular (lt/m)

Sustituyendo valores en la ecuación (4).

$$hl = 2595 \text{ lt} / (5.0766 \text{ lt/m} + 2.586 \text{ lt/m}) = 2595 \text{ lt} / (7.662 \text{ lt/m})$$

$$hl = 338 \text{ m}$$

Estos valores indican que la lechada ocupará 338 m, tanto en el espacio anular como en el interior de la tubería de producción, quedando así balanceada la altura de la lechada.

i) Cálculo del fluido de control para el desplazamiento.

En la figura 3-7 se presenta el estado mecánico del pozo, se indica que se colocará el tapón de cemento en la tubería de revestimiento de 5" y en la tubería de producción de 27/8", por lo tanto, se calcula el volumen de fluido de desplazamiento como sigue:

- Se suma la altura que ocupa el bache de agua en la tubería de producción a la altura que ocupa la lechada en la misma tubería y el resultado se resta a la longitud total de tubería de producción de 27/8".

Esta longitud restante de tubería de producción, así como la longitud total de tubería de producción de 31/2", multiplicados por su capacidad correspondiente, se suman los volúmenes obtenidos y el valor resultante será el volumen necesario para el desplazamiento.

- Una vez efectuados los cálculos, se anotan los valores obtenidos en un esquema hecho previamente, como se presenta en la figura 3-8.

4. Solución del esquema en la figura 3-8:

$$VF = [LTP \ 27/8'' - (hA + hl)] \text{ capTP } 27/8'' + (LTP \ 31/2'' \times \text{capTP } 31/2'') \text{ -----(5)}$$

Donde:

VF = Volumen de fluido de control para desplazamiento (lt)

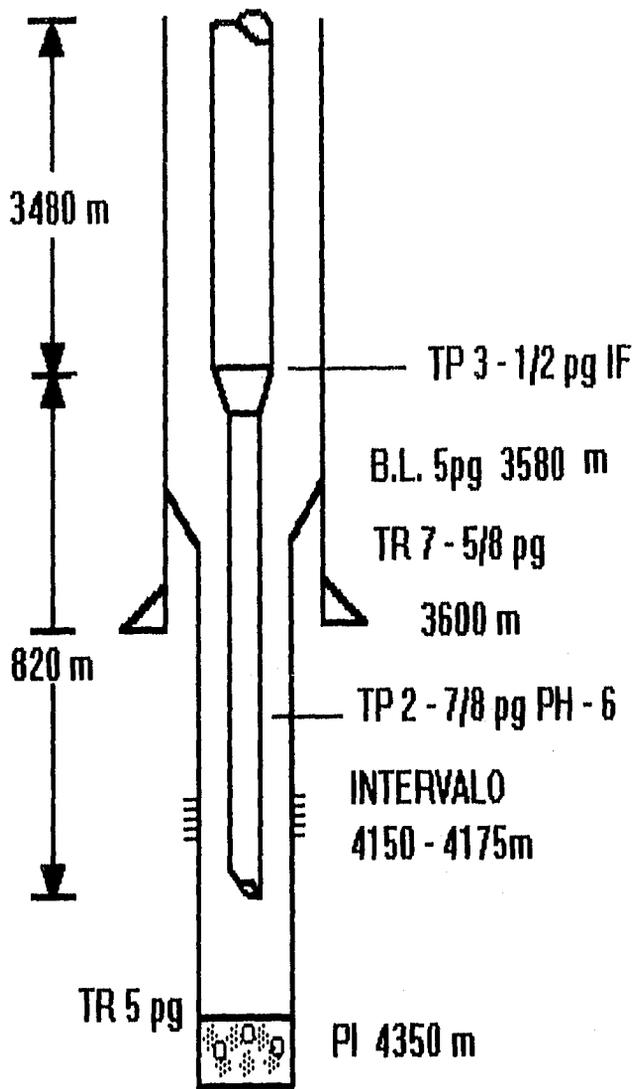


FIGURA 3-7 ESTADO MECANICO DEL POZO

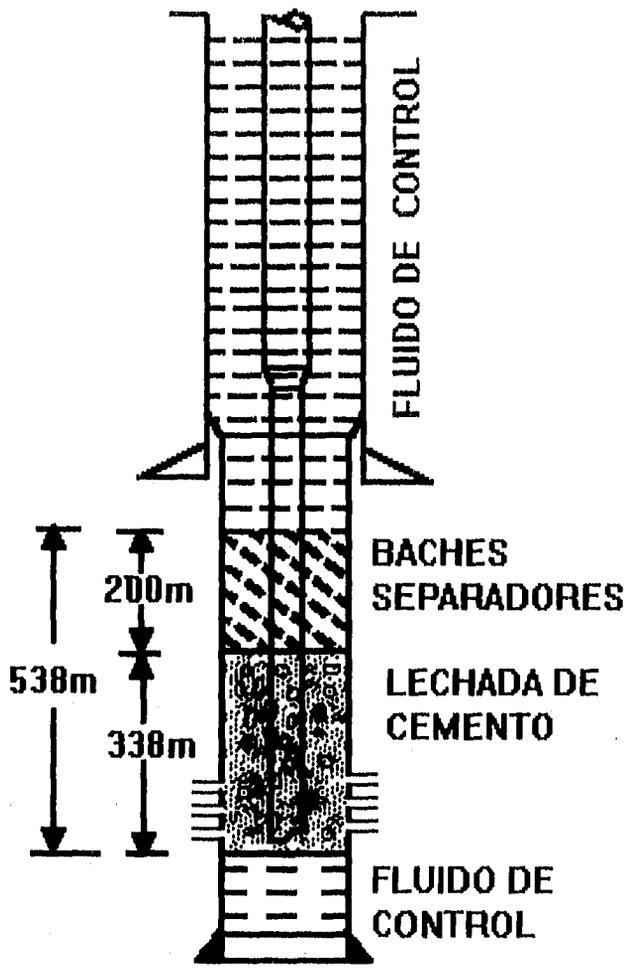


FIGURA 3-8 RESULTADO DE LA OPERACION

Sustituyendo valores en la ecuación (5).

$$VF = \{820 \text{ m} - (200 \text{ m} + 338 \text{ m})\} 2.586 \text{ lt/m} + (3480 \text{ m} \times 4.536 \text{ lt/m})$$

$$VF = (820 \text{ m} - 538 \text{ m}) 2.586 \text{ lt/m} + 15785.28 \text{ lt}$$

$$VF = 729.25 \text{ lt} + 15785.28 \text{ lt} = 16514.53 \text{ lt}$$

#### 5. Programa de operación.

1. Bajar con sarta de trabajo franca, combinada 2<sup>7/8</sup>" Hydril PH-6, 8.7 lb/pie y tubería de 3<sup>1/2</sup>" IF 9.5 lb/pie, grado "G" hasta 4300 m.
2. Comprobar la operación efectiva del preventor para arietes de tubería.
3. Instalar conexiones de la unidad cementadora a la sarta de tubería de trabajo y espacio anular.
4. Probar conexiones de la unidad hasta la válvula instalada en la tubería de producción, aplicando un valor de presión superior a la esperada durante la operación.
5. Circular para comprobar el llenado del espacio anular y la sarta de trabajo.
6. Bombear el 1er. bache de separación, 1015.32 lt.
7. Mezclar y bombear la lechada de cemento, 2595 lt.
8. Bombear el 2o. bache de separación, 517.2 lt.
9. Desplazar el lapón con 16493.65 lt. de fluido de control.
10. Desmantelar las conexiones de superficie y levantar la sarta hasta 4100 m.
11. Cerrar el preventor de arietes para tubería y circular inverso el exceso de cemento, aproximadamente 1033.5 lt.

12. Abrir el preventor y sacar la tubería.

6. Tapón de cemento por desplazamiento.

Debido a que este tipo de tapón es poco usual, únicamente se mencionarán los pasos más importantes.

- Procedimiento de cálculo:

a) Calcular el volumen de lechada, tal como se hizo por tapón por circulación.

b) Calcular la capacidad total de la tubería de producción.

c) Restar el volumen de la lechada a la capacidad de la tubería de producción y se obtendrá el volumen para desplazar.

- Programa de operación.

1. Introducir la tubería de producción hasta la profundidad que se va a considerar como cima.

2. Instalar la válvula de seguridad en la tubería, así como las conexiones de bombeo de la unidad.

3. Cerrar la válvula de seguridad y pruebe las conexiones de la unidad de bombeo, con la presión adecuada.

4. Mezclar y bombear la lechada de cemento.

5. Desplazar con el volumen calculado, de tal manera que quede balanceado en el extremo de la tubería de producción.

6. Desmantelar conexiones de bombeo de la tubería y sacar a la superficie lentamente.

7. Esperar fraguado, el tiempo programado.

## CAPITULO IV

### MIGRACION DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR

El objetivo en este capítulo, es conocer el problema de migración de gas en el espacio anular, los daños que provoca y como poder dar solución a éste.

Se debe mencionar que no siempre se logra realizar con éxito la operación de cementación, ya que aunque el proceso de la operación fue el adecuado, siempre se corre el riesgo de que esta fracase o se dañe cuando existe migración de gas o canalización de agua en el espacio anular, este problema debe ser solucionado mediante alguna de las técnicas creadas para ello. Se tiene que verificar si se dañó el cemento y si esto resulta positivo entonces se tendrá que corregir el daño y en ocasiones se repetirá la operación generando así pérdidas económicas y de tiempo.

Las técnicas para prevenir la migración del gas al pozo, son usadas bajo ciertos criterios y dependiendo de las circunstancias en las que se presenta el problema, no se puede predecir en que momento terminará de emigrar el gas, ni se cuenta con una solución definitiva.

## MIGRACION DE GAS EN EL ESPACIO ANULAR.

La migración de gas en el espacio anular puede ocurrir en la perforación del pozo petrolero, este es uno de los problemas más graves que se presentan en la perforación. Consiste en la invasión del fluido proveniente de una formación por el espacio anular, emigrando a una zona de baja presión.

La migración de gas es muy frecuente y es un gran problema que hay que evitar, también es llamada comunicación de gas, flujo de fluidos en el espacio anular. Esta migración puede evitarse cuando la presión durante la perforación y cementación es controlada en rangos en donde se verifica el menor margen de presión del gas. En un pozo productor la migración del gas puede ocasionar que el pozo se depresione y la producción de éste disminuya.

Cuando en un pozo se tienen dos intervalos productores, siendo el primero de alta presión y el segundo de baja puede ocasionar que exista una comunicación de las zonas productoras del pozo, emigrando el gas de alta presión a la zona de baja presión, ocasionando que un pozo vecino disminuya la producción de gas. Este caso se muestra en la figura 4-1.

### -- Consecuencias prácticas de la migración de gas.

Las consecuencias de la migración de gas son numerosas después de la cementación, pero no inmediatamente detectables a tal extremo de manifestarse en la superficie. La presión del flujo de gas se manifiesta en la cabeza del pozo, lo indicado es realizar una cementación forzada hasta que el flujo de gas se cierre y la presión de flujo de gas se reduzca a un nivel compatible con la presión anteriormente establecida.

La eficiencia de una cementación forzada en algunas circunstancias es muy pobre por tres razones esenciales:

1. Los canales de gas son difíciles de localizar, especialmente si son muy delgados (fracciones de milímetro).

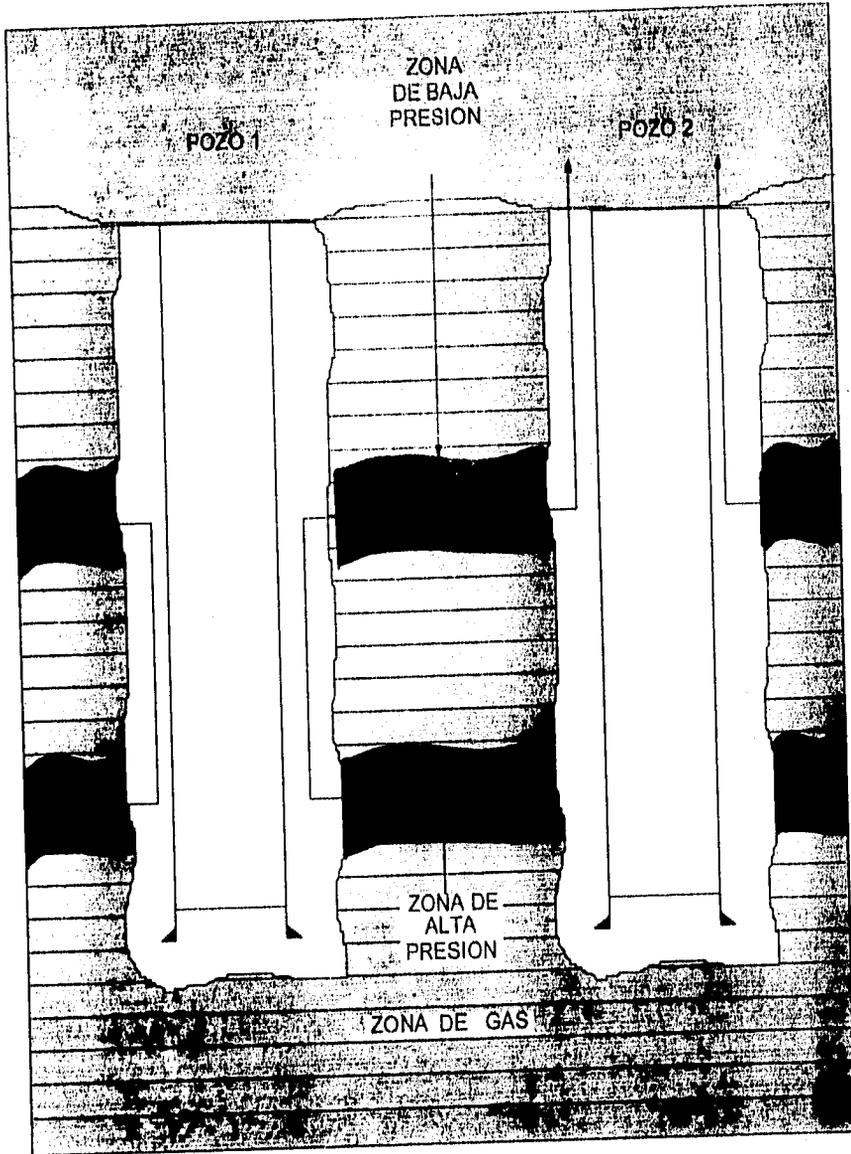


FIGURA 4-1 MIGRACION DE GAS POR DIFERENCIA DE PRESIONES

2. Los canales de gas pueden ser tan pequeños para llenarlos con cemento.
3. La presión ejercida durante el trabajo de recementación, es algunas veces suficiente para romper el cemento por debajo de los enlaces, incluso iniciar el fracturamiento de la formación.

- Procesos físicos de la migración de gas.

La migración del gas en el espacio anular después de la cementación primaria es un problema latente, pero no siempre se detecta inmediatamente. La migración de gas es un problema complejo que involucra la densidad del fluido de control, remoción de sólidos, propiedades de las lechadas de cemento y la adherencia de la tubería de revestimiento-cemento-formación.

Al emigrar el gas y colocarse en el espacio anular (espacio entre la tubería y la formación), forma una columna de gas que altera las características de la mezcla de cemento colocada, provocando una canalización de la mezcla que con el tiempo se debilitará provocando que exista la migración del gas.

- Remoción de lodos.

La remoción de lodo y la buena adherencia tubería de revestimiento-cemento-formación, son factores importantes que se deben tomar en cuenta para evitar la migración del gas en el espacio anular, todas estas causas son importantes en la prevención de dicha migración, pero la más importante es que el fluido del espacio anular tenga las características adecuadas. Una buena mezcla de cemento evita que se origine flujo de gas en la lechada.

- Técnicas para minimizar la migración de gas.

1. Tener buenas condiciones del lodo.
2. La tubería de revestimiento debe tener una adecuada centralización.

3. Evitar el movimiento de la tubería de revestimiento durante la circulación y cementación.
4. Las propiedades del cemento y las del fluido deben ser compatibles (densidad, pérdida de fluido y control de sólidos).
5. Se debe determinar correctamente el volumen de la lechada.
6. Determinar el régimen de flujo por medio de programas de computo.

- Control de la densidad.

El control inmediato del gas después de la cementación es muy similar al control durante la perforación del pozo, por esta razón, uno de los primeros pasos para controlar este problema, es aumentar la densidad hasta un límite, para no provocar una pérdida de circulación por el aumento de la densidad del fluido. Se recomienda circular el fluido antes de la cementación para remover las burbujas de gas que se pueden encontrar en el espacio anular, ya que estas reducen el peso de la columna hidrostática.

El agua libre es un fenómeno que debe ser regulado para evitar el descontrol del pozo durante la perforación y cementación, éste ocurre con mayor intensidad durante los trabajos de cementación.

La diferencia entre la densidad del volumen limpiador y la lechada de cemento, provoca que la presión hidrostática en la cara de la formación no sea exactamente constante durante los trabajos de cementación. Si la presión hidrostática en cierto tiempo disminuye, la presión del gas en la formación aumenta, el gas puede ser inducido, ya que la presión hidrostática ha disminuido y esto puede ser un proceso irreversible debido a que el gas a entrado al espacio anular.

Consecuentemente, los trabajos de cementación pueden realizarse con base a programas de cómputo y por medio de análisis se podrán determinar las zonas críticas de presión de poro y presión de fractura. Las pequeñas variaciones de la densidad que provienen del lodo y el volumen limpiador

del cemento pueden minimizar el fenómeno de agua libre, por esta razón, el uso de volúmenes limpiadores de baja densidad, pueden ser prohibidos en pozos de alta presión, la presión hidrostática proveniente de la columna del fluido en el espacio anular debe ser mayor que la presión del gas de formación, si esto no se presenta la migración del gas puede ocurrir. Un punto final puede ser lo concerniente al control de la densidad durante las operaciones de cementación.

Las fluctuaciones de la densidad pueden ocurrir durante el curso de estos trabajos, resultando una columna de cemento no uniforme en el espacio anular, estas condiciones pueden causar el asentamiento de sólidos y desarrollo de agua-libre.

En consecuencia los trabajos de cementación pueden ser designados y desempeñados con un simulador, la presión de las zonas críticas se mantienen entre la presión de formación y la presión de fractura, como se muestra en la figura 4-2.

- Pérdida del fluido de control.

La pérdida del fluido de control proveniente de la mezcla de cemento dentro de la formación es un factor importante que contribuye a la migración de gas en los pozos. La influencia respectiva de la pérdida del fluido de control y la gelación de las mezclas en el cemento no han sido totalmente entendidas, pero indica que un retardo en la gelación originada por la pérdida del fluido podría restringir la comunicación de la presión hidrostática.

Antes de fraguar el cemento en el espacio anular es conveniente controlar la pérdida del fluido, de no ser así la presión hidrostática anular excederá a la presión de formación. Cuando existen bajas permeabilidades, el proceso de pérdida del fluido es lento y se puede detener cuando la presión hidrostática y la de formación se equilibran, no permitiendo el cambio de volumen de agua en la mezcla. Consecuentemente por la baja compresión del cemento, la migración del gas puede ser inducida.



#### - Desarrollo de agua libre.

Este efecto del cemento con la separación del agua libre fue estudiada y discutida en 1979, se realizó un experimento a través de una prueba piloto, en la cual se anunciaba que el agua libre no es un factor influyente con respecto al flujo de gas en el espacio anular, posteriormente construyeron un modelo de acrílico de 2.74 m con una inclinación de 70°C, inyectando el gas a diversas presiones, dicho modelo estaba conectado a un sensor. Como se indica en la figura 4-3.

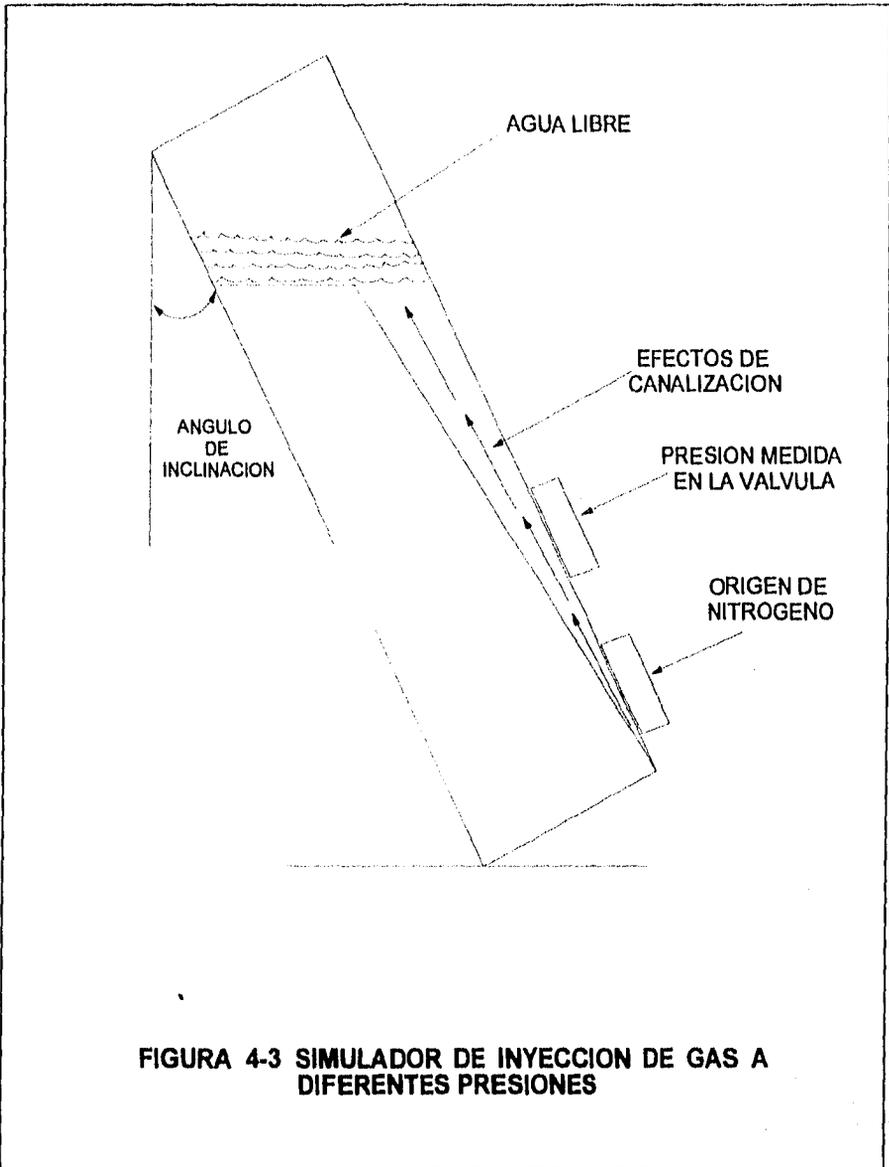
Otros experimentos posteriormente condujeron a que en los pozos desviados, el agua libre puede provocar una canalización con la profundidad, donde inicia la desviación del pozo, resultando con esto, un camino para la migración del gas, por esta razón se recomienda que no exista agua libre en el fraguado de cemento.

Muchos trabajos se han llevado a cabo para determinar las principales causas de la migración de gas en el espacio anular, los problemas han persistido aún cuando la densidad del fluido en el espacio anular es tal que la columna hidrostática inicial es mucho más alta que la presión del gas, encontrándose el agua libre presente y el control de la pérdida del fluido es extremadamente bien vigilado.

#### - Disminución de la presión debido a la gelación.

En 1970, notaron que la tixotropía o gelación de los fluidos para perforación, fue relevante con respecto a la reducción de la columna hidrostática, experimentaron primero a baja presión la cuantificación de los efectos de la gelación en combinación con la presión hidrostática, dió resultados inconclusos; pero en los experimentos a alta presión indicaron que no hubo cambio de presión, esto tal vez fue más probable relacionarlo a las deficiencias del diseño experimental.

Es sugestivo notar, la reducción de la presión hidrostática durante la hidratación del cemento, mucho antes había sido demostrada en el laboratorio y confirmada en el campo de mediciones en 1963 y en la U.R.S.S. en 1971, estudios similares fueron hechos en 1982, donde el uso de



**FIGURA 4-3 SIMULADOR DE INYECCION DE GAS A DIFERENTES PRESIONES**

sensores externos de revestimientos, permitieron observar la temperatura y las fluctuaciones de presión, así como la emisión de la presión aplicada en la superficie.

De esta información fue posible originar el alcance del movimiento vertical del fluido para localizar la cima de la columna del cemento y medir el tiempo de fraguado a diferentes profundidades.

- Restricción de la presión hidrostática debido a la hidratación del cemento.

En 1979, fue medida la transmisión de la presión hidrostática del fraguado del cemento en una celda de 14 m de largo sin fuente de presión externa, se muestra en la figura 4-4.

Se demostró que la pendiente de la presión hidrostática disminuye gradualmente al mezclarse con agua. Cuando el fraguado del cemento empieza la emisión de la presión hidrostática, rápidamente se acerca a cero, como se muestra en la figura 4-5.

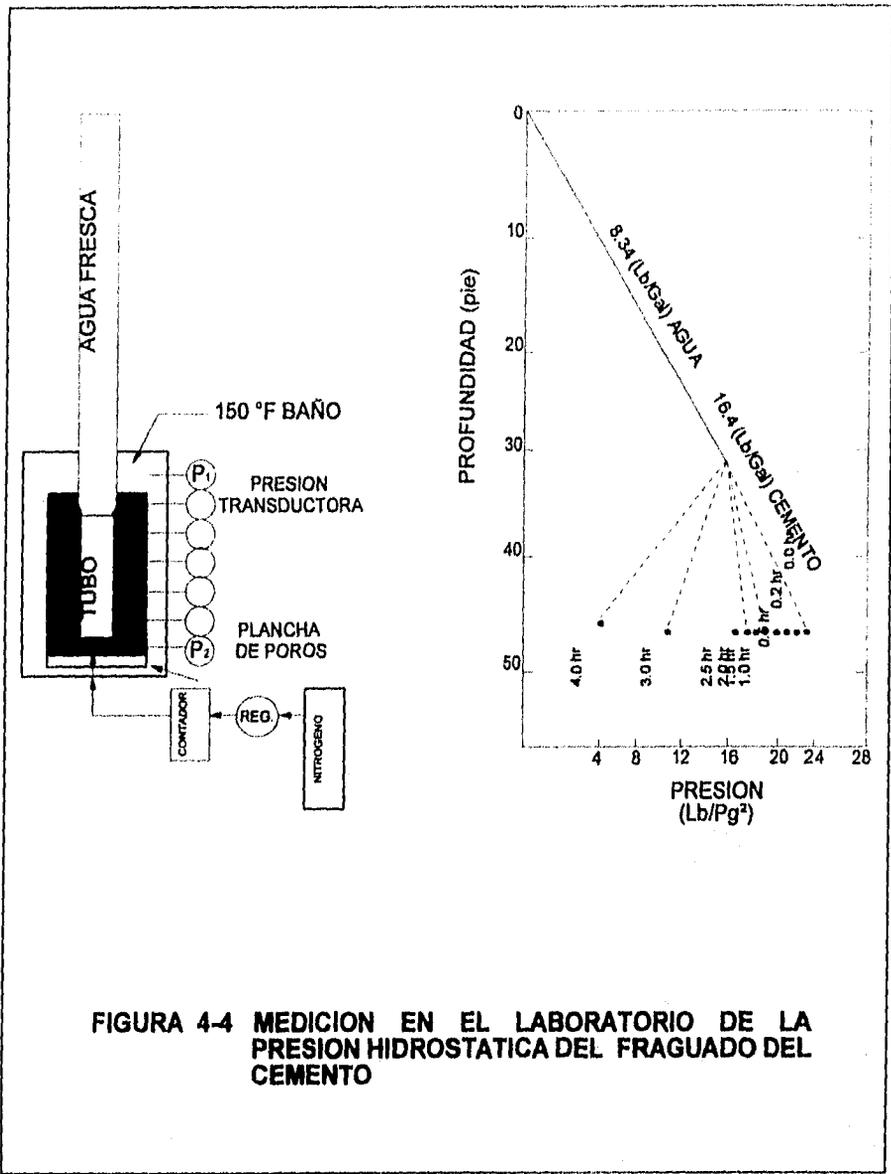
La reducción de la presión hidrostática es el resultado del encogimiento del cemento y la pérdida del fluido, en este punto la presión de poro no puede ser controlada por el fluido de la columna superior.

- Presión hidrostática y presión del fraguado del gel.

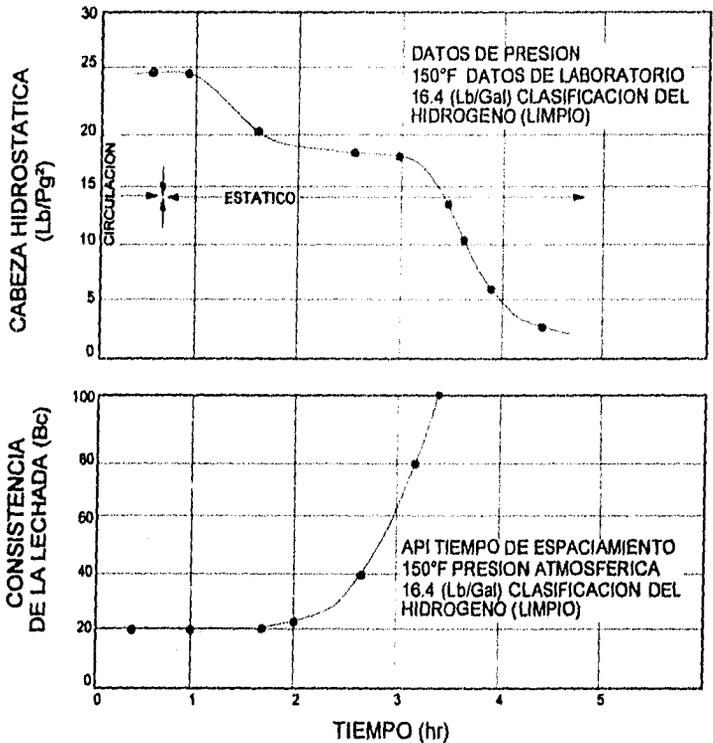
En 1982, se relacionó la cinética de la reducción de la presión hidrostática con el fraguado del cemento, el desarrollo de fuerza-gel, el volumen de la pérdida del fluido, la reducción del volumen por la hidratación y el factor de compresibilidad.

De este trabajo resultó un método empírico para predecir la migración de gas y la ecuación (1) fue derivada de la figura 4-5.

$$P_h - P_i = (4 \times SCS \times L / dh - dp) \text{ o } (FLVR + HVR / CF) \text{ ----- (1)}$$



**FIGURA 4-4 MEDICION EN EL LABORATORIO DE LA PRESION HIDROSTATICA DEL FRAGUADO DEL CEMENTO**



**FIGURA 4-5 GRAFICA DE LA PRESION HIDROSTATICA DEL CEMENTO**

Donde:

$P_h - P_i$  = Cambio de presión hidrostática a través de la columna (lb/pg<sup>2</sup>)

$d_h$  = Diámetro del agujero (pg)

$d_p$  = Diámetro de la tubería (pg)

SGS = Fuerza estática del gel (lb)

$L$  = Longitud (pie)

FLVR = Reducción del volumen de pérdida del fluido (lt)

HVR = Reducción del volumen de hidratación, factor de compresibilidad de la lechada (adimensional)

En 1979, se había introducido el concepto de "Estado de Transición", es un periodo intermedio en el cual el cemento no es fluido ni sólido y el fraguado pierde su habilidad de transmitir presión hidrostática. El concepto de estado de transición fue cuantificado por una transición de tiempo, comenzando con la primera fuerza a medir del gel y terminando cuando el gas no podía ser eliminado del cemento gelado.

Al no poder ser eliminado el gas del cemento, se debe considerar como un tipo particular de migración del gas, donde el gas en forma de burbujas invade el fraguado y crecen debido a los efectos de flotación, sin embargo el gas puede también fluir en los microporos de la estructura del cemento gelado o directamente a lo largo del tubo-cemento y/o formación-cemento. Cualquiera de estos procesos puede ayudar al fenómeno de migración de gas y esto limita la aplicación de la ecuación (1).

- Migración del gas a través de la estructura del cemento gelado.

El concepto de migración de gas a través de la estructura del microporo de cemento, así como la separación del gas dentro del fraguado gelado. Durante el período de reducción de la presión hidrostática, se midió la permeabilidad de la matriz del cemento proporcionando valores elevados como de 300 md.

En 1982, Se propuso un mecanismo de migración de gas, basado en un experimento de laboratorio por el cual el gas primero invade los espacios porosos del cemento y posteriormente penetra a la matriz del cemento.

consecuentemente el proceso de hidratación ocurre cercanamente al espacio del poro.

Este proceso fue mejorado en 1984, estudiaron la distribución y tamaño del poro de la lechada de cemento durante el espaciado y fraguado, se demostró que la existencia de la libre porosidad compuesta de poros conectados en el pozo, los cuales aparecen al inicio del periodo del fraguado. Se continuó afirmando que la migración es manejada por una permeabilidad efectiva e inestable a través de los poros del cemento, un estado pseudoestacionario se obtiene cuando la comunicación ha sido establecido a través de la columna de cemento y los canales del gas han llegado a ser de un tamaño determinado.

En 1986, se confirmaron y ampliaron los primeros resultados obtenidos en 1979, concluyendo que cuando una lechada estable presenta la creación de partículas pequeñas, las cuales son encontradas en estado de transición y geladas, ocasionan al inicio del fraguado que la presión hidrostática del agua de la mezcla cause que la presión porosa disminuya más adelante.

Confirmaron la validez de la fuerza estática del gel para describir la restricción potencial de la presión, esto se expresa en la ecuación (1). Esta ecuación actúa como una sola fase coherente "una fase del cuerpo", esta ecuación no es válida en casos donde el fraguado es depresionado internamente por la pérdida de agua o hidratación.

- Disminución de la presión de poro descrita por la teoría de mecánica del suelo.

Se formalizó más adelante el proceso de reducción de presión tomando como medio las similitudes entre la columna de cemento y una capa de suelo emprendiendo algo de consolidación, empleando la "Teoría de Mecánica de Suelos" y asumiendo que el fraguado de cemento se comporta como un suelo virgen sedimentario.

El fraguado de cemento es descrito por la "Ley de Terzaghi"

$$T = T' + U \text{ ----- (2)}$$

Donde:

T = Esfuerzo total ejercido en una profundidad lineal dada

T' = Esfuerzo efectivo intergranular referido al desarrollo de la resistencia del gel (Pa)

U = Presión de poro o presión hidrostática intersticial

T es constante e igual a la presión de sobre carga debido a la columna del fluido.

$$T = g_s (z) \cos \theta z(dz) \text{ -----(3)}$$

Donde:

$g_s$  = Gravedad específica de la lechada a la profundidad "z" (adimensional)

$\theta$  = Desviación angular

dz = Diferencia de profundidad

El esfuerzo efectivo T', está relacionado a la fuerza estática del gel determinado en el laboratorio, a través de la ecuación del esfuerzo cortante:

$$T' = 4 \times L \times SGS / (dh-dp) \text{ -----(4)}$$

Donde:

(dh-dp) = Diámetro del espacio anular (pg)

Combinando las ecuaciones (3) y (4) se obtiene.

$$U = T - T' = Prg H \cos \theta - 4 \times L \times SGS / dh-dp \text{ -----(5)}$$

La presión hidrostática "U" ejercida por la lechada en frente de la formación varía como la función de la resistencia estática del gel T', sin embargo el valor exacto de U en un tiempo t puede ser diferente al dado

por la ecuación (5), debido a los efectos cinéticos. Cuando la gelación ocurre durante la inducción del periodo inactivo no hay hidratación significativa de los granos del cemento, debido a esto ocurre un incremento de fuerzas entre los granos, provocado por la fuerza electrostática y además los componentes químicos se precipitan.

En una primera aproximación el esfuerzo total  $T$  sigue igual, la transferencia de  $U$  a  $T$  ocurre debido a que  $T$  incrementa a un punto donde la lechada se transforma en sólido, en este momento la caída de presión intersticial es el gradiente del agua.

La caída de presión debido al gradiente del agua es causada por el encogimiento, las ecuaciones son las siguientes.

$$U = P_{ug} Ht \cos \theta \text{ -----(6)}$$

$$T = (g_s - g_w) Ht \cos \theta \text{ -----(7)}$$

Donde:

$g_w$  = Gravedad específica del agua intersticial (adimensional)

$Ht$  = Profundidad total (pie)

- Reducción de la presión de poro debido al encogimiento del agua.

Cuando el periodo de fraguado se encuentra en la fase de endurecimiento y la hidratación se acelera, la presión intergranular aumenta sobre el valor obtenido en la ecuación (7) por el desarrollo de silicato de calcio hidratado, en esta etapa no existen cambios de volúmenes y la presión de poro " $U$ " permanece en el nivel dado por la ecuación (6), donde el cemento puede comportarse como una formación porosa.

La hidratación del cemento es causada por una reducción absoluta del volumen del cemento matriz llamada también "contracción química del cemento", la cual es un parámetro que depende del tiempo, empieza durante el tiempo inicial y se estabiliza al final. La contracción química se origina debido a una porosidad secundaria compuesta principalmente de

poros conductivos y de agua libre, al mismo tiempo el agua es bloqueada dentro de los poros a través de fuerzas capilares y fisicoquímicas no siendo movidas más allá del gradiente de presión hidrostática, la combinación del encogimiento químico y la porosidad secundaria origina la disminución de los poros del cemento.

-- Migración del gas después de la cementación.

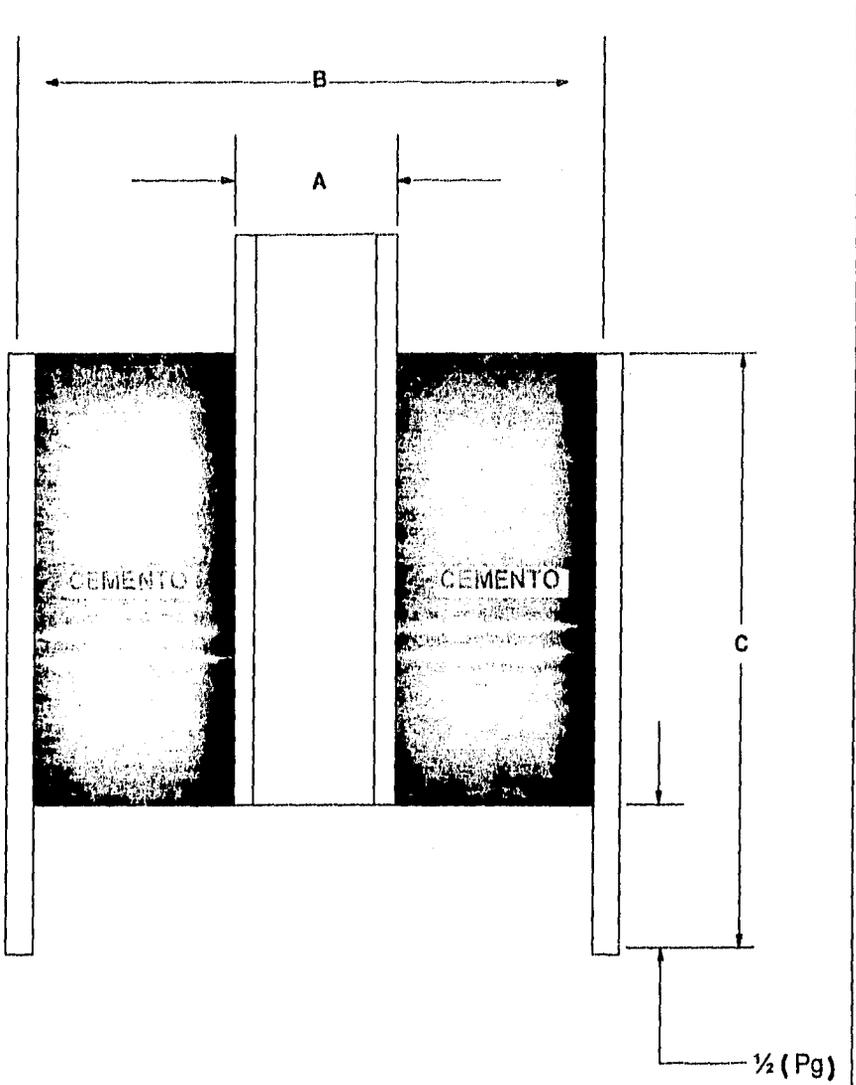
Durante la fase de endurecimiento del cemento en el espacio anular, el cemento se transforma en un sólido de muy baja permeabilidad a un nivel de 1 micro darcy, dando como resultado que el gas no pueda emigrar a ningún gasto detectable dentro de los poros de la matriz del cemento parcialmente saturados con agua, cementos de baja densidad con volúmenes excesivos de agua proporcionan valores de permeabilidad de 0.5 a 5.0 md, ocasionando que el gas fluya a bajos volúmenes dentro de la matriz del cemento y ocasionalmente alcanza la superficie. Estos eventos pueden tomar semanas o meses en manifestarse como un fenómeno evaluable en la superficie donde aparecen frecuentemente como una baja presión de formación en el espacio anular.

-- Resistencia de la adherencia hidráulica al corte.

Una vez que el cemento ha sido introducido a la profundidad deseada en el espacio anular, el gas puede emigrar de la formación a través del cemento o de la tubería de revestimiento-cemento, originando la formación de microanulos en la interfase.

La fuerza de adherencia entre tubería de revestimiento-cemento y formación-cemento han sido por mucho tiempo un tema de discusión, una buena adherencia es el principal objetivo para la cementación primaria.

En 1961, establecieron un procedimiento de laboratorio para determinar el tiempo mínimo de fraguado, concluyeron que la fuerza de adherencia al corte dentro de un error experimental es casi independiente de las dimensiones y el mecanismo de resistencia de adherencia entre la tubería de revestimiento-cemento, se muestra en la figura 4-6.



**FIGURA 4-6 DETERMINACION DEL TIEMPO DE FRAGUADO  
MEDIDO EN EL LABORATORIO**

También señalaron que la adherencia al cemento se relaciona a diversos factores:

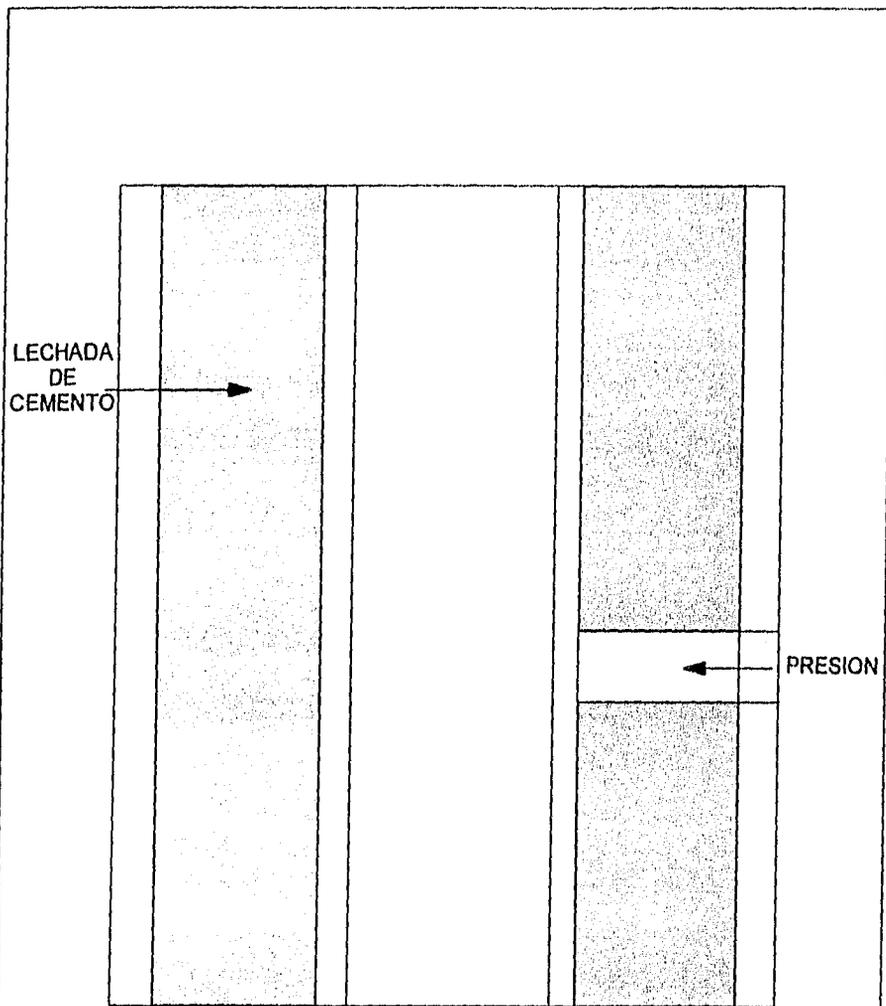
1. Una relación positiva entre la adherencia al cemento y la resistencia de la tensión del cemento depende del sistema de composición, la temperatura, la presión y del tiempo de fraguado.
2. La fuerza de adherencia de la tubería de revestimiento-cemento se reduce significativamente si la tubería de revestimiento esta mojada con lodo.
3. La fuerza de adherencia esta relacionada a la naturaleza física de la superficie del tubo.

Evans y Carler presentaron un equipo de laboratorio el cual media directamente la resistencia de la adherencia hidraulica de la tubería-formación como se muestra en las figuras 4-7a y 4-7b.

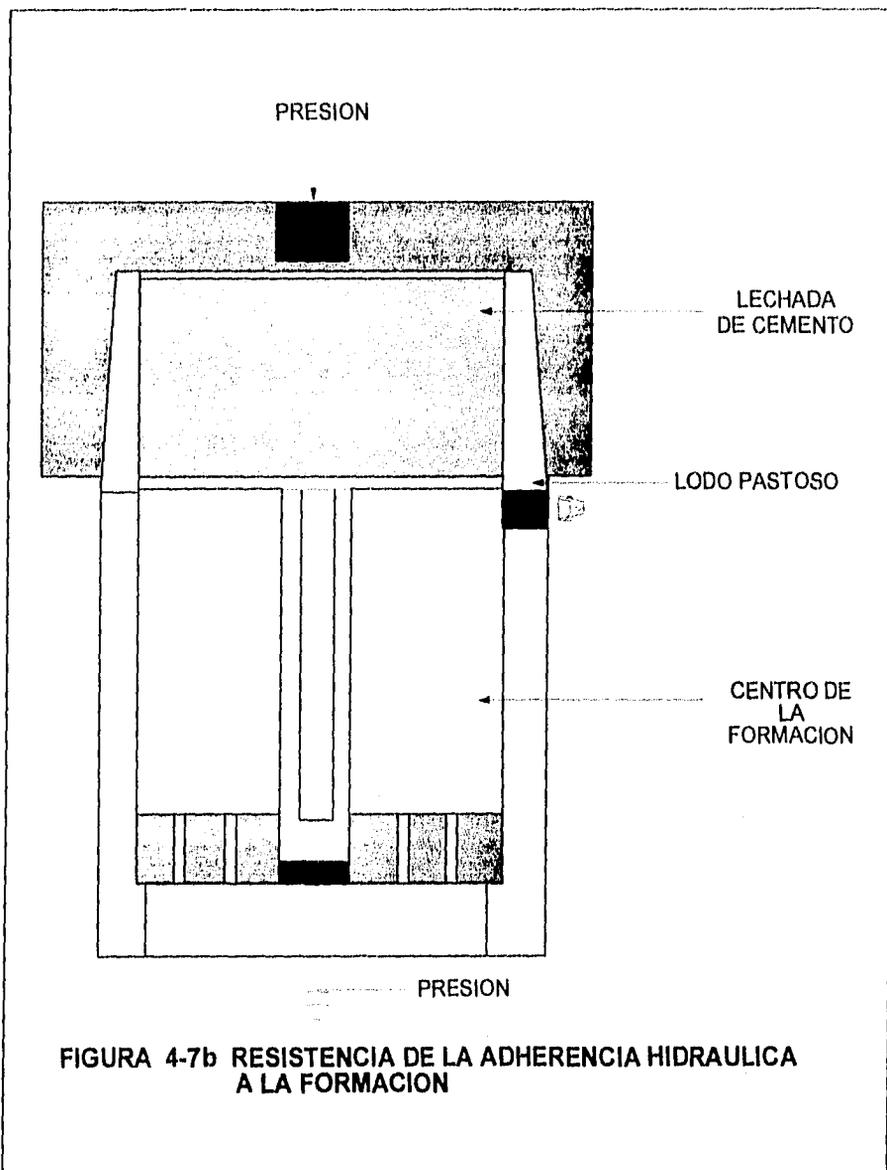
Aunque ellos no encontraron una correlación entre la adherencia y la resistencia de la adherencia hidráulica, ambas propiedades fueron encontradas variando las funciones del mismo parametro externo, estas disminuyen con la reducción de la rugosidad de la superficie, con la falta de remoción del lodo y con las superficies mojadas de aceite. Un cambio en el interior de la tubería de revestimiento por presión y/o temperatura como consecuencia del esfuerzo de estimulación o hidratación del cemento causa un cambio correspondiente en la resistencia de la adherencia.

Finalmente concluyeron que la falla de la adherencia es principalmente una función de la expansión o contracción de la tubería y la viscosidad del fluido presurizado, en este último parametro de la resistencia de la adherencia hidráulica con respecto al gas, se encontro en un 5% de la cantidad de agua con gastos de propagación en exceso de 20 pies/min.

Un estudio separado concierne a la adherencia y resistencia de la tensión fue dirigido en 1963, llegaron a conclusiones similares mostrando que la adherencia del cemento a la tubería de revestimiento y a la formación están relacionadas a fuerzas adhesivas en la interfase tubería de



**FIGURA 4-7a RESISTENCIA DE LA ADHERENCIA  
HIDRAULICA A LA TUBERIA**



**FIGURA 4-7b RESISTENCIA DE LA ADHERENCIA HIDRAULICA A LA FORMACION**

revestimiento-cemento y cemento-formación, por ejemplo: La resistencia de adherencia de la fuerza está relacionada a la mojabilidad de la superficie y el grado de hidratación del cemento.

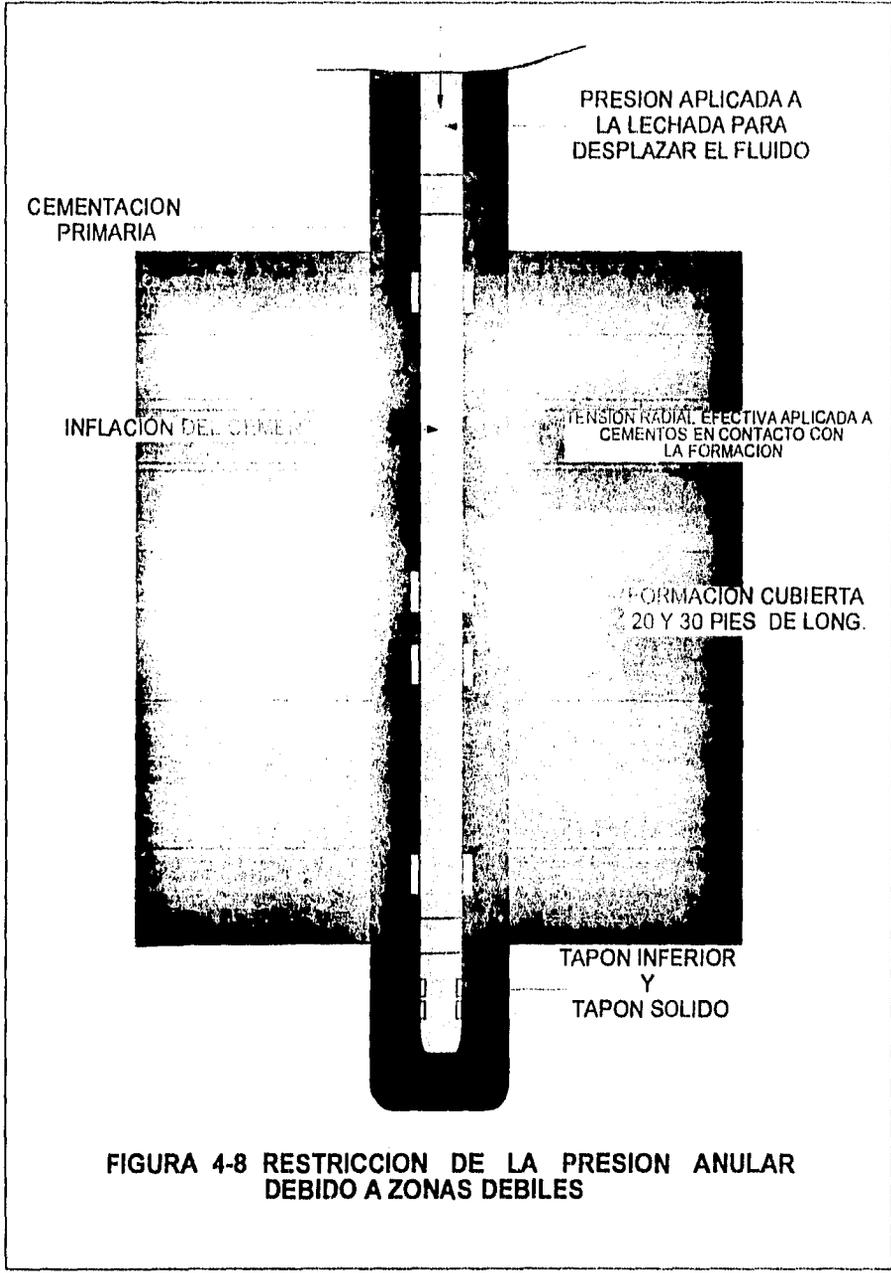
Se llevó a cabo una investigación combinada de la resistencia de corte y la adherencia hidráulica en la tubería de revestimiento, la contracción total de la acción química del cemento y las relaciones del mismo, caracterizando la naturaleza de la adherencia, midiendo el esfuerzo de adherencia y la permeabilidad interfacial; mostraron que reduciendo la acción de la contracción química la adherencia disminuye. Alterando y deformando la contracción química se mejora la adherencia, esta es influenciada por la resistencia a la compresión del cemento.

- Solución de la migración del gas.

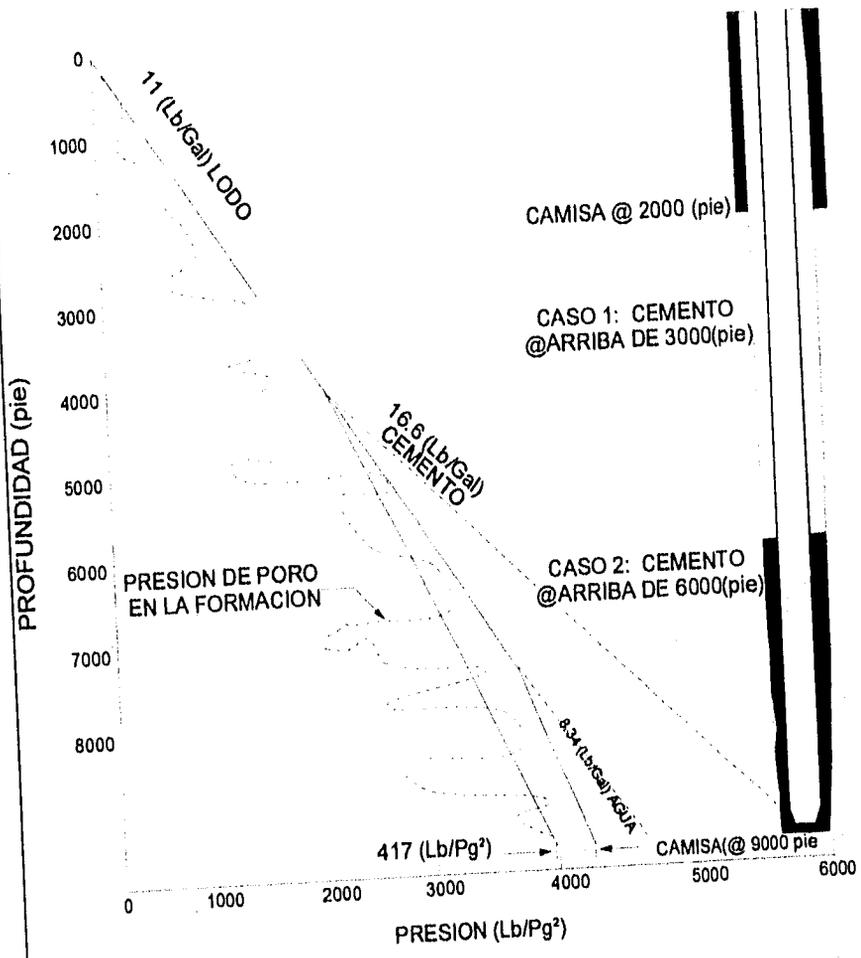
A través del tiempo se han propuesto un sin número de métodos para controlar la migración del gas. Históricamente dichos métodos han reflejado el nivel de conocimientos en el tiempo de su desarrollo, pues para controlar la migración del gas se requieren aplicar ciertas "Técnicas Físicas".

Desde hace tiempo han existido un gran número de técnicas físicas que bajo ciertas circunstancias ayudan a controlar la migración del gas. Estas incluyen la aplicación de la presión en el espacio anular, el uso de empaques de revestimiento externo y la reducción de la altura de la columna de cemento, aún cuando la cementación se realice en varias etapas. Las técnicas son válidas bajo ciertas condiciones, por ejemplo: La presencia de zonas débiles puede restringir el uso de la contra presión en el espacio anular por el riesgo de inducir a una pérdida de circulación, como se muestra en la figura 4-8.

El uso de empaques de revestimiento puede incrementar los problemas, ya que estos aíslan efectivamente la porción más baja del espacio anular poco después de la colocación del cemento. La relación mezcla-gradiente de agua, es un proceso natural para la reducción de la presión, se representa en un simple método gráfico, mostrado en la figura 4-9.



**FIGURA 4-8 RESTRICCION DE LA PRESION ANULAR DEBIDO A ZONAS DEBILES**



**FIGURA 4-9 METODO GRAFICO DE REDUCCION DE PRESION DE LA MEZCLA-GRADIENTE DE AGUA**

## - Compresibilidad del cemento.

La compresibilidad del cemento fraguado ha sido estudiada en un intento por mantener la presión de poro del cemento sobre la presión de formación. En teoría se debe prevenir cualquier desplazamiento de gas de la formación hacia el cemento en el espacio anular. La compresibilidad del cemento recae dentro de dos categorías principales: Cementos espumados y cementos generadores de gas in-situ.

### 1. Cementos espumados.

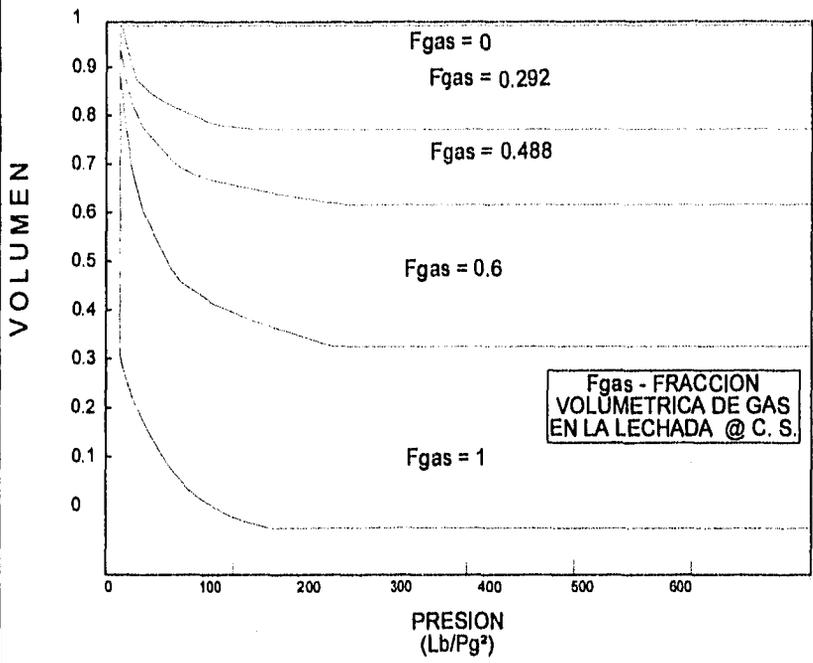
Los cementos espumados son compresibles a altas presiones, ya que los gases son incompresibles bajo ciertas condiciones presión, como se muestran en la figura 4-10. Por lo tanto es restringida la reducción del volumen durante el estado de transición cerca de la superficie en donde la expansión del gas es significativa.

### 2. Generación de gas in-situ.

Estos cementos están diseñados para mantener la presión del poro del cemento en virtud de reacciones químicas, las cuales producen gas en el fondo del pozo, los gases producidos pueden ser hidrógeno o nitrógeno. El campo de aplicación del nitrógeno para controlar la migración del gas no ha sido reportado. El nitrógeno genera polvo de aluminio.

Es importante notar que la migración de gas no puede ser prevenida únicamente por agentes que controlan la filtración, generan gas y dispersantes, ya que son necesarios para disminuir la entrada de agua intersticial.

El principal inconveniente de estos sistemas comparandolos con otros es la firmeza de seguridad de aquellos que generan hidrógeno, es la incapacidad de un gas a presiones típicas en el fondo del pozo para obtener una expansión volumétrica necesaria del 4% al 16%, para mantener la presión de poro.



**FIGURA 4-10 CONDICIONES DE LA INCOMPRESIBILIDAD DE LOS GASES**

Aplicando estrictamente la Ley de Boyle, el volumen de gas requerido para contrarrestar sólo la contracción química sería excesivo en formaciones con altas presiones. Los sistemas de gas generados pudieran ser estabilizados, tales como las burbujas de gas que pueden coalescerse y crear canales para permitir la formación del gas, no obstante a pesar de algunas críticas esta tecnología ha sido usada con éxito.

- Expansión del cemento.

La expansión del cemento ha tenido lugar en donde un microanulo ha sido identificado como el sendero de migración de gas. Los resultados exitosos de campo se han reportado, hay dos técnicas principales para inducir la expansión del cemento, estas técnicas son:

1. Crecimiento del cristal.
2. Generación de gas.

Las operaciones posteriores del mismo principio, como las mencionadas en la compresibilidad del cemento con la expansión de la concentración del material y del gas generado (aluminio típicamente) se redujo.

La formación por otra parte, depende de la nucleación y crecimiento de ciertas especies de minerales dentro de la matriz del cemento fraguado.

La expansión volumétrica es usualmente controlada al menos al 1%. Hay poca duda de que la expansión controlada de un cemento puede ayudar a sellar pequeños huecos entre tubería de revestimiento-cemento-formación, pero es improbable a ser efectivo en largos canales de sellamiento creados por la migración de gas.

Intentos por incrementar las propiedades expansivas del cemento pueden resultar poco firmes en una expansión no controlada la cual trastorna y fractura el cemento fraguado. También se debe estar conciente que a pesar de que el cemento sufre una expansión de volumen dimensional, todavía exhiben una contracción química neta y experimenta la misma disminución de presión hidrostática y presión de poro como cemento no expandido.

-- Cemento tixotrópicos y alta fuerza de gel.

Carter y Slagle, identificaron el gel de la lechada de cemento como una mayor causa potencial de migración de gas. Sin embargo el trabajo de Sabins y Childs, indicaba que el desarrollo de alta resistencia al gel por el cemento puede ayudar a resistir la exclusión del gas, por esta razón ellos propusieron cementos tixotrópico y de alta resistencia al gel. El cemento tixotrópico puede ser preparado por un número de métodos, incluyendo la adición de betonita, ciertas sales de sulfatos y polímeros de cadena cruzada.

En todos los casos la presión hidrostática transmitida de un sistema tixotrópico puede revertir el gradiente de agua intersticial y permanecer así hasta que comienza el período de fraguado, por lo tanto los sistemas son improbables de ser efectivos en situaciones donde la presión de la zona de gas excede el gradiente del agua a menos que una presión adicional se mantenga sobre el espacio anular.

Es verdad que una alta fuerza gel de cemento tixotrópico puede ofrecer resistencia considerable a deformaciones físicas y la exclusión de una gran burbuja de gas. Sin embargo como se discutió anteriormente las burbujas pueden a menudo ser más pequeñas que los espacios de poro en el cemento fraguado, bajo tales condiciones la migración de gas puede ocurrir sin deformar la lechada y la fuerza gel no es un gran factor relevante. Las lechadas del cemento tixotrópico tienden a tener altos valores de filtrado, por lo tanto el riesgo de hidratación y puenteo deben ser considerados.

Sykes y Logan, encontraron que la influencia de la pérdida de filtrado puede ser mas grande que la fuerza gel, inmediatamente después de la colocación del cemento. Recomendaron designar la lechada para hacerla dispersa hasta después que la reducción del filtrado pudiera haber ocurrido. Algunos grados de control de pérdidas de fluido para las lechadas tixotrópicas también pueden ser obtenidas por el uso de baja filtración, espaciadores de baja filtración. Resultados exitosos en campo han sido en pozos someros que tienen baja temperatura.

Sfehleet, reportó buenos resultados en temperaturas mas altas 120°C a 140°C, cuando se cementa una tubería corta o liner y una tubería de revestimiento larga.

- Angulo de talud del cemento.

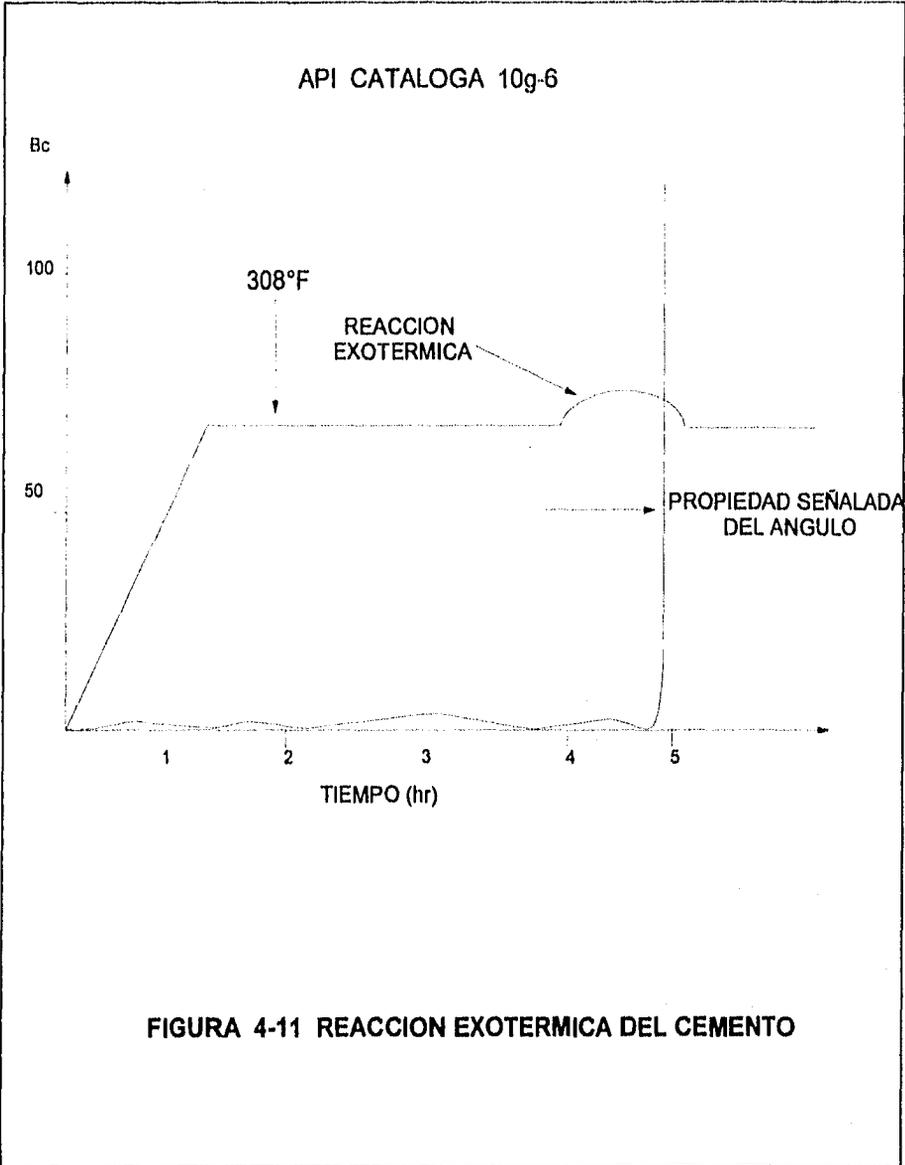
El ángulo de talud de las lechadas del cemento puede ser definido como sistema disperso, nos muestra que la tendencia al gel es progresiva y muy rápida debida a una cinética de hidratación, tales sistemas mantienen una carga total hidrostática en la zona de gas al inicio del fraguado y desarrollando una baja permeabilidad en la matriz del cemento con suficiente velocidad para prevenir una intrusión de gas.

El ángulo de talud de la lechada es en algunas ocasiones caracterizado por estandares de tiempo de espesamiento a alta temperatura. Un ángulo de talud de la lechada de cemento mantiene una baja consistencia hasta el fraguado, cuando la viscosidad de la lechada se incrementa en pocos minutos a más de 100 Be (unidades de consistencia), el incremento en consistencia es acompañado por un incremento de temperatura resultado de la reacción exotérmica del cemento, como se muestra en la figura 4-11.

Debe ser señalado que el tiempo de transición involucrado no es el mismo que Sabins aplicó en el trabajo de cementos tixotrópicos, ni el mecanismo es similar a los sistemas de alta resistencia al gel.

Un fraguado eficiente ocurre involucrando la depositación y recristalización de minerales hidratados.

Debido principalmente a la cinética de hidratación del cemento es difícil designar un sistema de cementos para temperaturas circulando por abajo de 120°C. A pesar de la temperatura es probable que el corte impartido durante el tiempo de espesamiento API, varíe significativamente de aquellos que ocurren durante la operación de cementación. La presencia de aditivos como los agentes de control de filtrado y dispersantes resuelven el problema, ya que estos tienden a retardar el fraguado del cemento.



#### - Cementos impermeables.

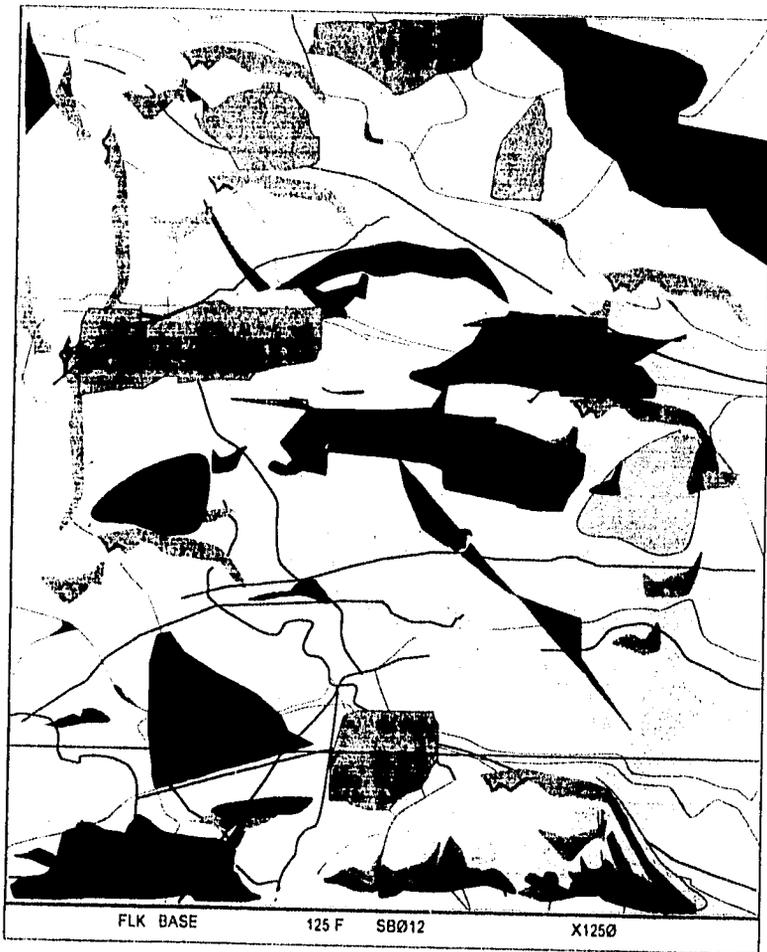
La migración de gas, puede ser prevenida reduciendo la permeabilidad de la matriz del cemento durante el tiempo crítico de transición de fluido a sólido. El uso de polímeros viscosos y agua intersticial en las lechadas de cemento limita la movilidad del gas, debido a la viscosificación del agua. Esta técnica es también apropiada para el control de pérdida de fluido, desafortunadamente la viscosificación de la lechada tiene efectos secundarios.

Esta mezcla incrementa el riesgo en formaciones débiles, debido a las altas presiones de desplazamiento. Este método está actualmente limitado para ser aplicado a baja temperatura, ya que la eficiencia de los viscosificantes disminuye con la temperatura.

Cheung y Beirute, describieron el uso de un cemento impermeable, el cual opera inmovilizando los espacios del poro de cemento, debido a que el agua mezclada en el cemento no puede ser desplazada y el gas no puede moverse dentro de los espacios porosos de la lechada. El sistema está compuesto por una combinación de agentes de puente y polímeros, dichos sistemas han sido aplicados desde los 60°C a 180°C. Los aditivos latex son utilizados para la prevención de migración de gas y su aplicación se ha extendido a un amplio rango de pozos.

Los reticulantes son dispersantes de sólidos, compuestos de partículas poliméricas de sólidos incluyendo surfactantes y coloides protectivos, los cuales provocan la dispersión. La mayoría de los reticulantes tienen partículas formando espacios, así cuando existe gas o la concentración de partículas excede el valor inicial dado, las partículas latex se carbonizan dentro de los espacios del poro bloqueando el avance hasta el espacio anular para formar una barrera polimérica impermeable.

En agujeros descubiertos el gas invade primero la porción del espacio anular cementado a través de la zona de gas y tiene contacto con las partículas de latex dispersas en la lechada, como se muestra en la figura 4-12.



**FIGURA 4-12 FORMACION EN UNA ZONA DE GAS QUE INVADE  
UNA LECHADA DE CEMENTO**

Los retículos tienen otras propiedades benéficas en una lechada, ya que las pequeñas partículas esféricas de látex que actúan como lubricantes crean excelentes propiedades reológicas.

Blomberg recientemente describió otra técnica, la cual requiere de partículas de mineral de grano fino para preparar cementos de densidad y permeabilidad bajas, las partículas utilizadas son llamadas microsílicas, este es un biproducto en la producción de silicón y ferrosilicón, el tamaño de la partícula promedio de este material es de 1  $\mu$ m, con este tamaño es capaz de llenar los espacios porosos de la mezcla.

#### - Surfactantes.

Marrast describió el uso de surfactantes en las lechadas de cemento, mencionando que estos al estar el poro invadido de gas crean una espuma estable, dicha espuma después presenta una resistencia significativa para el flujo y así limita la migración ascendente del gas.

#### - Predicción de la migración de gas.

Existe una gran variedad de técnicas para prevenir la migración de gas en el espacio anular, algunas son aplicadas universalmente, pero la mayoría son usadas sólo bajo ciertas circunstancias.

La técnica más conocida y utilizada es la descrita por Sutton, en la cual se calcula un potencial de flujo de gas (GFP), esto es definido como el radio de otra variable, la máxima restricción de presión (MPR) a la pérdida de equilibrio de la presión hidrostática de la fuente.

$$GFP = MPR/OBP \text{ ----- (8)}$$

MPR, es definido como:

$$MPR = 1.67 \times L / (dh - dp) \text{ ----- (9)}$$

Donde:

GFP = Potencial de flujo de gas

MPR = Máxima restricción de presión (lb/pg<sup>2</sup>)

OBP = Presión desequilibrada (lb/pg<sup>2</sup>)

L = Longitud (pie)

dh = Diámetro del agujero (pg)

dp = Diámetro externo de la tubería (pg)

El factor GFP, puede variar entre 0 e infinito y la intensidad del problema potencial de la migración de gas es valorada bajo las siguientes condiciones:

GFP	VALOR DE INTENSIDAD
<4	Menor
4 a 8	Moderado
>8	Intensivo

El concepto GFP, esta basado en la premisa de que ocurre una filtración de flujo de gas a través de la mezcla de cemento en el espacio anular y el desarrollo de la fuerza del gel puede detener la invasión.

La técnica asume que una fuerza estática del gel de 500 lb/100 pies<sup>2</sup> crea suficiente resistencia a la cubierta de fuerzas macroscópicas desarrolladas por burbujas de gas emigrante.

Stewart y Schouten, mostraron que la fuerza del gel con un valor menor al anterior podría inhibir el escape de gas, pero la mayoría de la migración del gas ocurre después del fraguado inicial del cemento.

Rae, describió una técnica basada en los siguientes cuatro factores:

1. Formación y espacio anular.
2. Fluidos hidrostáticos.

3. Traslado de sólidos.

4. Desempeño de la mezcla de cemento.

El factor de formación es un término sin dimensión, el cual representa el radio de la capacidad de formación ( $K \times h$ ), con un volumen crítico ( $V_c$ ). Este se equipara con la porosidad creada al fraguar el cemento y la contracción química durante la etapa anterior del periodo de transición desde la superficie de la zona de gas hasta el punto de balance de la presión en el espacio anular.

La porosidad esta estimada en 2% en la etapa de transición, el gas penetra el espacio anular de manera uniforme, matemáticamente el factor de formación puede ser expresado por:

$$Ff = K \times h / V_c = 467.7 K \times h \times \rho / OBP (dh^2 - dp^2) \text{-----}(10)$$

Donde:

Ff = Factor de formación

K = Permeabilidad de la zona (md)

h = Altura (pie)

$V_c$  = Volumen crítico ( $\text{pie}^3$ )

$\rho$  = Densidad de la mezcla de cemento ( $\text{lb}/\text{pie}^3$ )

El concepto de "Factor Hidrostático", esta basado en el trabajo de Levine, en el cual se observa que la presión hidrostática ejercida por la mezcla de cemento tiende a aproximarse a la del agua intersticial, debido a la fuerza que provoca el gel la presión hidrostática aumenta.

Sólo después de la etapa inicial la presión decae a un valor abajo del gradiente del agua intersticial, correspondiendo esto a la etapa de consolidación estructural y la disminución de la permeabilidad de la matriz del cemento, debido al consumo de agua en el poro para hidratar los granos de cemento. El factor hidrostático, esta representado por el cociente de la presión del poro de la zona de gas y la presión en el

espacio anular en el comienzo de la transición real en la etapa inicial, matemáticamente se expresa:

$$HF = 19.281 \times \{Pg / (\rho l \times hl + (\rho s \times ls) + (8.32 \times hc))\} \text{-----} (11)$$

Donde:

- HF = Factor hidrostático (adimensional)
- Pg = Presión del poro de la zona de gas (lb/pie<sup>2</sup>)
- ρl = Densidad del lodo (lb/pie<sup>3</sup>)
- ρs = Densidad del espaciador (lb/pie<sup>3</sup>)
- hl = Altura del lodo en el espacio anular (pie)
- ls = Altura del espaciador en el espacio anular (pie)
- hc = Altura del cemento en el espacio anular (pie)

Para valores más altos del factor hidrostático se tienen mayores riesgos de migración de gas.

El tercer factor relaciona la remoción del lodo, el cual está calculado de acuerdo a un grupo estándar y después valorado en una escala de 1 a 10 puntos, en la cual 1 es para excelente y 10 cuando son muy pobres.

El cuarto factor es el número de desempeño de la mezcla de cemento, de acuerdo a su hidratación genética y pérdida de fluido, factores que son fundamentales en el proceso de la migración de gas.

El SPN, intenta proveer con pruebas de equipo convencional y procedimientos, un valor relativo de la pérdida de agua intersticial del cemento durante el tiempo crítico cuando el cemento empieza a cambiar de líquido a sólido, está basado en el hecho de que como primera aproximación la pérdida de fluido varía linealmente con la raíz cuadrada del tiempo y por lo tanto el volumen teórico de pérdida de fluido durante el proceso de establecimiento está dado por:

$$SPN = FPM \times \{(t_{100}Bc)^{(1/2)} \times (t_{30}Bc)^{(1/2)}\} / \{(30)^{(1/2)}\} \text{-----} (12)$$

Donde:

SPN = Volumen teórico de pérdida de fluido

FPm = Valor de la pérdida de fluido de la mezcla

$t_{100Bc}$  = Consistencia de tiempo a 100 Bc (min)

$t_{30Bc}$  = Consistencia de tiempo a 30 Bc (min)

Debe enfatizarse que esta ecuación no pretende representar el desempeño actual de la mezcla de cemento bajo condiciones estáticas del hueco del sólido que influye al escape de gas, lo que pretende el SPN es proporcionar un método de comparación de desempeño de la mezcla con más bases relativas y proporciona una herramienta útil en el diseño y evaluación de los programas de cemento para fuentes de gas.

Mezclas con altos valores de SPN, son cantidades muy pobres para el control de la migración de gas, aquellos con bajas pérdidas de fluido API y cortos periodos criticos de hidratación ofrecen una probabilidad más grande de éxito.

Ningún modelo puede predecir la aparición del flujo de gas, algunas semanas o meses después del trabajo de cementación y esto debe ser considerado con otros factores sin relacion alguna con los que se han mencionado.

El hecho de que la migración de gas es un fenómeno complejo que consta de muchas facetas proporcionando su modelo fisico un gran problema, por la saturación de fluidos y la evolución de la estructura de la matriz del cemento.

La heterogeneidad dentro de la mezcla de cemento, limita los efectos en la formación en la tubería de revestimiento, ya que puede producir efectos singulares, como la desuniformidad del avance del gas, los cuales por definición son imprescindibles. Por lo tanto, nadie puede ser capaz de predecir el fin de la migración de gas ni su solución definitiva.

## CONCLUSIONES.

- Una lechada de cemento es una mezcla de cemento, aditivos y agua.
- La composición del cemento se diseña regularmente para condiciones variables de presión y temperatura; esto ha sido posible a través del desarrollo de aditivos que modifiquen los cementos disponibles para requerimientos individuales.
- En el diseño de una lechada de cemento, se deben tomar en cuenta diferentes aspectos, tales como: Profundidad donde se desea colocar, temperatura, volumen y densidad de la mezcla.
- El tiempo de fraguado y la resistencia del cemento son afectados por diversos factores como: Presión y temperatura, tipo de cemento y cantidad de agua.
- Las propiedades físicas y químicas del cemento son modificadas al ponerle aditivos con el fin de ejecutar el trabajo de cementar el pozo, sin que la lechada pierda sus propiedades al entrar en contacto con los fluidos del pozo, la formación y la tubería.
- La lechada de cemento se utiliza para cementar las tuberías de revestimiento (T.R.) y crear un sello hidráulico impermeable en el espacio anular (A.E.), lo cual previene la migración de fluidos indeseables en la zona que se desea explotar o hasta la superficie.
- Al realizar cualquiera de las operaciones de cementación, es necesario tener el programa de operación, se debe tomar en cuenta el tipo de cemento que se puede emplear, conocer el tiempo de fraguado y de bombeo del mismo, los diversos aditivos que se ponen en el cemento y los factores de diseño. Todo esto con el fin de efectuar satisfactoriamente y sin riesgo la cementación.

- Del conocimiento, identificación y aplicación de los diferentes tipos de herramientas que se emplean en reparación y terminación de pozos, para realizar las operaciones de cementación en sus diferentes tipos, dependerá en mucho el éxito o fracaso de las mismas.

## NOMENCLATURA.

D.	Profundidad de la formacion. pie. m
dh.	Diametro del agujero. pg
dP.	Diametro de la tuberia. pg
dv dy	Cambio de la velocidad con respecto a la distancia pie. : pie. m. : m
dz.	Diferencia de profundidad. pie. m
E.	Fuerza de mezclado. kg
FF.	Factor de formacion adimensional
FLVR.	Reduccion del volumen de perdida del fluido. adimensional
GF.	Gradiente de fractura. lb pg <sup>2</sup> pie. kg cm <sup>2</sup> m
GPF.	Potencial del flujo de gas.
gs.	Gravedad especifica de la lechada. adimensional
gw.	Gravedad especifica del agua intersticial. adimensional
hc.	Altura del cementador en el espacio anular. pie. m
h.	Altura pie. m
H.	Profundidad media del intervalo disparado. pie. m
HP	Factor hidrostatico. adimensional
hl.	Altura del lodo en el espacio anular. pie. m
hs.	Altura del espectador en el espacio anular. pie. m
HL.	Profundidad total. pie. m
HVR.	Reduccion del volumen de hidratacion (factor de compresibilidad de la lechada). adimensional
k.	Factor que depende de los fluidos que contiene la formacion por cblurar. adimensional
k.	Permeabilidad de la zona. md
K.	Relacion de los esfuerzos. adimensional
L.	Longitud. pie. m
M.	Esfuerzo de la matriz de la roca.
ml.	Mazo de la lechada. lb. kg
MPR.	Maxima restriccion de presion. lb pg <sup>2</sup> kg cm <sup>2</sup>
GRP.	Presion desequilibrada. lb pg <sup>2</sup> kg cm <sup>2</sup>
( $\sigma_{film}$ ) <sub>max</sub> .	Presion maxima de inyeccion. lb pg <sup>2</sup> kg cm <sup>2</sup>
F.	Presion de formacion. lb pg <sup>2</sup> kg cm <sup>2</sup>

PF.	Presion de fractura, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Pci.	Presion instantanea de cierre, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Ph.	Presion hidrostalica, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Ptr.	Presion de cementacion de fondo, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Pwh.	Presion en la cabeza del pozo o presion superficial aplicada por las bombas, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Pf.	Perdidas por friccion, adimensional
Pg.	Presion del poro de la zona de gas, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
S.	Peso de la sobrecarga, lb, kg
SGS.	Fuerza elastica del gel, lb
T.	Esfuerzo total ejercido en una profundidad lineal dada, adimensional
t.	Tiempo, min
t <sub>12000</sub> .	Tiempo de mezclado a 12000 RPM, s
U.	Presion de poro o presion hidrostalica intersticial, lb/pg <sup>2</sup> , kg/cm <sup>2</sup>
Vb.	Volumen de baches separadores, ft <sup>3</sup>
vc.	Volumen critico, pie <sup>3</sup>
Vl.	Volumen de la lechada, ft <sup>3</sup>
Vtb.	Volumen total de baches separadores, ft <sup>3</sup>
W.	Fuerza, HP

$\tau$ .	Esfuerzo cortante, lb (pie s), kg <sup>2</sup> (m s)
$\mu$ .	Viscosidad del fluido, cp
$\rho$ .	Densidad de la mezcla del cemento, lb (pie <sup>3</sup> ), gr/cm <sup>3</sup>
$\rho_f$ .	Densidad del fluido de control, lb (pie <sup>3</sup> ), gr/cm <sup>3</sup>
$\rho_l$ .	Densidad del lodo, lb (pie <sup>3</sup> ), gr/cm <sup>3</sup>
$\rho_s$ .	Densidad del espaciador, lb (pie <sup>3</sup> ), gr/cm <sup>3</sup>
$\rho_m$ .	Densidad de la mezcla, lb/gal
$\theta$ .	Desviacion angular

## APENDICE A

### TECNICAS TRADICIONALES DE RECEMENTACION.

A continuación se mencionan las herramientas que se pueden utilizar en la operación de cementación.

Tipos de herramientas:

#### 1. Cementadores Recuperables.

- RTTS y RTTS-2.
- BAKER RM-EA.
- BAKER "C-1".

#### 2. Tapones Recuperables y Retenedores de Cemento Permanente.

- Tapon recuperable BAKER "C" con soldado modelo "H".
- EZ-DRILL.
- MERCURY K-1.

A continuación, se describe cada una de las herramientas:

#### 1. Cementadores recuperables.

- Cementadores RTTS y RTTS-2.

Los cementadores RTTS son empacadores de peso que se utilizan en operaciones de cementaciones a presión, prueba y tratamientos. Son del tipo "J" recuperables y se diferencian únicamente en que el RTTS-2 maneja un diámetro interior grande, teniendo un tubo de volumen más resistente y los elementos empacadores de hule se instalan más cerca del conjunto de cuñas hidráulicas de anclaje. Estos empacadores también pueden ser usados en combinación con un tapón mecánico recuperable, cuando se tienen dos o más intervalos abiertos, con la finalidad de efectuar las operaciones antes mencionadas.

Los empacadores de tamaño nominal  $3\frac{1}{2}''$  para tubería de revestimiento de  $4\frac{1}{2}''$ , son diseñados para que usen en la parte inferior del cuerpo muelles de fricción y de  $4''$  o mayor empleando bloques de fricción.

La mayoría de los componentes son reemplazables cuando sufren desgastes, incluyendo las cuñas, hules empacadores y los bloques de fricción. Estos dos tipos de cementadores recuperables se distinguen por lo siguiente:

- El RTTS, es con sistema de anclaje mecánico sencillo y cuñas hidráulicas.
- El RTTS-2, es con sistema de anclaje mecánico automático y cuñas hidráulicas.

En la figura A-1 se muestra el esquema del cementador Howco "RTTS".

Ambos empacadores RTTS son construidos en tamaños de  $4\frac{1}{2}''$  hasta  $13\frac{3}{8}''$  y su diseño consta de tres conjuntos.

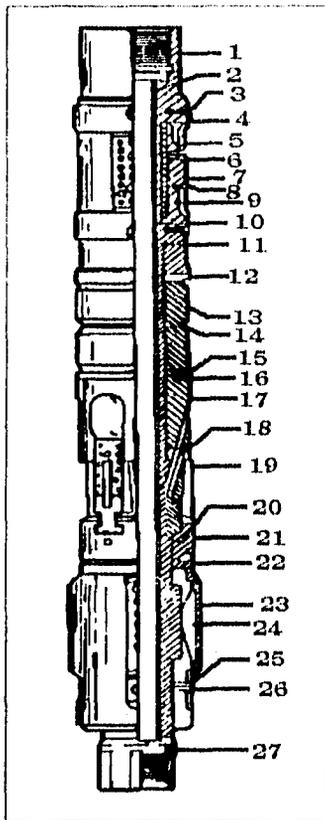
1. Cuerpo del empacador.
2. Juntas de seguridad "VR".
3. Válvulas de circulación RTTS y/o RTTS-2.

Las características de cada uno son:

1. Cuerpo del empacador.

El cuerpo del empacador incluye un mecanismo tipo "J", cuñas mecánicas, mecanismos de presión y cuñas hidráulicas que son de tamaño grande para trabajo pesado. Esto para evitar que la herramienta se desancla por el efecto de la presión de bombeo.

El mecanismo de presión consiste de un mandril empacador que actúa en el interior del mandril principal, elementos empacadores y una zapata superior e inferior. Son diseñados con apertura de paso completo, permitiendo bombear grandes volúmenes de fluido, con un mínimo de pérdida de presión. La ventaja es que permite bajar a través de su interior, herramientas operadas con cable eléctrico o línea de acero.



Nº DESCRIPCION

- 1 CUERPO PARA CUSAS HIDRAULICAS
- 2 ANILLO "O"
- 3 TORNILLOS
- 4 ANILLO RETENEDOR
- 5 RESORTE
- 6 AMORTIGUADOR
- 7 CUSAS HIDRAULICAS
- 8 TORNILLO
- 9 PORCA CUSAS
- 10 TUBO DE VOLUMEN
- 11 ANILLO "O"
- 12 ANILLO PROTECTOR
- 13 HULE EMPAQUE
- 14 ANILLO ESPACIADOR
- 15 ANILLO PROTECTOR
- 16 TORNILLO
- 17 CUERPO CUSAS MECANICAS
- 18 PERNOS TOPE
- 19 CUSAS MECANICAS
- 20 TORNILLO
- 21 COLLAR RANURADO
- 22 CAMISA PORTABLOQUES
- 23 BLOQUE DE FRICCION
- 24 MUELLE DE INCONEL
- 25 RETENEDOR
- 26 TORNILLO
- 27 MANDRIL INFERIOR (8 h.r.r.)

FIGURA A 1 CEMENTADOR HOWCO "RTTS"

Se pueden efectuar varias operaciones en una sola corrida, como son:

- Disparos.
- Pruebas de producción.
- Tratamientos de ácido.
- Muestreo.
- Redisparo de intervalos.

## 2. Juntas de seguridad "VR".

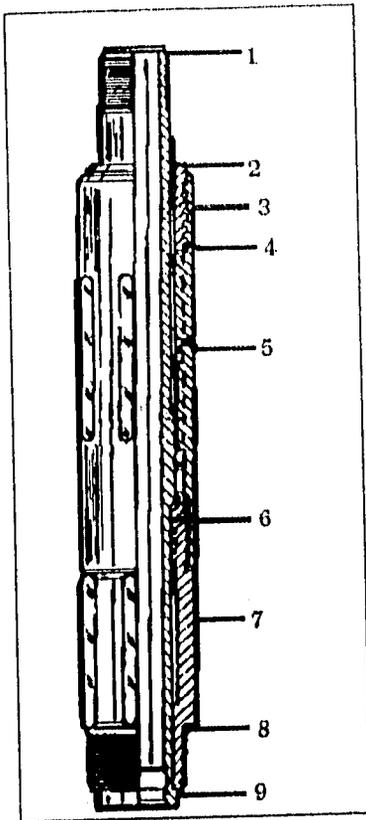
Se utilizan para recuperar la tubería, en caso de que el cuerpo del empacador quede atrapado o cementado. El mandril de la junta se mantiene inoperante por medio de una camisa de tensión, evitando que la junta de seguridad se suelte prematuramente.

Este tipo de junta la integran: Una conexión inferior, una funda que tiene en su interior cuatro guías dispuestas en forma especial, una rosca ACME (8 hilos en total), una camisa diseñada con una ranura en su interior y roscada a la funda, un mandril con dos pernos candado, una guía que se deslizará en la ranura de la camisa, una conexión superior y la junta de tensión que va roscada al extremo inferior del mandril. La junta va instalada inmediatamente arriba del empacador. En la figura A-2 se muestra el esquema de la junta de seguridad "RTTS" tipo "VR".

## 3. Válvulas de circulación RTTS y/o RTTS-2.

Están compuestas por dos mandriles, uno superior y otro inferior en este último se localizan los orificios de circulación internos y los candados guía, dos fundas constituyen el cuerpo exterior, en la funda superior se localiza la ranura "J" y en la inferior los orificios.

Estas válvulas son del tipo candado abierto, candado cerrado y en operaciones de cementación o tratamientos, el mandril de la válvula se asegura por medio de un candado, el cual evita la abertura de la válvula



No. DESCRIPCION

- 1 MABRII
- 2 TUERCA
- 3 CAJA
- 4 EMPAQUE
- 5 TAPON
- 6 EMPAQUE
- 7 CONECTOR
- 8 EMPAQUE
- 9 CAMISA DE TENSION.

FIGURA A 2 JUNTA DE SEGURIDAD "RTTS" TIPO "VR"

por el efecto de la presión de bombeo. En la figura A-3 se muestra el esquema de la válvula de circulación "RTTS" convencional.

La válvula RTTS-2 únicamente es diferente de la convencional en el mandril inferior, ya que este tiene una extensión para que actúe como válvula de desvío, mostrada en la figura A-4.

- Cementador Retrievmatic (RM) modelo "EA".

El cementador es un empacador de peso que está compuesto por:

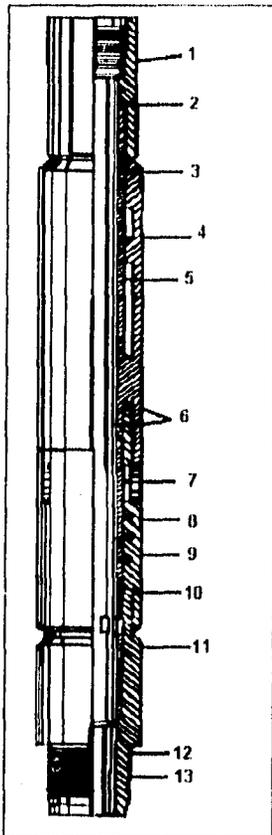
1. Un mandril principal.
2. Un conjunto de cuñas hidráulicas en la parte superior.
3. Un descargador de presión.
4. Tres elementos de empaque en la parte media.
5. Unas cuñas mecánicas de anclaje inferior.
6. Unos bloques de fricción en la parte inferior.

El cementador BAKER RM-EA, se utiliza para efectuar cementaciones a presión, pruebas de producción, acidificaciones y localización de roturas de tuberías de revestimiento. Por su diseño los botones hidráulicos se encuentran aislados mediante una cámara de circulación que atraviesa el empacador longitudinalmente, permitiendo manejar presiones arriba o abajo del mismo, las cuales se deben a las variaciones de presión en la tubería de producción o de trabajo.

El descargador de presión permite circular, arriba y abajo del cementador, facilitando la eliminación del cemento u otros materiales que impidan su recuperación. En la figura A-5 se muestra el esquema del cementador recuperable retrievmatic (RM) modelo "EA".

-- Cementador BAKER "C-1" y sustituto de descarga a tensión BAKER "R-2".

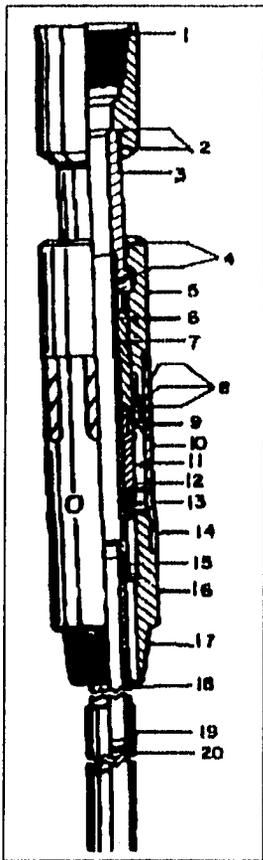
El cementador recuperable Baker modelo "C-1", es una herramienta que opera a base de torsión derecha para anclar en las paredes de la tubería



No DESCRIPCION

- 1 ADAPTADOR
- 2 ANILLO "O"
- 3 ANILLO "O"
- 4 RANURA "J" EN LA FUNDA
- 5 SECCION DEL MANDRIL DE ARRASTRE
- 6 ANILLOS "O"
- 7 ORIFICIOS DEL CUERPO
- 8 ANILLO "O"
- 9 CUERPO INFERIOR
- 10 ANILLO "O"
- 11 CUERPO INFERIOR
- 12 ANILLO "O"
- 13 CONEXION INFERIOR (PISTON)

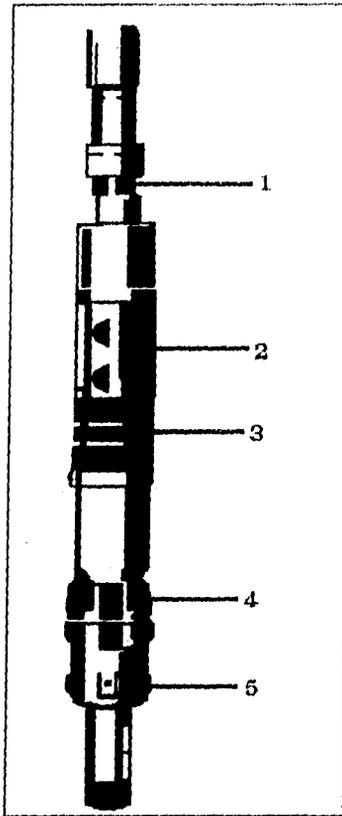
FIGURA A 3 VALVULA DE CIRCULACION "RTTS" CONVENCIONAL.



No DESCRIPCION

- 1 ADAPTADOR SUPERIOR
- 2 ANILLOS "O"
- 3 MANDRIL DE ARRASTRE
- 4 ANILLOS "O"
- 5 BARRERA "J" EN LA FUNDA
- 6 EXTENSION DEL MANDRIL SUPERIOR
- 7 MANDRIL SUPERIOR
- 8 ANILLOS "O"
- 9 PISTON
- 10 ANILLO "O"
- 11 MANDRIL DE SELLO
- 12 SELLO
- 13 ANILLO PROTECTOR
- 14 CUERPO DE ORIFICIOS
- 15 ANILLO "O"
- 16 CUERPO INFERIOR
- 17 CONEXION INFERIOR
- 18 MANDRIL INFERIOR
- 19 ANILLO "O"
- 20 EXTENSION MANDRIL INFERIOR

FIGURA A 4 VALVULA DE CIRCULACION "RTTS" MODELO 2



No. DESCRIPCION

- 1 MANDRIL
- 2 CUNAS HIDRAULICAS
- 3 ELEMENTOS DE SELLO
- 4 CUNAS MECANICAS
- 5 BLOQUES DE FRICCION

FIGURA A 5. CEMENTADOR RECUPERABLE RETRIEVEFMATIC (RM) MODELO "EA"

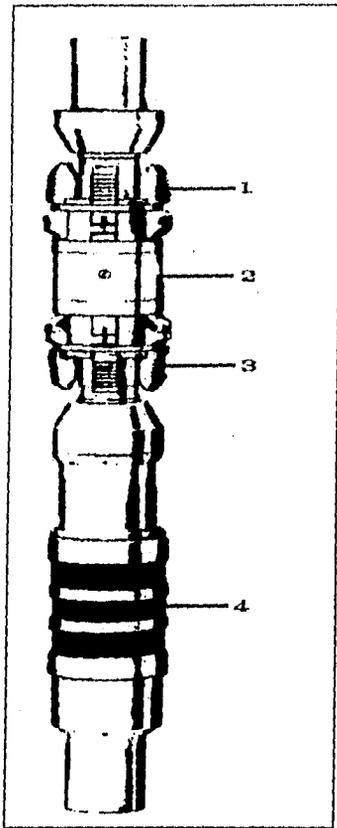
de revestimiento regulada para efectuar el sello. Es un empacador utilizado para pozos someros hasta de 1500 m en una gran variedad de operaciones como pruebas de tubería de revestimiento, pruebas de producción y trabajos subsiguientes donde se requieren soportar presiones diferenciales elevadas, tales como acidificaciones, fracturas y cementaciones a presión.

Esta herramienta se emplea invariablemente con el sustituto de descarga a tensión Baker modelo "R-2", y en ocasiones con el tapon puente modelo "C", y con otras herramientas compatibles según el programa de operaciones a realizar. En la figura A-6 se muestra el esquema del empacador cementador Baker "C-1".

Las características principales de diseño del cementador "C-1", son las siguientes:

- Diámetro interior amplio: Permite el paso de diversas herramientas sin dificultad para efectuar registros, disparos, sondeos, etc.
- Cuñas: Su afianzamiento en ambos sentidos. Cuando es sometido a presiones diferenciales considerables, las cuñas pueden ser reemplazadas con suma facilidad en caso de sufrir daño o deterioro.
- Elemento de sello: Posee un sistema alternado en los elementos de sello (3 hules) que previenen la deformación, estos pueden ser cambiados, dependiendo de las condiciones, al ser recuperada la herramienta después de haber efectuado varias operaciones dentro del pozo.
- Rosca izquierda de emergencia: Para la recuperación de emergencia, el cementador "C-1" cuenta con una rosca ACME izquierda, a la cual se le transmite la rotación derecha en la superficie y con esto desenrosca la junta soltadora, que permite la recuperación parcial de la herramienta.
- Anillo soltador de seguridad: En caso de extrema emergencia, parte del cementador puede ser recuperado quedando el resto dentro del pozo.

Normalmente, el cementador "C-1" se opera a anclar con rotación derecha, sin embargo, hay anillos especiales izquierdos que hacen posible el anclaje del cementador con rotación izquierda. Este cambio de anillos es



Nº DESCRIPCIÓN

- 1 CURVAS SUPERIORES
- 2 CAMISA GIRATORIA
- 3 CURVAS INFERIORES
- 4 ELEMENTOS DE SELLO

FIGURA A 6 EMPACADOR CEMENTADOR BAKER "C-1"

conveniente, cuando la herramienta va a permanecer por un largo periodo de tiempo dentro del pozo, en estas condiciones, es más segura la recuperación a la derecha.

### Consideraciones teóricas y prácticas.

Cuando esta herramienta es utilizada en operaciones de presión o sondeo, hay factores que pueden cambiar drásticamente su fuerza de sello. Deben ser considerados al determinar la cantidad apropiada de tensión a que va a ser sometido el cementador, especialmente si la tubería de producción está apoyada en las cuñas superficiales, de tal manera que un cambio de peso no se registre en el indicador. A continuación se mencionan los siguientes factores:

#### a) Operaciones de presión.

La temperatura del fluido inyectado hace variar el largo de la sarta, un fluido frío contraerá la tubería de producción, aumentando la tensión aplicada al cementador. Un fluido caliente alargará la sarta disminuyendo la tensión en la herramienta, entonces, la contracción de la sarta no será dañina, a menos de que sea tan grande que proceda a romperla. El alargamiento sí puede afectar críticamente la eficiencia del sello del cementador, por lo cual es necesario tomarlo en cuenta cuando se determina la tensión que deba aplicarse al empacador. Cambios de presión en la tubería de producción o en el espacio anular crean fuerzas radiales que alteran el diámetro de la tubería de producción, extendiendo o disminuyendo su longitud.

Al aumentar la presión en la tubería de producción, se incrementa el diámetro y disminuye su longitud, acrecentándose la tensión en la herramienta. Al aumentar la presión en el espacio anular todo se comporta a la inversa, es decir, se reduce el diámetro de la tubería de producción, extendiéndose la longitud de la sarta, disminuyendo así la tensión en el cementador.

Los cambios de fluido en el pozo también cambian el efecto relativo de flotación de la sarta, afectando la fuerza de sello del cementador. Inyectando un fluido más pesado, aumenta el efecto de flotación de la

sarta y consecuentemente, se incrementa la tensión aplicada a la herramienta; pero al inyectar un fluido mas ligero disminuye la flotacion de la sarta aumentando la fuerza del sello del empacador.

b) Sondeo.

Las presiones hidrostáticas de las columnas afectan el diámetro de la tubería de producción, causando el mismo efecto mencionado en el inciso anterior, cuando es favorable al espacio anular como comúnmente ocurre, la fuerza radial activa contra el diámetro exterior de la tubería reducido el diámetro y aumentando la longitud de la sarta, disminuyendo así la tensión en la herramienta. Esto aunado a la menor fuerza de empaque producida por la disminución del efecto de flotación, puede ocasionar en cualquier momento una fuga en el cementador y en ocasiones roturas de la tubería de producción, por lo que es necesario tenerlo siempre presente.

Sustituto de descarga modelo "R-2".

Es un accesorio complementario del cementador recuperable modelo "C-1", es utilizado también con cualquier herramienta que opere con tensión, este accesorio proporciona áreas grandes de circulación de fluido, que elimina con facilidad depósitos de arena y cemento contando con las características siguientes:

- a) Se puede introducir en posición abierto o cerrado y posteriormente abrirse o cerrarse cuantas veces se requiera.
- b) Después del anclado el cementador y abierto el sustituto, la circulación del fluido contenido en el pozo se puede realizar en forma directa o inversa.
- c) Proporciona un agujero interno de paso completo, permitiendo la introducción de herramientas operadas con cable eléctrico o línea acerada.
- d) Su operación es fácil, ya que al aplicar peso al cementador para anclarlo el sustituto se abre y cuando se aplica tensión para empaquetar el

"C-1" el sustituto se cierra. La figura A-7 se muestra el esquema del sustituto de descarga Baker "R-2" (posición cerrado).

## 2. Tapones recuperables y retenedores de cemento permanente.

-- Tapón recuperable BAKER "C" con soldador modelo "H".

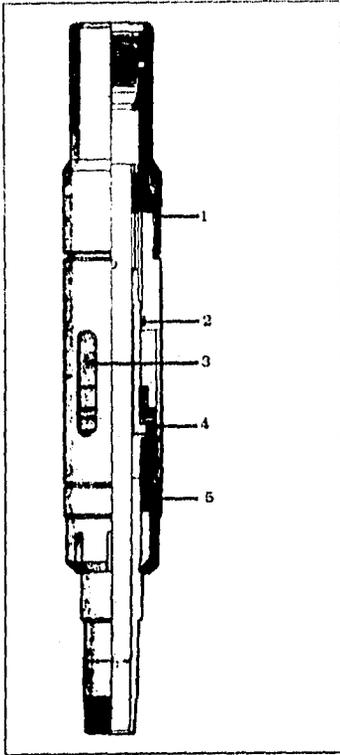
El tapon recuperable modelo "C" es una herramienta que sella con las paredes de la tubería de revestimiento, aislandola temporalmente como medida de seguridad cuando se efectúa un cambio de cabezal, se usa también en combinación con otras herraminetas compatibles como los cementadores Baker "C-1" para efectuar en un solo viaje operaciones múltiples de pruebas, tratamientos y cementaciones de dos o mas intervalos. Este tapon-puente se introduce con soldador mecánico o eléctrico siendo el primero de ellos el que se emplea con mayor frecuencia, su fijacion con el soldador mecánico es a base de torsión izquierda y movimientos descendentes y ascendentes para liberar una ranura tipo "J". La presion es un factor determinanale en la eficiencia del tapon-puente y su interpretacion es clave cuando se trata de sellar o recuperar la herramienta, como se muestra en la figura A-8.

- Accesorios.

### Copas empacadoras.

Su diseño y el material de que estan hechos mejora su eficiencia sobre todo bajo condiciones severas de temperatura y presion. Moldeadas en dureza 90, previenen la extensión excesiva del hule y proporcionan un sello positivo y seguro contra la diferencial de presión.

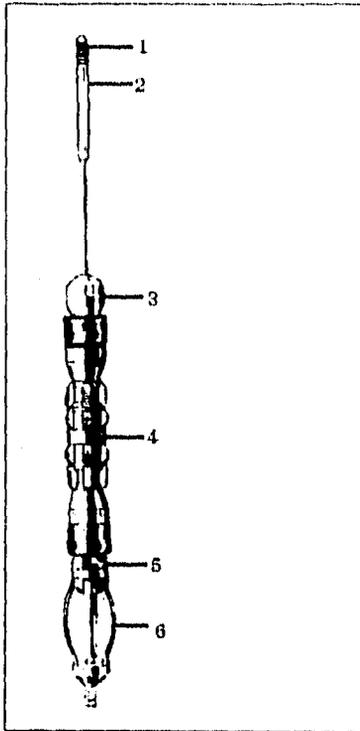
Los tapones puente modelo "C" algunas veces se recuperan del pozo con una ranura formada en la copa inmediatamente arriba del asa, sin embargo lejos de indicar una falla, es una verdadera indicacion positiva de que la copa se ha preformado debidamente, las copas estan específicamente diseñadas con suficiente hule para permitir una pequeña cantidad de deformacion sin que materialmente se debilite la copa cuando



No. DESCRIPCION

- 1 CONEXION SUPERIOR
- 2 ANILLO "O"
- 3 VENTANA DE CIRCULACION
- 4 ANILLO DE SELLO
- 5 ANILLO "O"

FIGURA A 7 SUSTITUTO DE DESCARGA BAKER "R 2" (POSICION CERRADO)



Nº. DESCRIPCIÓN

- 1 CABEZA DE CONTROL
- 2 PUNTO IOTA
- 3 VALVULA SUPERIOR
- 4 ANILLO RETENEDOR DE CUSAS
- 5 VALVULA SUPERIOR
- 6 CENTRADORES

FIGURA A B TAPON PUENTE RECUPERABLE BAKER MODELO "C"

se le aplique alta presión, es la deformación del hule alrededor del asa lo que causa que se forme una ranura en la copa arriba de ésta.

Es importante que antes de bajar el tapón-puente se considere lo siguiente:

a) Las características de la herramienta deben corresponder a la de la tubería de revestimiento.

b) Las dimensiones de las partes principales del tapón como son los elementos de sello, anillos y cuña, debe corresponder a las características marcadas en el cuerpo de la herramienta.

c) Asegurarse que la cabeza de la barra de control del tapón corresponda a la del soldador a utilizarse.

d) Si se va a bajar con cable efectúe los cambios pertinentes en la herramienta selladora y en la barra de control del tapón.

Una vez hecho lo anterior conectar el tapón al soldador de la siguiente forma:

a) Con el soldador ya conectado a la tubería de producción o a la parte inferior del cementador y todo suspendido del elevador levanta el tapón-puente apoyándolo en el piso de la subestructura y después baje el conjunto para que conecte la cabeza de la barra de control del tapón-puente con esto el perno "J" se mueve de la posición 1 a la posición 2.

b) Levantar las herramientas para que el perno "J" se mueva a la posición 3. Al bajar estas al pozo, el perno se desplaza a la posición 4.

c) Bajar las herramientas a la profundidad programada, al bajar en la posición 4 la guía de la cabeza recuperadora empuja al cuerpo, conos y elementos de sello hacia abajo. La barra de control, crucetas y cuñas se sostienen en una posición neutral de tal forma que los conos no se puedan deslizar bajo las cuñas para anclar el tapón, la válvula de control mantiene abierta la válvula inferior y la presión del fluido abre la válvula superior

permaneciendo en esta posición mientras se introduce el tapon-puente. En la figura A-9 se muestra el detalle de ranura "J".

Tomar en cuenta que:

- El relén de la cabeza recuperable conecta solo con torque izquierdo.
- El perno "J" de la cabeza de la barra de control del tapon-puente siempre entra en la posición 1 y sale por la posición 6.
- El tapon-puente se empaca por si mismo con presión de arriba o de abajo.

Cabeza recuperadora tipo lavador modelo "H".

Este accesorio con manga de circulación, es un equipo opcional que se usa con el tapon-puente recuperable en operaciones de fractura selectiva en las que se emplean bolas de nylon de 7/8". El claro entre la manga de circulación y la cabeza de la barra de control del tapon, es suficiente para permitir el paso de las bolas mencionadas, haciendo posible la circulación inversa de dicho material o de otros recortes lejos del tapon, de tal manera que la cabeza recuperadora pueda acoplarse en la cabeza de la barra de control.

El tapon-puente se corre en la cabeza recuperadora con la manga de circulación en posición de operación, la manga para esta operación se desliza sobre la guía hacia afuera y se limita su viaje hacia arriba por un anillo de tope. Cuando se recupera el tapon-puente, la manga de circulación cuelga abajo del extremo de la cabeza recuperadora y hace el contacto inicial con las bolas utilizadas en la fractura o recortes en la parte de arriba del tapon, los recortes en la cabeza de la barra de control se lavan con circulación inversa, hasta que la manga de circulación toca la caja de la válvula superior. La cabeza recuperadora entonces se puede bajar sobre la cabeza de la barra de control y recuperar sin problemas el tapon-puente. La figura A-10 muestra la cabeza lavadora modelo "H".

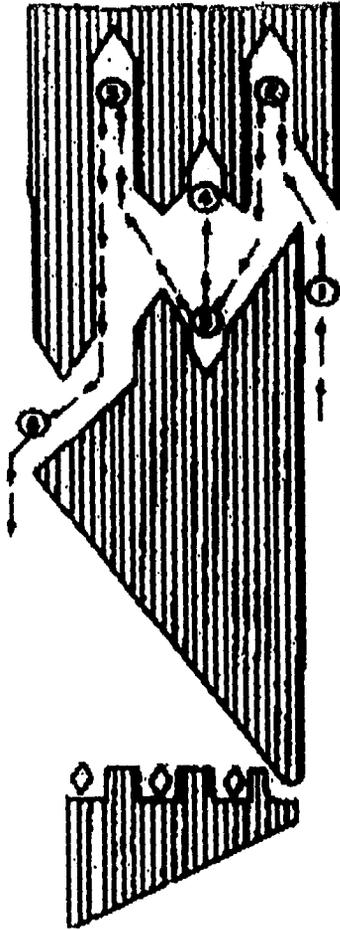


FIGURA A-9 DETALLE DE RANURA "J"



FIGURA A- 10 CABEZA SOLTADORA MODELO "H"

- Retenedores de cemento EZ-DRILL.

Existen 4 tipos:

1. EZ-DRILL empaque para forzar.
2. EZ-DRILL SV empaque para forzar.
3. EX DRILL SV para agujero descubierto.
4. EZ-DRILL tapón-puente.

Las características de cada uno son:

1. EZ-DRILL empaque para forzar.

Es para alta temperatura y presión, diseñado para aguantar presión desde abajo del sello, este empacador tiene incorporada una válvula de contrapresión y se fabrican desde 2<sup>3/8"</sup> a 4", para usarse dentro de la tubería de producción y de 4<sup>1/2"</sup> a 7" para tuberías de revestimiento.

2. EZ-DRILL SV empaque para forzar.

Es para alta temperatura y presión, teniendo incorporada una válvula deslizable balanceada, diseñada para controlar movimientos de fluido dentro del pozo. Este retenedor aguanta presión en ambas direcciones y se fabrica para tuberías de revestimiento de 4<sup>1/2"</sup> a 13<sup>3/8"</sup>.

3. EZ-DRILL SV para agujero descubierto.

Este empacador tiene un elemento de hule largo para asegurar un sello contra la formación a la hora de estar forzando cemento y tiene el mismo tipo de válvula deslizable que el anterior empacador.

4. EZ-DRILL tapón-puente.

Es para alta temperatura y presión, estos tapones están diseñados para aguantar presión en ambas direcciones y se fabrican para tuberías de revestimiento de 4<sup>1/2"</sup> a 13<sup>3/8"</sup>.

Las formas de diseño que distinguen a los retenedores perforables para forzar y tapones puente EZ-DRILL, se describen a continuación:

a) Elemento de sello.

En cada extremo del elemento sellador (hule), están colocadas zapatas de metal expandible, diseñadas para expandir junto con el hule empacador, ayudando a prevenir la deformación del hule sobre los hombros del metal, los retenedores EZ-DRILL para forzar tienen incorporado un hule suave en medio de dos de mayor dureza.

b) La herramienta tiene menor diámetro.

El diseño del elemento empacador en estas herramientas, permite ser usado en menores diámetros dando por resultado que:

- Solamente un retenedor será necesario para una medida de tubería de revestimiento sin importar su libraje. Cuando se utiliza este retenedor verifique que tenga los elementos de sello adecuados al libraje de la tubería de revestimiento donde se va a anclar.

- Mas espacio entre el retenedor y el diámetro interior de la tubería de revestimiento, debido a esto habrá menos peligro que el retenedor se ancle prematuramente mientras se va bajando.

c) Mandril flotante.

El mandril en el cual todas las partes exteriores están montadas, se encuentra libre para moverse con la presión, fuerzas debidas a la presión del pozo en cualquier dirección de arriba o debajo del retenedor, se aplican directamente a las cuñas y el elemento sellador y esto hará que el retenedor ancle y selle más, según sea el aumento de presión.

Otras formas de diseño:

a) Canasta protectora.

La parte inferior de los empacadores EZ-DRILL está diseñada para prevenir que los recortes y alguna otra basura hagan fallar la herramienta, soltando las cuñas y anclando el retenedor mientras se va bajando, la canasta está ribeteada para agarrarse al cemento y resistir la rotación cuando se está moliendo.

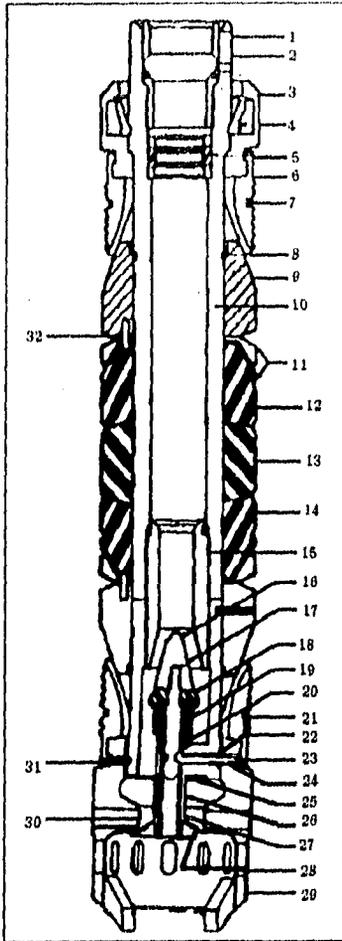
b) Diseño para removerse rápidamente.

Cada parte del retenedor EZ-DRILL está diseñada para removerse rápidamente del pozo, ya sea por el método de molienda o con herramienta de cable, para esto se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El material usado en cada componente está seleccionado para llenar los requisitos de fuerza necesaria y ser completamente molido.
- Los hombros, las zapatas y los elementos empacadores, están colocados de manera que formen una sola pieza, para evitar que giren cuando se están moliendo.
- Las cuñas están ancladas de manera que tienden a quebrarse en pedazos pequeños, los cuales podrán extraerse mediante circulación.

En la figura A-11 se muestra el esquema del retenedor de cemento "EZ" en corte transversal con válvula de contra presión y en la figura A-12 el retenedor de cemento "EZ-SV" en corte transversal con válvula balanceada.

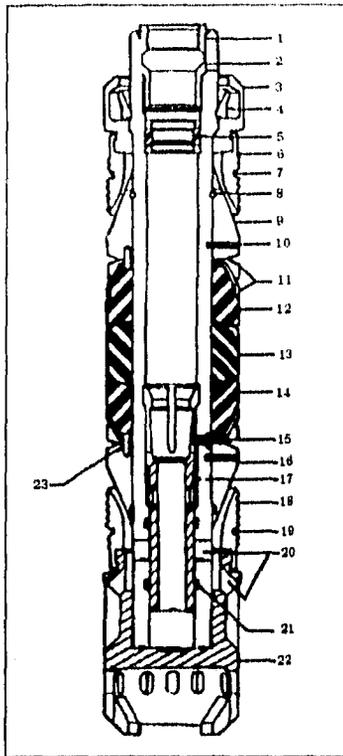
Los retenedores EZ-DRILL, se anclan eléctricamente mediante el cable o con herramienta (soldador metálico) adecuada con la sarta de tubería de producción o de trabajo. Es importante que se conozcan las precauciones que se toman antes del armado e introducción de la herramienta y del retenedor.



N. DESCRIPCION

- 1 CAMISA DE BRONCE (BRONCE)
- 2 MANDIL SUPERIOR (ACERO FUNDIDO)
- 3 CABA DE ANILLO RETEN (ACERO FUNDIDO)
- 4 ANILLO RETEN (ALUMINIO)
- 5 SELLO INTERNO (HULE CON ZAPATA DE BRONCE)
- 6 CASAS (HIERRO COLADO DURO)
- 7 CINCHO (HIERRO COLADO DURO)
- 8 ANILLO RETENEDOR (BRONCE)
- 9 CONO DE CUNA (ACERO FUNDIDO)
- 10 TORNILLO (BRONCE)
- 11 ZAPATAS DE EXPANSION (BRONCE)
- 12 EMPAQUE SUPERIOR (HULE)
- 13 EMPAQUE CENTRAL (HULE)
- 14 EMPAQUE INFERIOR (HULE)
- 15 ASIENTO DE LA VALVULA (BRONCE)
- 16 VALVULA DE CONTRA-PRESION (BRONCE)
- 17 VASTAGO DE VALVULA
- 18 COPA DE SELLADO (HULE)
- 19 (BRONCE) PROTECTOR
- 20 RESORTE (ACERO INOXIDABLE)
- 21 CINCHO RETENEDOR (ACERO DULCE O BRONCE)
- 22 RESORTE (ACERO INOXIDABLE)
- 23 PERNO RETENEDOR DE LA VALVULA (BRONCE)
- 24 PERNO RETENEDOR (BRONCE)
- 25 GUIA DE LA VALVULA (BRONCE)
- 26 ESPACIADOR (ALUMINIO)
- 27 TUERCA RETENEDORA (BRONCE)
- 28 PROTECTORA CASASTA (BRONCE)
- 29 SOPORTE DE CASAS INFERIORES (ACERO FUNDIDO BLANDO)
- 30 ROSACA 2 3/8 PG 10 HILOS
- 31 TORNILLO DE ACERO
- 32 PERNOS (ACERO DULCE)

FIGURA A 11 RETENEDOR DE CEMENTO "EZ" EN CORTE TRANSVERSAL CON VALVULA DE CONTRA PRESION



LISTA DE DESCRIPCION

- 1 CUBIERTA DE FUNDICION (BRONCE)
- 2 MANDRIL (HIERRO COIADO DUREZA MEDIA)
- 3 ANILLO DE ANILLOS RETEN (ACERO FUNDIDO DUREZA MEDIA)
- 4 ANILLO RETEN ALUMINIO
- 5 SELLOS INTERIORES (HULE CON ZAPATA DE BRONCE)
- 6 CUNA DE CUSAS (ACERO FUNDIDO DURO)
- 7 CINCHO RETENEDOR (HIERRO O BRONCE)
- 8 ANILLO RETENEDOR DE CUSAS (BRONCE)
- 9 TOPE DE CUSAS (ACERO FUNDIDO BLANDO)
- 10 TORNILLOS PRISIONEROS (BRONCE)
- 11 ZAPATAS DE EXPASION (BRONCE)
- 12 EMPAQUE SUPERIOR (HULE)
- 13 EMPAQUE CENTRAL (HULE)
- 14 EMPAQUE EXTERIOR (HULE)
- 15 TORNILLOS DE ALINEAMIENTO (HIERRO DULCE)
- 16 TOPE DE CUSAS INFERIORES (ACERO FUNDIDO)
- 17 VALVULA DESLIZABLE (BRONCE)
- 18 CUSAS INFERIORES (HIERRO COIADO-DURO)
- 19 CINCHO RETENEDOR (ACERO DULCE O BRONCE)
- 20 ORIFICIOS PARA CIRCULACION DE FLUIDOS
- 21 SELLO DE LA VALVULA (HULE)
- 22 SOPORTE CUSAS INFERIORES (ACERO FUNDIDO)
- 23 PERNOS (ACERO FUNDIDO)

FIGURA A 12 RETENEDOR DE CEMENTO "EZ. SV" EN CORTE TRANSVERSAL CON VALVULA BALANCEADA

- La herramienta para soltar y anclar los retenedores EZ-DRILL se deberá desarmar completamente, limpiar y engrasar despues de cada operacion.

- Es necesario regresar el anillo partido a su posicion en la ranura que hay en el mandril, este permite que la camisa para fijar el retenedor se encuentre asegurada en su lugar.

- Si la herramienta no se desarma es erroneo dar rotacion en el cople, ya que no es señal de que el anillo haya regresado a su ranura.

La figura A-13 muestra el esquema del soltador mecánico howco para tapón- puente EZ-DRILL.

Antes de que se instale el retenedor en la herramienta, los bloques o muelles de friccion deberán verificarse y ver que el número de ellos corresponda con el número de herramienta que se va a usar. De esta manera se asegura que se emplearon las partes correctas para el tamaño y peso de la tuberia de revestimiento en que se va a colocar la herramienta, para esto se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1. Cuando se vava a meter la herramienta del tipo de bloques de friccion, el número de muelles para este, se deberá verificar según el tipo de herramienta, así se asegura que los bloques tendran suficiente fuerza para poder anclar el retenedor.

2. Verificar que el mandril inferior (Stinger) de la herramienta, sea el adecuado para el retenedor que se va a anclar.

3. La válvula deslizable en los retenedores para agujeros descubiertos se localiza más abajo que en los EZ-DRILL, por lo que se debera usar un mandril de fijacion y operacion más largo.

4. Antes de instalar el retenedor en la herramienta soltadora hacer un viaje de ensayo, bajando esta al interior de la tuberia de revestimiento uno o dos tramos, para verificar que pase a traves del conjunto de control superficial.



FIGURA A 13 SOLTADOR MECANICO HOWCO PARA TAPON PUENTE "EZ DRILL"

5. Verificar que el retenedor tenga la valvula deslizable en posicion cerrada. Lo anterior facilitará la introducción del mandril de fijación en esta y el enrosque de la tuerca en el cuerpo del retenedor.

6. Despues de haber verificado la posición de la valvula deslizable se debe engrasar ligeramente el mandril de fijación e insertarlo. El peso de uno o dos tubos es normalmente suficiente para empujar el mandril de fijación, a traves del sello en la parte superior del retenedor y abriendo la valvula deslizable.

7. Lo antes descrito permite que la tuerca de la herramienta enrosque en el retenedor, si este peso no fuera suficiente, empujar el mandril de fijación tan lejos como sea posible, levantar la tubería y el retenedor 2 ó 3" y golpear la parte inferior del retenedor contra el piso para forzar el mandril de fijación dentro del retenedor, por último asegurar éste a la herramienta enroscando la tuerca correspondiente a la camisa de tensión del retenedor.

8. El acceso a la tuerca se obtiene a través de las ventanas o agujeros en la herramienta la cuál debere estar equipada con una camisa de protección, esta puede levantarse para que quede expuesta la ventana o agujero.

Llevar a la tuerca de la camisa de protección con poco apriete para evitar el daño a la camisa de tensión.

9. Al iniciar la acción de bajar el retenedor con el sollador mecanico dentro del pozo, hacerlo con precaución al pasar por el equipo de control superficial (preventores de reventones) y los primeros tramos de la tubería de revestimiento.

10. Al estar introduciendo no frenar repentinamente (puede anclarse prematuramente el retenedor).

11. Evitar dar rotacion a la derecha cada vez que efectue una conexion.

#### - Retenedor de cemento MERCURY K-1.

En la figura A-14 se muestra el esquema del retenedor MERURI K-1, es de las mismas características que el tapon MERCURY K, la única diferencia es que el modelo K-1 se corre dentro del pozo con soltador mecánico modelo K-1 o con soltador eléctrico modelo E-A, proporcionando la ventaja de una corrida rápida en pozos profundos. Los retenedores modelo K-1 se utilizan para efectuar cementaciones a presión y se emplean como tapones aisladores de intervalos.

Se construye con las características siguientes:

- a) Al igual que el modelo K, posee una válvula de dos pasos (tipo manga balanceada), se puede operar desde la superficie con la sarta de tubería de producción o de trabajo, su función es la de mantener la presión final forzada en la herramienta con sólo levantar la sarta y remover el mandril de fijación.
- b) Proporciona la facilidad de ser introducido dentro del pozo con el máximo de confianza, ya que posee gran soporte de paso dentro de los diferentes rangos de tubería de revestimiento que se manejan en los pozos petroleros.
- c) El elemento de empaque proporciona un sello efectivo para poder realizar la cementación a presión a través de la tubería y el retenedor.
- d) El material con que se construye es de fácil destrucción, mediante la operación de molienda.
- e) Aislar la presión de cementación, del valor de la presión original por la columna hidrostática del fluido de control.

Para efectuar correctamente las operaciones del retenedor de cemento, es necesario que tenga presente las recomendaciones que a continuación se indican:

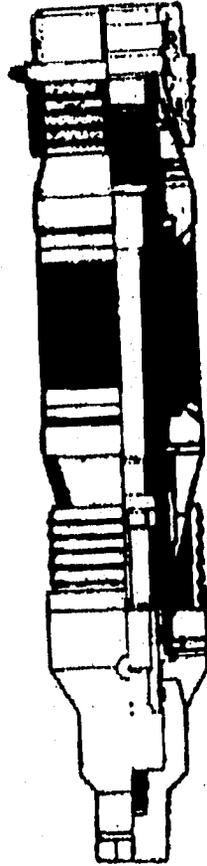
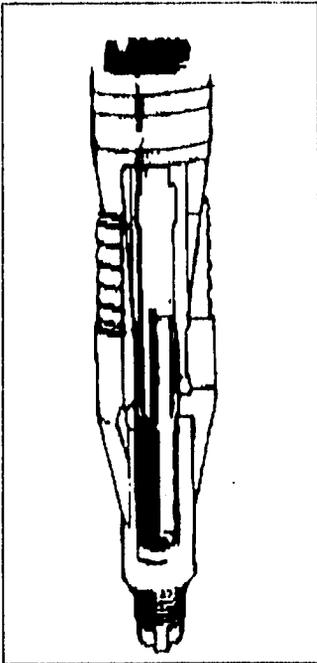


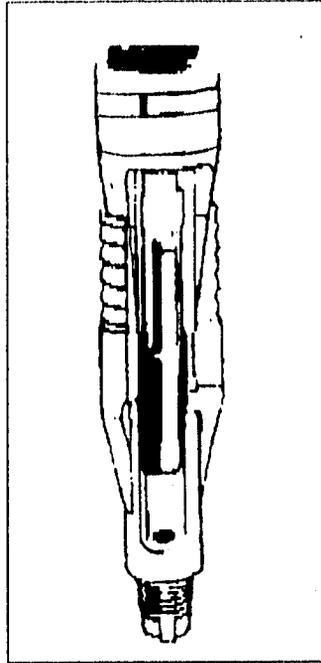
FIGURA A 14 RETENEDOR MERCURY "K-1"

- Antes de introducir el retenedor al pozo efectuar un viaje de limpieza con el escariador adecuado y operarlo frente a la zona donde se anclara, circular un ciclo completo para limpiar el fluido de control.
- Verificar que el retenedor sea del tamaño adecuado a la tubería de revestimiento donde se va a introducir y que la herramienta de anclaje sea la apropiada para el rango del retenedor, ésta puede ser mecánica o eléctrica.
- Una vez conectada a la sarta de tubería se debe bajar con precaución a una velocidad moderada y uniforme.
- Evitar las frenadas bruscas cada vez que se efectue una conexión y no girar la sarta a la derecha.
- Proteger la boca del pozo instalando el hule protector en la tubería.
- Cuando se programe colocar un retenedor muy cercano al intervalo abierto o próximo a disparar, se recomienda ajustarlo y anclarlo con soldador y cable eléctrico.

En la figura A-15 se muestran las posiciones del retenedor.



ABIERTA



CERRADA

FIGURA A 15 POSICIONES DEL RETENEDOR

## APENDICE B

### NUEVAS TECNICAS DE RECEMENTACION.

A continuación se mencionan algunas técnicas nuevas de recementación utilizadas en zonas petroleras de la Bahía de Prudhoe en Alaska y Mar del Norte.

I. En la Bahía de Prudhoe, Alaska se estudió la calidad y seguridad del procedimiento de una operación forzada con tubería flexible y las propiedades de la lechada de cemento mezclada en campo.

Las operaciones de cementación forzada son aplicadas para solucionar problemas en el pozo y zonas de abandono. A mediados de 1990, la rápida declinación de la producción en el pozo debida a la operación de fracturamiento agresivo empleando un riguroso diferencial de presión, tuvo que ser empleado un programa de cementación forzada con tubería flexible, el cual al final aumento la presión de 1500 a 3500 psi. Este resultado es verdadero y por esta razón la tubería flexible es la adecuada en estas operaciones.

El éxito de una operación de cementación forzada con tubería flexible depende de la ejecución lenta del bombeo de la lechada de cemento. Un criterio para realizar un sistema de cementación forzada con tubería flexible, es considerar el sistema de manera más estricta que aquellos que se utilizan en una cementación primaria. Por lo tanto, una tabla de predicciones de sistemas de cemento y procedimientos, da una reproducción superior a la que se tiene durante el desarrollo de la operación. Las dificultades al realizar lo estimado en las propiedades de la lechada, la preparación de esta durante la operación y una ubicación complicada de la operación provocan el incremento del costo de las operaciones.

Las complicaciones más costosas son las del fraguado anticipado del cemento, ya que esto provoca que la tubería se pegue en el pozo y al corregir este nuevo problema se pierde tiempo, dinero y en ocasiones crea

## APENDICE B

### NUEVAS TECNICAS DE RECEMENTACION.

A continuación se mencionan algunas técnicas nuevas de recementación utilizadas en zonas petroleras de la Bahía de Prudhoe en Alaska y Mar del Norte.

1. En la Bahía de Prudhoe, Alaska se estudió la calidad y seguridad del procedimiento de una operación forzada con tubería flexible y las propiedades de la lechada de cemento mezclada en campo.

Las operaciones de cementación forzada son aplicadas para solucionar problemas en el pozo y zonas de abandono. A mediados de 1990, la rápida declinación de la producción en el pozo debida a la operación de fracturamiento agresivo empleando un riguroso diferencial de presión, tuvo que ser empleado un programa de cementación forzada con tubería flexible, el cual al final aumento la presión de 1500 a 3500 psi. Este resultado es verdadero y por esta razón la tubería flexible es la adecuada en estas operaciones.

El éxito de una operación de cementación forzada con tubería flexible depende de la ejecución lenta del bombeo de la lechada de cemento. Un criterio para realizar un sistema de cementación forzada con tubería flexible, es considerar el sistema de manera más estricta que aquellos que se utilizan en una cementación primaria. Por lo tanto, una tabla de predicciones de sistemas de cemento y procedimientos, da una reproducción superior a la que se tiene durante el desarrollo de la operación. Las dificultades al realizar lo estimado en las propiedades de la lechada, la preparación de esta durante la operación y una ubicación complicada de la operación provocan el incremento del costo de las operaciones.

Las complicaciones más costosas son las del fraguado anticipado del cemento, ya que esto provoca que la tubería se pegue en el pozo y al corregir este nuevo problema se pierde tiempo, dinero y en ocasiones crea

## APENDICE B

### NUEVAS TECNICAS DE RECEMENTACION.

A continuación se mencionan algunas técnicas nuevas de recementación utilizadas en zonas petroleras de la Bahía de Prudhoe en Alaska y Mar del Norte.

1. En la Bahía de Prudhoe, Alaska se estudió la calidad y seguridad del procedimiento de una operación forzada con tubería flexible y las propiedades de la lechada de cemento mezclada en campo.

Las operaciones de cementación forzada son aplicadas para solucionar problemas en el pozo y zonas de abandono. A mediados de 1990, la rápida declinación de la producción en el pozo debida a la operación de fracturamiento agresivo empleando un riguroso diferencial de presión, tuvo que ser empleado un programa de cementación forzada con tubería flexible, el cual al final aumento la presión de 1500 a 3500 psi. Este resultado es verdadero y por esta razón la tubería flexible es la adecuada en estas operaciones.

El éxito de una operación de cementación forzada con tubería flexible depende de la ejecución lenta del bombeo de la lechada de cemento. Un criterio para realizar un sistema de cementación forzada con tubería flexible, es considerar el sistema de manera más estricta que aquellos que se utilizan en una cementación primaria. Por lo tanto, una tabla de predicciones de sistemas de cemento y procedimientos, da una reproducción superior a la que se tiene durante el desarrollo de la operación. Las dificultades al realizar lo estimado en las propiedades de la lechada, la preparación de esta durante la operación y una ubicación complicada de la operación provocan el incremento del costo de las operaciones.

Las complicaciones más costosas son las del fraguado anticipado del cemento, ya que esto provoca que la tubería se pegue en el pozo y al corregir este nuevo problema se pierde tiempo, dinero y en ocasiones crea

problemas aun mayores a los tenidos originalmente. Un factor clave en esta operacion es la consistencia del enjarre de lodo generado durante la perforación.

- Propiedades, parámetros y procedimientos en una lechada de cemento.

Los parametros indispensables que son considerados para definir los requerimientos de las propiedades de la lechada son mencionados a continuación:

1. Estabilidad de la lechada.
2. Propiedades de la capa filtrada.
3. Perdida de fluido.
4. Tiempo de espesamiento (fraguado del cemento).
5. Composición de la lechada.
6. Esfuerzo cortante.

Las características de cada uno son:

1. Estabilidad de la lechada.

En una operación de cementación forzada con tubería flexible la estabilidad de la lechada es muy importante, debido a que no existe pérdida de agua y no tener asentamiento de sólidos. Frecuentemente el cemento queda estático dentro del pozo y debido a esto se debe ampliar el periodo de tiempo de fraguado de 1 a 4 horas. Una pequeña inestabilidad en el sistema de la lechada provoca las siguientes complicaciones:

- Taponamiento del inyector y de la tubería.
- Incompatibilidad de la lechada con las propiedades del enjarre.
- Reducción del tiempo de trabajo.
- Problemas durante la limpieza del pozo.

Las especificaciones que deben seguirse para el proceso de estabilizar el cemento estan descritas por el API (especificación 10, para materiales y pruebas de cementos para pozos petroleros, 5a edición, 1 de julio de 1990).

## 2. Propiedades de la capa filtrada - Pérdida de fluidos.

La capa generada durante la inyección de la lechada debe resistir la acción de la limpieza del pozo. El criterio utilizado para determinar el espesor de la capa y la firmeza de la misma debe de utilizarse un criterio el cual se define al realizar pruebas de laboratorio.

## 4. Tiempo de espesamiento.

La alta presión en una operación con tubería flexible depende de la presión de inyección y el tiempo en el que se mantiene la presión. La limpieza del pozo es un proceso que dura varias horas. A los sistemas de la lechada se les designa un tiempo de espesamiento el cual varía de 7 a 10 horas.

## 5. Composición de la lechada.

Son usados dos sistemas básicos en una operación forzada con tubería flexible. Una es incorporando aditivos para pérdida de fluido como copolímero, el látex líquido es utilizado en el segundo sistema, puede ser necesario añadir productos químicos este no es usado en la lechada para controlar la pérdida de fluidos. Ejemplos de estos son los cloruros de potasio para formaciones sensibles y surfactantes para mejorar la fuerza de enlace, también se utiliza para estabilizar la lechada.

## 6. Esfuerzo cortante.

El API (Instituto Americano del Petróleo) proporcionó la norma para las lechadas de cemento las cuales fueron mezcladas en el laboratorio. El cemento se adiciona al líquido y se mezcla en una mezcladora a 4000 rpm por 15 segundos, después se mezcla a 12000 rpm por 35 segundos. El efecto del tiempo de corte en las propiedades de la lechada son investigadas en el laboratorio, ya que este varía a 12000 rpm y las propiedades de la lechada se miden conforme al perfil de procedimientos seleccionados previamente.

Una muestra de 600 ml es mezclada a 4000 rpm por 15 segundos en el laboratorio, la fuerza por unidad de masa puede ser calculada con:

$$E/ml = 0.2676 + 0.1605 * t_{12000} \text{ -----(1)}$$

Donde:

E = Fuerza de mezclado (kg).  
 ml = Masa de la lechada (kg).  
 $t_{12000}$  = Tiempo de mezclado a 12000 rpm (s).

$$E/ml = 2.35 (W * t / \rho_m * VL) \text{ -----(2)}$$

Donde:

W = Fuerza (HP).  
 t = Tiempo (min).  
 $\rho_m$  = Densidad de la mezcla (lb/gal).  
 VL = Volumen de la lechada (bl).

$$t = (E/ml)_{lab} * (\rho_m * VL / W * 2.35) \text{ -----(3)}$$

- Cualidades del proceso de la lechada.

Las cualidades de la lechada consisten en una rigurosa investigación, el seguimiento de la secuencia de esta es:

1. Inicialmente es la prueba para verificar el sistema y mejorar la admisión del enjarre.
2. Investigación de la consistencia de la lechada, la reología, el enjarre/perdida de fluido y el tiempo de espesamiento a varios tiempos de corte (12000 rpm).

3. Determinación del esfuerzo cortante requerido para obtener el desempeño aceptable de la lechada para reproducirlo bajo seguridad y lo más adecuadamente.
4. Repetir la prueba para verificar el desempeño de la lechada y la veracidad de los datos de la prueba.
5. Pruebas de resistencia al ácido y si el cemento es resistente al ácido.
6. Establecer el procedimiento y tiempo de mezclado en el campo.
7. Verificar en campo los datos de laboratorio.

- Calidad de las rutinas de seguridad.

Se han establecido rutinas especializadas para asegurar el óptimo control sobre las propiedades de la lechada durante todo el proceso. Los parámetros de la lechada son basados en datos obtenidos de la calidad de la lechada y en los requerimientos específicos durante la operación:

a) Diseño de la lechada -- pruebas dirigidas.

1. Propiedades reológicas determinadas dentro de los límites de las pruebas de consistencia de la lechada durante el análisis de la misma y el enjarre/pérdida de fluidos que es requerido para las condiciones del pozo.

2. Verificación del tiempo de espesamiento.

b) Preparación de la mezcla de fluidos.

1. Mezclar un día antes del trabajo los fluidos a utilizar.

2. Preparar los fluidos de la mezcla dosificados en una mezcladora para ser usados en el trabajo y transportarlos al lugar de la operación, evitar que se contaminen y no trasladarlos de un recipiente a otro.

3. Pesar todos los aditivos líquidos y sólidos.
4. Circular los fluidos hasta que estén homogéneos.
5. Muestrear los fluidos que previamente han estado almacenados por 30 días en el laboratorio.

c) Combinar pruebas de laboratorio y de campo.

1. Pruebas reológicas a temperatura de mezclado (ambiente), BHCT.
2. Pruebas de enjarre.
3. Pruebas de pérdida de fluidos.
4. Pruebas de tiempo de espesamiento.

d) Mezclado de la lechada en el pozo.

1. Adicionar el material sólido lo más uniforme posible.
2. Revisar dos veces la densidad desde 1 pg abajo del peso diseñado de la lechada.
3. Calcular la energía necesaria para mover el peso de la lechada.

e) Después de acondicionar la lechada en el laboratorio hacer pruebas.

1. Reología y temperatura de mezclado (BHCT).
2. Pruebas de enjarre.
3. Pruebas de pérdida de fluido.

Los datos y resultados son parte de un largo número de pruebas que conducen a la calidad y operatividad de la lechada relacionando el trabajo de laboratorio.

- Para una operación de cementación forzada se debe considerar lo siguiente:

1. La norma estricta de funcionamiento de la lechada, para una operación forzada con tubería flexible, puede ser diseñada con copolímeros y para pérdida de fluidos con aditivos latex líquido.
2. La energía de mezclado puede afectar los parámetros de la lechada.
3. Las propiedades de la lechada dan al sistema de estya una estabilidad cuando cierto nivel de energía es impartido.
4. Una teoría apropiada para determinar y comparar la energía de mezclado en el laboratorio y en campo verificando el equipo.
5. Modificación del mezclado en laboratorio y el procedimiento para probar varias veces las lechadas utilizadas en una operación forzada con tubería flexible en la Bahía de Prudhoe.

## II. Tubería flexible para mejorar la cementación forzada en el Mar del Norte.

Desarrollos recientes se han llevado a cabo para mejorar el uso de las unidades de tubería flexible (CTU's) en el Mar del Norte, como una alternativa de perforación tradicional. Cuando se tiene excesiva producción de gas o agua mediante la cementación forzada con tubería flexible se puede bloquear satisfactoriamente los canales de la zona.

La tubería flexible hace mas atractivos economicamente los trabajos de cementación, debido a los requerimientos de equipo y el reducido tiempo de operacion, los operadores pueden trabajar en superficie manteniendo la presión en la cabeza del pozo.

En lugar de mover el aparejo de perforacion en la operacion de reparación, el operador puede colocar unos patines metalicos en las CTU y un sistema de cementacion para la plalafoma. La economia en tiempo y equipo en la

operación es lo que reduce pérdidas, otra alternativa es dejar al margen los pozos candidatos a colocarles tapón de abandono.

Mayores innovaciones han fomentado el uso de tubería flexible en operaciones de cementación forzada como:

1. Equipo.
2. Preparación de procedimientos antes de la cementación.
3. Procedimiento de la cementación.
4. Procedimiento de limpieza.

Las características de cada uno son:

1. Equipo (diseñar el cemento y propiedades de control).

Las plataformas convencionales semi-sumergibles y sistemas de tubería ascendente, pueden ser usados para terminaciones bajo el mar, sin embargo la plataforma puede ser pequeña debido a que las CTU's requieren de menor espacio. Ahora ya existe la tecnología para la reparación completa del pozo bajo el mar sin el uso de una plataforma y tubo ascendente.

Empleando un sistema de tubería flexible (SCTS) bajo el mar, se puede realizar el arreglo de la tubería flexible desde una embarcación relativamente pequeña, los buzos son apoyados abordo de la embarcación durante la operación.

El SCTS, consiste de una tubería de producción, un carrete montado en la embarcación y un inyector montado el árbol sumergible. Las corridas de T.P. son realizadas directamente al mar desde el carrete al inyector, bajando con la asistencia de buzos o bien con una línea guía de la cabeza del pozo hacia abajo el mar. Se han diseñado más sistemas de tubería flexible para ser utilizados en el mar a una profundidad de 1000 pies, pero se espera puedan ser aplicados en aguas más profundas según las necesidades en el desarrollo.

Los parámetros considerados en son:

- Pérdida de fluidos.
- Control de calidad de la lechada de cemento.
- Tiempo de fraguado.
- Composición y propiedades de la lechada.
- Propiedades del filtrado.

## 2. Preparación.

Es indispensable realizar las preparaciones necesarias para un trabajo de reparación. Algunos procedimientos se mencionan a continuación:

- Registro de temperatura del fondo del pozo estatico y circulando, se utilizan registros electrónicos para mejorar el establecimiento de datos para ayudar a delinear el tiempo exacto de fraguado y el control de pérdida de fluido.
- Hacer fluir ácido en toda la perforación para forzar la trayectoria y provocar una mejor union del cemento limpio.
- Se pone a producir el pozo, para remover finos y acarrearlos a la superficie.
- Al final de la tubería flexible con el cable de acero a la profundidad total de la tubería de producción, se localiza la parte superior del tapon PBTD (Profundidad Total de la Parte Superior del Tapon).
- Correlacionar al final de la tubería flexible con el cable de acero la parte inferior de la tubería de producción y la profundidad total de la localización de la parte superior del tapon (PBTD) para garantizar la precisión de la operación de la reparación.
- Capacidad de volumen de la tubería flexible.

- Desplazamiento de gas de la formación al pozo con excesivo gradiente de fractura y el agua contenida en el pozo, provocan un abatimiento de presión y se establece un gradiente hidrostático.

### 3. Procedimiento de la cementación.

Una vez establecidas las características del control del pozo y tener el equipo preparado, el operador puede iniciar el trabajo de reparación. Siguiendo los pasos generalizados y resumidos de los recientes trabajos realizados en el Mar del Norte se obtiene lo siguiente:

a) Correr la tubería flexible en el pozo, conocer el tiempo de bombeo para desplazar la lechada por la tubería flexible al pozo, si el agua de la formación no es compatible con los demás fluidos puede descontrolar el pozo y provocar graves problemas. Al evitar la entrada de escombros a la tubería de producción se previene que la T.P. se colapse.

b) Correlacionar el indicador de profundidad al alcanzar y tocar el fondo del pozo con la profundidad total en la parte superior del Tapon (PBTD), estirar hacia arriba la tubería aproximadamente 10 pies.

c) Los fluidos bombeados al pozo son:

- Surfactantes y solventes.
- Baches de agua limpia.
- Lechada de cemento.
- Solución polimérica.

d) Inyectar surfactante y solvente para limpiar el pozo y realizar una mejor unión entre el cemento y los poros de la formación.

e) La lechada de cemento es bombeada en un lapso de tiempo previamente calculado.

f) Desplazamiento del remanente de la lechada en la tubería flexible .

g) Se inyecta presión lentamente, no debe exceder la presión de fracturamiento para el intervalo, circular gastos mínimos a cierto tiempo (requiere de estrangular continuamente el gasto). Se inyecta por 12 o 15 minutos, justo abajo de la presión de fracturamiento, después lentamente se incrementa la presión de inyección hasta llegar a lo deseado (aumentar a 3500 psi) el siguiente de 15 a 30 minutos y después sostenerlo por más de 1 hora. Periódicamente se mueve la tubería flexible y que esta quede libre.

#### 4. Procedimiento de limpieza.

Una de las etapas en la cementación forzada es el procedimiento de limpieza del pozo, se han desarrollado dos métodos para ello.

El primero se aplica inmediatamente después de liberar la presión, este método es más aplicado debido a su simplicidad, de cualquier modo no es posible sacar el cemento sobrante del pozo, esto a causa de su alta densidad y/o debido a la resistencia al colapso de la tubería de producción.

El segundo método de limpieza del pozo, implica diluir y contaminar el cemento restante que queda en el pozo, con un fluido de menor densidad. En el pasado el exceso de cemento que quedaba en el pozo, podía ser contaminado con borax y bentonita gel para facilitar la remoción de éste.

En México, ya han sido aplicadas estas técnicas, estas fueron adaptadas a las condiciones del pozo y ejecutadas en algunas regiones petroleras del país.

## BIBLIOGRAFIA.

1. Suman, George O., Jr. y Ellis, Richard C., "Cementing Handbook", World Oil's, 1977.
2. Salinas Salazar, Lisandro, "Cementos para Pozos Petroleros", Fac. de Ingenieria, U.N.A.M., 1981.
3. Smith, Dwight K., "Cementing", Monograph volume 4 of The Henry L. Doherty Series, 1976.
4. Halliburton Services, "Customer Cementing Manual".
5. SPE - Society of Petroleum Engineers, "Technology Cementing".
6. Nelson, Erik B., "Well Cementing", Schlumberger, Educational Services.
7. Clark, C.R. and Carter, L.G. "Mud Displacement With Cement Slurries", Journal of Petroleum Technology, July 1973.
8. Cabrera Montero, Ma. Isabel "Cementos, Aditivos y su Aplicación a la Industria Petrolera", Fac. de Ingeniería, U.N.A.M., 1990.
9. Ing. Benitez, Miguel Angel, "Cementaciones", apuntes sobre cementaciones, Instituto Mexicano del Petroleo, Subdirección de Desarrollo Profesional, 1982.
10. Gray, G, Darley H. and W. Rogers, "Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids". Fourth edition, 1978.
11. Garcia Rivera, Alfredo y Padilla Maltrata, Ricardo, "Selección del tipo de Terminación para Pozos Horizontales", Fac. de Ingenieria, U.N.A.M., 1992.
12. Petroleum Extension Service, "Fundamentos de Perforación", tomo 1, Universidad de Texas y División de Extensión. Austin, Texas, 1961.

13. Plan Nacional de Capacitación Obrera, PEMEX - IMP, "Reparación de Pozos III", nivel 4, Plan Nacional de Capacitación Obrera, PEMEX - IMP, Gerencia de Reparación y Terminación de Pozos.
14. Moore, P.L. "Drilling Practice Manual", Pen Well, Publishing Company, Tulsa, Okla.
15. Ortega, Solano, "Planeación de la Perforación de Pozos", Tecnología de la Perforación, Tomo 8.
16. Hartong, J. L., Davies, D. R. and Stewart, R. B. "An Integrated Approach for Successful Primary Cementations", Journal of Petroleum Technology September - 1983.
17. Instituto Americano del Petróleo, "Casing, Tubing and Drill Pipe API", Specification 5a, 1981.
18. Sección Ingeniería de Costos y Estadística, "Procedimientos de Operación para Ingeniería Petrolera", Petróleos Mexicanos, octubre - 1986.
19. IMP, "Estudios de Técnicas para Cementaciones Primarias", Instituto Mexicano del Petróleo, 1987.
20. "Programa Weatherford de Cementación", Weatherford Co., 1987.
21. PEMEX, "Cementaciones a Presión", Petróleos Mexicanos, 1987.
22. "Catálogo HALLIBURTON" 1980 - 1981.
23. "Catálogo BAKER", 1980 - 1981.
24. "Catálogo DOWELL - SCHLUMBERGER", 1980 - 1981.
25. Haney, James and Folmasbee, Gary, "Coiled Tubing Improves North Sea Squeeze Cementing", Halliburton Services, Duncan, Okla.

26. Vorkinn, P. B., DOWELL - SCHLUMBERGER and Sanders G. S., "Cement Slurry Qualification, Field Mixing, and Quality Assurance Procedures for Coiled - Tubing Squeeze", Operations in Prudhoe Bay, Alaska, SPE International - Society of Petroleum Engineers, 26089.