

45
rej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“METODOS MEJORADOS DE COLOCACION
DE TAPONES DE CEMENTO EN LA
ZONA SURESTE”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

Salvador A. Rosales Rivera

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1989



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E G E N E R A L

INTRODUCCION	PAGINA
CAPITULO I. - GENERALIDADES ACERCA DE LOS TAPONES DE CEMENTO.	2
I.1.- Generalidades.	3
I.2.- Tipos y objetivos de los tapones de cemento.	5
I.3.- Cementos: Composición y control de calidad.	12
I.4.- Aditivos para cemento.	15
CAPITULO II. - DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO.	25
II.1. - Selección del diseño adecuado según el objetivo.	26
II.1.1.- Requerimiento de datos.	26
II.1.2.- Propiedades de la lechada de cemento.	30
II.1.3.- Cálculo del volumen de lechada.	33
II.2. - Pruebas de laboratorio.	37
II.2.1.- Parámetros reológicos del cemento y lodo.	38
II.2.2.- Descripción de pruebas de laboratorio.	46
CAPITULO III. - BACHES ESPACIADORES Y LAVADORES.	58
III.1.- Descripción y objetivo de los baches.	59
III.2.- Diseño y selección de los baches adecuados.	61
III.3.- Componentes de los baches.	65
III.4.- Pruebas de compatibilidad.	68
III.5.- Cálculo de volúmenes.	70

CAPITULO IV.- FACTORES QUE AFECTAN EL FRAGUADO DEL CEMENTO EN UN TAPON.	73
IV.1.- Diseño inadecuado.	74
IV.2.- Tipos de baches y volúmenes no adecuados.	78
IV.3.- Acondicionamiento del pozo.	81
IV.4.- Condiciones reológicas del fluido de control.	82
IV.5.- Procedimientos operativos.	83
CAPITULO V.- METODOS DE COLOCACION.	90
V.1. - Métodos experimentales.	91
V.2. - Métodos prácticos.	109
V.2.1.- Método del tapón balanceado.	109
V.2.2.- Método del tapón balanceado con difusor.	116
V.2.3.- Método de los dos tapones.	119
V.2.4.- Método de la cuchara vertedora (Dump-Bailer).	122
V.2.5.- Método del tapón "TBT (True-Tubing Bridge)".	125
CAPITULO VI.- EJEMPLO PRACTICO DE APLICACION.	129
VI.1. - Tapón para desviar.	130
VI.1.1.- Condiciones del pozo.	130
VI.1.2.- Diseño de la lechada de cemento.	134
VI.1.3.- Diseño de baches.	137
VI.2. - Cuidados pre-operativos.	137
VI.3. - Ejecución de la operación.	144
VI.4. - Cuidados post-operativos.	145
VI.5. - Resultados.	146
CONCLUSIONES.	148
REFERENCIAS.	151

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

Uno de los principales problemas que se tienen en la Zona Sureste, es la colocación de tapones de cemento, principalmente aquellos que se utilizan para deviar pozos y que se colocan en fluidos base aceite o de emulsión inversa. En este tipo de tapones se requiere a veces varios intentos para colocarlo con éxito. Esto puede ser debido, en parte a las condiciones extremas de profundidad y temperatura, a las cuales son colocados y por otro lado, los métodos -utilizados. La falla principal en los tapones, es la falta de consistencia, -una vez que el tiempo de fraguado ha transcurrido y esto, se debe a la contaminación del cemento con el fluido de control.

Mediante investigaciones de Laboratorio, se ha determinado cuales son las causas principales por las que un tapón de cemento no sea colocado con éxito en -el primer intento. De las conclusiones de estas investigaciones se proponen -algunos métodos que con la ayuda de algunas herramientas, eliminen o reduzcan el riesgo de contaminación del tapón de cemento.

Uno de los puntos importantes para que el tapón sea colocado con éxito, es determinar las condiciones reales en las que será colocado, así el diseño de la lechada de cemento será el adecuado.

La utilización de baches espaciadores y lavadores cuando las condiciones lo --requieran, el acondicionamiento del fluido de control y la utilización de baches viscosos, para soportar el tapón de cemento en el método del tapón balanceado, son algunas recomendaciones que se hacen en el presente trabajo, para -mejorar los métodos de colocación de tapones y conseguir excelentes resultados lo que evita gastos onerosos.

Finalmente, se plantean varios procedimientos operativos, mismos que en fun---ción de las condiciones específicas de cada pozo, se seleccionará el que más -se adapte a ellas para obtener éxito.

C A P I T U L O I

GENERALIDADES ACERCA DE LOS TAPONES
DE GENENTO

I.1. GENERALIDADES .

La colocación de tapones de cemento es una operación que frecuentemente se lleva a cabo en los pozos petrolíferos, la operación depende de muchos factores, como son: las condiciones del pozo, las propiedades reológicas del fluido de control, la presión y la temperatura a la profundidad de colocación del tapón, las propiedades de la lechada de cemento y el objetivo del tapón.

Para tener éxito en la colocación de un tapón de cemento, se deben tomar en cuenta los factores arriba mencionados, desde el diseño de la lechada a utilizar hasta la parte operativa de la colocación del tapón a la profundidad deseada, incluyendo los cuidados post-operativos.

Un tapón de cemento se conoce como un proceso mediante el cual, un volumen de lechada de cemento previamente diseñada, servirá para llenar una determinada longitud de tubería de revestimiento (T.R.), agujero descubierto o ambas partes, mediante un desplazamiento y provee un sello contra el movimiento vertical de los fluidos del pozo.

Los tapones de cemento de acuerdo a su lugar de colocación se clasifican como:

a) Tapones de cemento en agujero descubierto. Son utilizados para aislar zonas, para hacer pruebas de formación, sellar zonas de pérdida de circulación o flujos, iniciar a desviar pozos, apoyo para cementar T.R., abandonar pozos, fijar pescados, etc.

b) Tapones de cemento en agujero entubado. Son generalmente colocados para abandonar intervalos agotados, para taponar y abandonar un pozo, proveer un punto desde donde partir para operaciones de perforación dirigida (ventanas), protección para cambio de conexiones superficiales y localización de roturas en T.R.

De acuerdo al comportamiento del pozo a intervenir, la colocación de tapones se puede efectuar de dos formas:

1. Tapón de cemento por Circulación. Se coloca cuando se sabe que la presión de fondo, en el intervalo abierto, es tal que soporta la presión hidrostática

ejercida por la lechada de cemento y el fluido de control desplazante, así como también la presión de bombeo generada en la superficie para colocarlo y desplazar inverso al excedente de la lechada.

2. Tapón de cemento por Desplazamiento. Se utiliza cuando de antemano se sabe que la presión de fondo es baja en el intervalo abierto (pérdida por circulación), y debido a esto, no es posible circular el fluido de control a la superficie. Generalmente el tapón de cemento por circulación es el que más se utiliza.

Dentro de los procedimientos operativos de colocación de tapones, se tienen los siguientes:

A. Método del Tapón Balanceado. Consiste en colocar la tubería franca, ya sea tubería de perforación (T.P.) o de producción, a la profundidad deseada y se bombea a través de ella la lechada y el fluido desplazante, dejando volúmenes tanto dentro de la T.P. como en el espacio anular, de longitudes iguales para que el tapón quede en equilibrio (balanceado).

Puede utilizarse un difusor o una herramienta desviadora de flujo en el extremo de la tubería utilizada.

B. Método de los Dos Tapones. Este método es similar al de una cementación primaria de una T.R., consiste de dos tapones de hule, uno limpiador que separa al fluido de control de la lechada y el otro que sirve para desplazar a ésta.

C. Método de la Cuchara Vertedora (Dump-Bailer). Para ser aplicado este método, se requiere de condiciones especiales, ya que los volúmenes de cemento que maneja son muy pequeños. Consiste en bajar la lechada en pequeños tubos cerrados herméticamente, con cable de acero y cuando se tiene a la profundidad deseada se descarga la lechada al accionar un dispositivo mecánico-eléctrico. Normalmente se utiliza un tapón puente en la base del tapón de cemento.

1.2. TIPOS Y OBJETIVOS DE LOS TAPONES DE CEMENTO

La colocación de tapones de cemento, es una operación que se requiere en los pozos petrolíferos en cualquier etapa, desde la perforación, terminación, producción y reparación. De la intervención adecuada y oportuna de una operación, depende la optimización de los recursos tanto técnicos como económicos.

Se recurre a esta operación como un medio de seguridad, correctivo o apoyo a otras operaciones. Como un medio de seguridad es cuando se coloca un tapón de abandono o para cambiar conexiones superficiales, un tapón para corregir anomalías en T.R. es un medio correctivo y un tapón de apoyo a otras operaciones se tiene cuando se desvía un pozo o se cementa un T.R.

TAPONES DE CEMENTO PARA DESVIAR. Estos tapones generalmente se utilizan durante la etapa de perforación, cumplen con una doble función, tapan el pozo original y sirven de apoyo a la herramienta desviadora para iniciar la desviación de la trayectoria del pozo original. Se recurre a estos tapones cuando se tienen problemas del tipo mecánico en el pozo, como desprendimiento de la sarta de perforación, tubería pegada o algún otro tipo de pescado que no se pueda recuperar. También cuando la perforación vertical en algún pozo es demasiado desviada, saliéndose del rango de tolerancia, en ambos casos, se coloca un tapón de cemento (fig. 1.1).

Estos tapones son semejantes a los utilizados para orientar la dirección en las perforaciones marinas, perforaciones en pozos de alivio y la perforación hacia zonas inaccesibles. Cuando la colocación de este tapón se efectúa en T.R. se le conoce como un tapón de apoyo para abrir una ventana. Por las características de este tapón, es de los que más cuidados requiere, desde su diseño hasta el procedimiento operativo de su colocación para obtener resultados satisfactorios.

TAPONES DE CEMENTO DE PROTECCION. La utilización de estos tapones se efectúa cuando se tiene alguno de los siguientes casos:

a). Cambio de Cabezales. En este caso es necesario, ya que el pozo queda sin preventores además, si la perforación del pozo se encuentra a una gran profundidad pasando o teniendo próxima una zona de alta presión. Se coloca el tapón de cemento como una medida de seguridad, previniendo un posible brote del pozo.

b). Fallas en T.R. Si se tienen las condiciones de gran profundidad con zonas cercanas de alta presión y se presenta una anomalía en la T.R., se coloca un tapón de cemento y se procede a reparar la anomalía, la profundidad de colocación, dependerá de la profundidad perforada y de la localización de la anomalía.

c). Pozos Pendientes de Terminación. Se coloca un tapón a un pozo que por diversas razones no se llevará a cabo su etapa de terminación, inmediata a la perforación. A este tipo de tapones se les conoce como de abandono temporal. Es una operación de protección al pozo durante el tiempo en que no será intervenido.

TAPONES DE CEMENTO PARA CORREGIR ANOMALIAS EN T.R. Esta operación se efectúa en los siguientes casos:

a). Inyectar Cemento a la Boca de la T.R. corta. Cuando se cementa una T.R. corta y después de verificar que no existe cemento o no salió cemento en la boca, se procede a inyectar cemento a la misma. Generalmente, la operación se realiza colocando un tapón de cemento de tal manera que se llene el espacio no cementando (fig. I.2).

b). Inyectar Cemento a la Zapata. En la cementación de una T.R., después de haber efectuado las pruebas correspondientes, se determina que la cementación en la zapata no es satisfactoria, la operación posterior es recementar la misma, ya que éste es un punto crítico en el pozo. La recementación se lleva a cabo colocando un tapón de cemento, generalmente acompañado de una cementación forzada.

c). Corregir Roturas en T.R. Cuando se ha detectado alguna rotura en una T.R. para corregir ésta, se coloca un tapón de cemento y si es necesario se efectúa una cementación forzada.

d). Corregir la Mala Operación de un Cople de Cementación Multiple. En la -- cementación primaria de una T.R. por etapas, si el cople de cementación utilizado no opera satisfactoriamente, dejando comunicado el interior de la T.R. -- con el espacio anular, se coloca un tapón de cemento. Se procede de manera si milar como si se tratará de una rotura en T.R.

TAPONES DE CEMENTO DE ABANDONO. Estos tapones se colocan en pozos que se aban donan por las siguientes causas: improductivos, secos o por bajo estructural, que se agote su producción o por algún problema mecánico, como puede ser un -- pescado que no pueda ser recuperado.

Su colocación puede efectuarse en agujero entubado o descubierto. Estos tapo- nes son colocados por seguridad, para mantener al pozo aislado contra posibles manifestaciones de fluidos.

En pozos abandonados por improductivos o por que su producción se haya agotado, se colocan varios tapones. Estos se colocan a diferentes profundidades, en los puntos críticos del pozo, como son: en el intervalo productor o cerca de éste, boca de alguna T.R. corta, zapata de T.R., Tie-Back y algún otro punto de debi lidad que se haya tenido durante la vida del pozo (fig. I.3).

TAPONES DE CEMENTO PARA COLOCAR ANILLOS. Esta operación se puede considerar co mo una corrección a una cementación de una T.R. Por las características de este tapón, se le conoce como "anillo", se recurre a esta operación cuando en la cementación primaria de una T.R., generalmente superficial, el cemento no sale a superficie ya sea por algún problema durante la operación o porque así fué - programado. Entonces debe colocarse cemento en el espacio anular que quedó -- sin cemento, mediante una tuberfa de un diámetro que pueda introducirse en dicho espacio. Así la T.R. queda cementada en la parte superficial (fig. I.4).

TAPONES DE CEMENTO PARA AISLAR. Estos tapones se colocan en agujero entubado o descubierto, el objetivo de éstos es el de mantener confinada una determina- da sección del pozo que no es de interés o que causa algún problema. Cuando - se tienen intervalos improductivos, agotados, zonas de pérdida o de flujo, se recurre a este tipo de operación (fig. I.5).

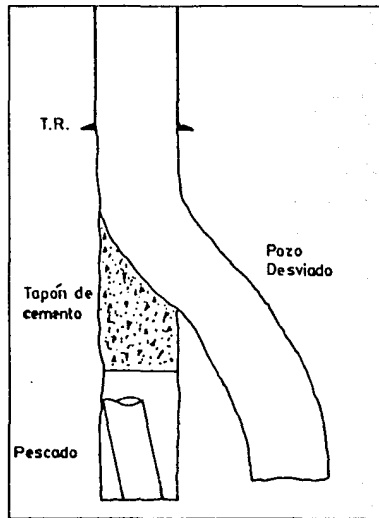


Fig.1.1.- Tapón de cemento para desviar un pozo a causa de un pescado.

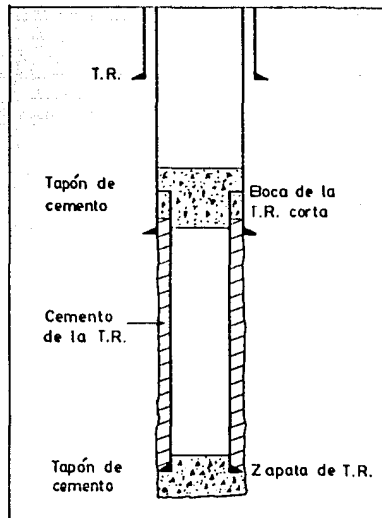


Fig.1.2.- Tapones de cemento utilizados para corregir la cementación de una T.R.

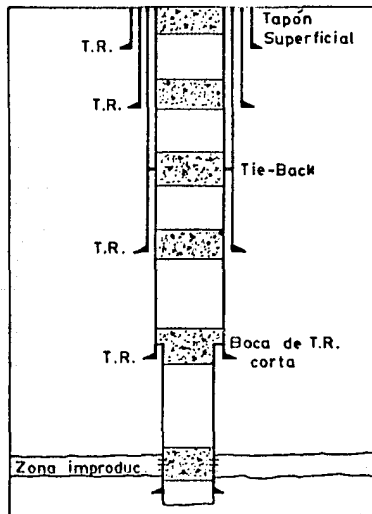


Fig.1.3.-Tapones de cemento de abandono en un pozo improductivo.

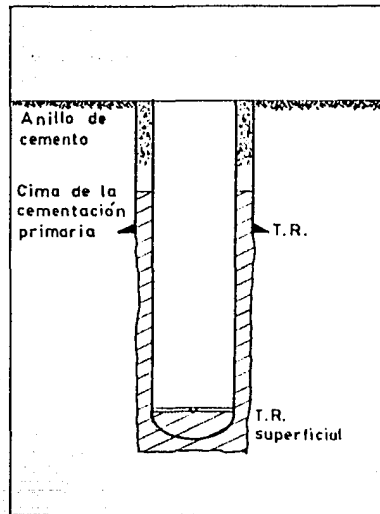


Fig.1.4.-Utilización de un tapón de cemento para colocar un anillo entre tuberías de revestimiento.

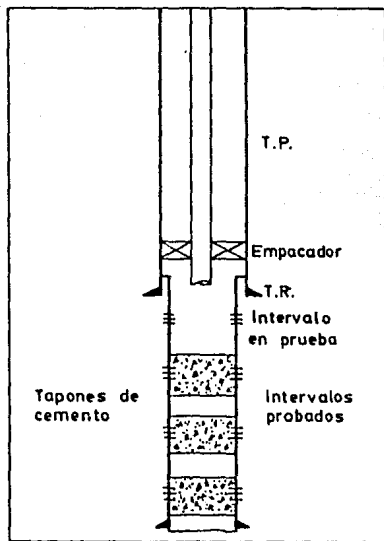


Fig.1.5.- Tapones de cemento para aislar intervalos.

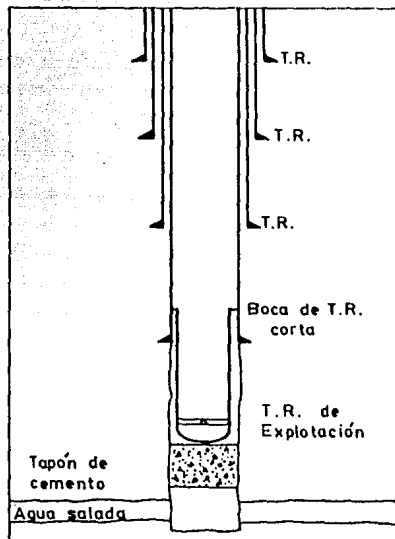


Fig.1.6.- Tapón de cemento de apoyo a la T.R. de explotación.

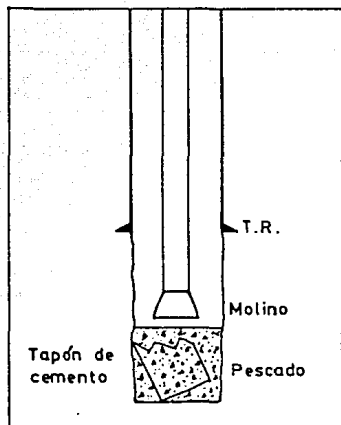


Fig.1.7.- Tapón de cemento para fijar un pescado y pueda ser molido.

TAPONES DE CEMENTO DE APOYO. Esta operación se lleva a cabo normalmente en la última etapa de perforación, cuando se tienen problemas como pérdidas de circulación, zonas deleznable, cavernas, invasión de agua salada o que la zona no es de interés, se decide colocar un tapón en el fondo del pozo, que sirve de apoyo a la última T.R. que será cementada (fig. I.6).

TAPONES DE CEMENTO PARA FIJAR PESCADOS. Esta es una operación de apoyo a otra, ya sea la de moler el pescado o la de recuperarlo. Consiste en colocar un tapón de cemento para fijar el pescado y poder molerlo o recuperarlo. Es una operación que no se lleva a cabo con mucha frecuencia (fig. I.7).

I.3. CEMENTOS : COMPOSICION Y CONTROL DE CALIDAD

PROPIEDADES BASICAS DEL CEMENTO. El cemento puro sin aditivos es un material polvoriento, comunmente llamado cemento "Portland", cuyo nombre proviene de una pequeña ciudad de Inglaterra, donde fué manufacturado por primera vez.

La materia prima utilizada en la fabricación de los cementos portland, es caliza (carbonato de calcio) y arcillas o esquistos (pizarras cristalinas: cuarzo con mica, clorita o talco).

El hierro y la alumina se agregan frecuentemente cuando no están presentes en las calizas o arcillas. Estos materiales se encuentran finamente molidos y mezclados, ya sea por vía húmeda o seca, y posteriormente se introducen en un horno rotativo que funde la mezcla a temperaturas de 2 600 a 3 000 °F (1427 a 1649 °C). Estos materiales semi-fundidos en forma de bolitas llamados "clinkers" del cemento, posteriormente se muelen y se mezclan con pequeñas cantidades de yeso, que es el que controla el tiempo de fraguado del cemento.

QUIMICA DE LOS CEMENTOS. Un análisis típico de los óxidos del cemento portland utilizado en la industria petrolera es el siguiente:

OXIDOS		PORCENTAJE (%)
Dióxido de Silicio	(SiO ₂)	22.43
Oxido de Calcio	(CaO)	64.77
Oxido Férrico	(Fe ₂ O ₃)	4.10

Oxido de Aluminio	(Al_2O_3)	4.76
Oxido de Magnesio	(MgO)	1.14
Trióxido de Azufre	(SO_3)	1.67
Oxido de Potasio	(K_2O)	0.08
Pérdidas por Ignición		0.54

Cuando los productos del clinker del cemento se hidratan con agua, se combinan para formar cuatro fases cristalinas. Las fórmulas y designaciones de estas cuatro fases se muestran a continuación:

COMPOSICION QUIMICA DE LOS CEMENTOS PORTLAND.

Fase Componente	Fórmula	Designación
Aluminato Tricálcico	$3CaO \quad Al_2O_3$	$C_3 \quad A$
Silicato Tricálcico	$3CaO \quad SiO_2$	$C_3 \quad S$
Silicato Dicálcico	$2CaO \quad SiO_2$	$C_2 \quad S$
Ferro-Aluminato Tetracálcico	$4CaO \quad Al_2O_3 \quad Fe_2O_3$	$C_4 \quad AF$

Además de los componentes mencionados, contiene yeso ($CaSO_4$), óxido de magnesio (MgO) y óxido de calcio (CaO). El porcentaje de estos compuestos en la mezcla final puede afectar la resistencia inicial, la resistencia a sulfatos, hidratación, expansión y partiduras durante el fraguado.

CLASIFICACION DE LOS CEMENTOS API (American Petroleum Institute) EL API ha establecido varias clases de cemento de acuerdo con los máximos porcentajes químicos antes descritos, como se muestra en la tabla I.8.

TABLA I.8.- Composición y propiedades de las clases API del Cemento Portland.

CLASE API	C O M P O N E N T E (%)			
	C_3S	S_2S	C_3A	C_4AF
A	53.0	24.0	8.0	8.0
B	47.0	32.0	5.0	12.0
C	58.0	16.0	8.0	8.0
D y E	26.0	54.0	2.0	12.0
G y H	50.0	30.0	5.0	12.0

Algunas propiedades del cemento pueden alterarse variando los porcentajes de sus componentes como se muestra a continuación.

PROPIEDADES	COMO OBTENERLAS
Alta resistencia inicial	Incrementando el contenido de C_3S y moliendo más fino.
Mayor retardo en el fraguado	Controlando el contenido de C_3S y C_3A y moliendo más grueso.
Bajo calor de Hidratación	Limitando el contenido de C_3S y C_3A .
Resistencia al ataque de los sulfatos.	Limitando el contenido de C_3A .

La industria petrolera adquiere cementos elaborados predominantemente según las especificaciones del API, tal como se publica en la Norma API Standars 10-A.

PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS QUE CUBREN LAS NORMAS API.

En las operaciones donde se requiere cemento para intervenir un pozo, éstos son generalmente utilizados para desplazar el fluido de control y cumplir con un objetivo específico, como puede ser: una cementación primaria, una cementación forzada o la colocación de un tapón de cemento. Para cumplir con estos propósitos, los cementos deben estar diseñados para las condiciones del pozo que varían desde la superficie hasta la profundidad donde serán colocados, alcanzándose grandes profundidades donde los rangos de temperatura son muy variados.

Las normas no cubren todas las propiedades de los cementos sobre todos los rangos de profundidad y presión. No obstante, si ofrecen las propiedades físicas y químicas de distintas clases de cementos que deberán afrontar la mayoría de las condiciones del pozo. Estas especificaciones incluyen análisis químicos y físicos. Los análisis comprenden: (1) Contenido de agua, (2) Fineza, (3) Resistencia a la Compresión y (4) Tiempo de Espesamiento o Bombeo.

Aún cuando estas propiedades describen a los cementos para propósitos específicos, los cementos para pozos petrolíferos deben poseer otras propiedades y características para proveer las funciones necesarias en el fondo del pozo. Los

requerimientos físicos y químicos de las clases de cemento API definidas en -- las Normas API-10A se muestran en las tablas 1.9 y 1.10.

SISTEMAS UTILIZADOS EN TAPONES DE CEMENTO.

1. Cementos Tixotrópicos. Mezclas de cemento portland y yeso son fáciles de bombear, pero desarrollan rápidas gelificaciones cuando se detiene el bombeo. La experiencia de campo ha demostrado que los agentes de rápida gelificación -- en cementaciones, se mantienen más cerca en la vecindad del pozo (alrededor de fracturas) en aplicaciones de pérdida de circulación.

Este cemento también posee alta pérdida de fluido. La pérdida de fluido es -- importante cuando se trata de formaciones permeables.

2. Cementos Puros o de Baja Densidad. Como se vió anteriormente el cemento -- puro y tixotrópico posee alta pérdida de fluido. Sin embargo, cementos de baja densidad pueden o no tener baja pérdida de fluido.

3. Mezclas con Diesel. Varias composiciones, diesel y bentonita, bentonita y cemento, bentonita y polímeros pueden ser efectivos cuando existen formaciones con hidrocarburos. Al aplicarlos, esos materiales son bombeables hasta que -- fraguan o se expanden al contacto con el agua.

4. Cemento y Yeso. Para profundidades someras y de rápido fraguado; difiere -- al yeso de construcción en que es semi-hidratado para controlar el tiempo de -- bombeo. Sales solubles en el agua de mezclado pueden acelerar el tiempo de -- bombeo. El yeso al ser utilizado en tapones, éstos deberán considerarse temp_o rales, ya que el yeso es soluble en agua después de fraguado.

1.4. ADITIVOS PARA CEMENTO

El cemento utilizado en las operaciones de los pozos casi nunca se utiliza --- "puro", si no que se le agregan aditivos para modificar las propiedades de las lechadas de cemento, dependiendo de el objetivo particular para el que son diseñadas.

Dada la gran variedad de condiciones que se tienen en los pozos y el amplio -- rango en las profundidades, las propiedades de la lechada varían, y para conse

**

PROPIEDADES FISICAS DE LOS CEMENTOS API	A	B	C	D	E	F	G	H
Resistencia a la compresión (psi)	46	46	50	50	50	50	44	50
Resistencia a la tracción (psi)	0.80	1.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Resistencia a la flexión (psi)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Resistencia a la tracción (psi)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5

RESISTENCIA A LA COMPRESION	TEMP. (°F)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

RESISTENCIA A LA COMPRESION	TEMP. (°F)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)	RESISTENCIA A LA COMPRESION (psi)
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO	TEMP. (°F)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)	TIEMPO DE COMBUSTION MINIMO (min)
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* EN UN CEMENTO DE TIPO 100 SE RECOMIENDA UNO DE LOS SIGUIENTES.

** API Specification for Materials and Testing for Well Cements (Second Edition)

guir características óptimas, se cuenta en la actualidad con más de cuarenta - aditivos que se utilizan con el cemento para cualquier condición del pozo.

Dependiendo de como son seleccionados, los aditivos afectan las característi-- cas de las lechadas en forma muy variada, algunos ejemplos son:

- Densidad de 10.5 a 25.0 lb/gal (1.258 a 3.00 gr/cm³).
- Resistencia a la compresión de 200 a 20,000 lb/pg² (14 a 1,406 kg/cm²).
- Tiempo de fraguado acelerado o retardado desde algunos segundos hasta 36 -- horas.
- Control de pérdida de filtrado, hasta 25 cm³ en 30 minutos y 1,000 lb/pg² de presión diferencial.
- Propiedades de flujo (tapón, laminar)
- Resistencia a la corrosión.
- Permeabilidad.
- Calor de hidratación.
- Agentes gelificantes para pérdida de circulación.
- Expansión del cemento fraguado.
- Reducción de costos.

Por su función los aditivos se clasifican en:

ACELERADORES.

Aplicación:

Reducen el tiempo de bombeabilidad.

Reducen el tiempo de fraguado.

Incrementan la resistencia a la compresión.

Utilizados generalmente en tuberías superficiales, pozos poco profundos y anillos de cemento.

T I P O	MEZCLA % POR PESO DE CMTO.	TIPO DE CMTO.	MODE DE USARSE.
Cloruro de calcio (Ca Cl ₂)	2 - 4	Todas las cla- ses API.	Seco o húmedo
Cloruro de sodio (Na Cl)	3-10 (en agua) 1.5-5 (cmto.)	Todas las cla- ses API	Seco o húmedo
Formas semi-hidratadas de yeso.	10-100	Clases API A,B,C,G,H	Seco

Silicato de sodio	1 - 7.5	Clases API A,B,C,G,H	Seco o húmedo
Cementos con dispersantes y agua reducida	0.5-1.0	Clases API	Seco o húmedo
Agua de mar	-	-	-

RETARDADORES.

Aplicación:

Prolongan el tiempo de bombeabilidad.

Retarda el fraguado.

T I P O

CANTIDAD USADA POR PESO DE CEMENTO (%)

Lignosulfonatos de sodio y calcio	0.1 a 1.00
Lignosulfonato de calcio	0.1 a 1.00
Lignosulfonato de calcio ácido orgánico.	0.1 a 2.50
CMHEC (Carboxymetil Hidroxietilcelulosa).	0.1 a 1.50
Agua saturada en sal.	15 a 17 lb/saco

ADITIVOS PARA BAJAR LA DENSIDAD.

Existen tres métodos para bajar la densidad:

1. Controlando el agua.
2. Agregando materiales de bajo peso específico.
3. Combinación de los dos anteriores.

La bentonita es el material más utilizado en diferentes formulaciones; en polvo (1.0 al 16.0%), y pre-hidratada.

Aplicación:

Reduce la densidad de la lechada.

Aumentan el rendimiento.

Reducen los costos.

Baja pérdida por filtrado.

T I P O	CANTIDAD USADA POR PESO DE CEMENTO
Bentonita	2 a 16%
Atapulgita	0.5 a 4.0%
Tierra de Diátomea	10,20,30 ó 40%
Puzolanas artificiales	74 lb/saco
Hidrocarburos Naturales	
- Gilsonita	1 a 50 lb/saco
- Carbón	5 a 50 lb/saco
Cemento con bentonita y puzolanas	Variable
Silicato de sodio	1 a 7.5 lb/saco
Perlita expandida	5 a 20 lb/saco

ADITIVOS PARA AUMENTAR LA DENSIDAD.

Aplicación:

Incrementar la densidad.

Limitar y mantener presión.

Mejorar el desplazamiento del lodo.

T I P O

CANTIDADES USADAS POR
PESO DE CEMENTO (%)

Arena	5 a 25
Baritina	10 a 108
Ilmenita	5 a 100
Hematita	4 a 104
Sal	5 a 16

ADITIVOS PARA CONTROLAR LA PERDIDA POR FILTRADO.

Aplicación:

Proteger las formaciones sensibles.

Prevenir la deshidratación del cemento.

Mejorar las cementaciones a presión.

TIPO	USO RECOMENDADO, % POR PESO DE CMTO.	TIPO DE CMTO.	MODO DE USARSE.
Polímeros orgánicos (celulosa)	0.5 a 1.5	Todos	Seco
Polímeros orgánicos (dispersantes)	0.5 a 1.25	Todos	Seco o en agua
C M H E C	0.3 1.0	Todos	Seco
Látex	1.0 gal/saco	Todos	Seco o en agua
Cemento con bentonita y dispersante.	12 a 16	G y H	Seco

ADITIVOS DISPERSANTES O REDUCTORES DE FRICCIÓN.

Se agregan al cemento para proveer propiedades de flujo, minimizando los requerimientos de potencia hidráulica.

Aplicación:

Baja viscosidad

Bajo punto de cedencia.

Baja resistencia del gel:

TIPO	CANTIDADES USUALES
Polímero en polvo de cadena larga.	0.3 a 0.5 lb/saco
Lignosulfonato de calcio	0.5 a 1.5 lb/saco
Cloruro de sodio	1.0 a 16.0 lb/saco

ADITIVOS PARA CONTROLAR LA PERDIDA DE CIRCULACION.

Estos aditivos se utilizan en la lechada cuando se presentan pérdidas en formaciones con fracturas naturales o inducidas, o en formaciones altamente permeables.

TIPO	USO RECOMENDADO			REQUERIMIENTO DE AGUA
Gilsonita	5.0	a	50 lb/saco	2 gal/50 lb
Perlita	0.5	a	1 pie ³ /saco	4 gal/pie ³
Cáscara de nuez	1.0	a	5 lb/saco	0.8 gal/50 lb
Carbón	0.125	a	2 lb/saco	No tiene
Nylon	0.125	a	0.25 lb/saco	No tiene

Una lista de los aditivos más utilizados y con el nombre que las compañías les -- denominan, se da en la tabla I.11.

Tabla 1.11.- ADITIVOS PARA CEMENTOS.

PRODUCTOS	HALLIBURTON	B. J. HUGHES	DOWELL	DRESSER	WESTERN
ACELERADORES					
CLORURO DE CALCIO (Ca Cl ₂).....	CaCl ₂	AI, A7-1, A8	S1	CaCl ₂	CaCl ₂
SAL I.64	Sai	A-5	D-44	Sai	Sai
MEZCLA DE CaCl ₂ CaCl ₂ .....	.....	.....	D-41	.....	.....
MEZCLA CHA Cl ₂ /Ca Cl ₂	HA-5	A-8	.....	Ma-2	.....
SILICATO DE SODIO	Diacel A	Diacel A	D-57	Diacel A	Diacel A
RETARDADORES					
MONOSULFATO DE CALCIO	HR-4	R-5	.....	MLK-3	HK-2
ALUMINATO SODIO-CALCIO	HR-7	R-5	D-13	MLK-1	HK-1
RESACHO BLAND (ALTA TEMP.)	HR-12, HR-20	R-11, R-14L	D-28, D-99, 100	MLK-8	HK-6
RESINA LIQUIDA	HR-GL	R-101	D-81	MLK L	HK-11
CONCRETO CARBOXIMETILHIDROXYMETIL-CELULOSA	Diacel LML	R-6	D-8 LML	MLK-7	Diacel LML
SAL (SATURADA)	Sai	A-5	D-44	Sai	Sai
BORAX (ACTIVADOR)	Borax	Borax	D-93	MLK-9	Borax
RETARDADOR TIXOTROPICO .....	.....	.....	D-74	.....	HK-1C
EXTENDIDORES					
(Aumentan el rendimiento)					
BENTONITA	Gel	B. J. Gel	Gel D-20	N-Gel	Bentonita
TIERRA DE DIATOMEAS	Diacel D	Diacel-D	D-56	Diacel D	Diacel D
REDUCT. DE PESO					
CEMENTA LIGERA (ELY-ASH)	Pozmix A	Diamix F (44)	D-55 (74)	Magco poz A	Pozment A (74)
PUZOLANA NATURAL (S. TEN) .....	.....	.....	.....	Magco poz B	.....
PUZOLANA NATURAL (CALIF.) .....	.....	Diamix A (47)	D-61 (47)	.....	.....
CEMENTA LIGERA (B. DELEAS HOUSTON) .....	.....	.....	D-46 (60)	.....	.....
CEMENTO PUZOLANO BENTONITA	Hallib. Light	.....	Litepoz 300	Econobled	.....
LEUTITA CALCINADA CEMENTO	Trinity Lt. W.	Trinity Lt. W.	D-49, TLW, DWM	Trinity Lt. W.	Trinity Lt. W.
METASILICATO DE SODIO ANHIDRO	Econolite	Lodense A-2	D-19	Trinity Ma.	Trinity Lite.
INCREMENT. DE PESO					
ARENA UTANA	Arena	Arena 20-40	Arena	As	ARENA
BARITA	Barita	M-1	D-11	Man-cobar	Barita
HEMATITA (OXIDO DE HIERRO)	Hi-Dense 3	M-5	D-19	Ma-c	hematita
ILMENITA .....	.....	.....	D-16	IM-1	Ilmenita

CONT. TABLA VIII- ADITIVOS PARA CEMENTOS.

PRODUCTOS	MILLITON	B. J. BUGHES	DOWELL	WASSER	WELFA
CONTROLAD. DE AGUA					
CHHEC	Diacec LML	D-6	D-8	MFLE-7	Diacec LML
POLIMEROS ORGANICOS	Hallad-9-22A	.....	.....	.....	CFE-1, 2, 3
POLIMEROS ORGANICOS A TEMP.	Hallad-14	D-19	D-59	MFLE-5	CF-1
			D-60	MFLE-4	
MAT. P/ CONTROL DE PERDIDA DE CIRC.					
GILSONITA	Gilsonita	D-7	D-24	Gilsonita	Gilsonita
CARBOO TRITUSIMO (Korita)	.....	.....	D-42	.....	.....
CELUFAN	Flocele	Cello-Flate	D-25	Cello-0 Seal	Cello-Seal
CALCOSA DE AGEE	Tul-Plug	Tul-Plug	J-51	Act. Plug	Tul-Plug
PERLITA EXPANDIDA	Perlita	B.J. Perlita	D-72	Perlita	.....
MAT. P/ ALTA TEMP.					
(Alto temperatura)					
HARINA de SILICE	SSA-1	D-8	D-60	MS-1	SF-3
ARENA de SILICE (Quezo)	SSA-2	D-8c	D-70	MS-2	SF-4
PLUGES Y SASTES					
POLVOS ORGANICOS	CFE-1, CFE-2	D-31	D-65	MS-3, MS-4	TS-4
LIGANDOS ORGANICOS	CFE-22L	D-31L	D-66	MS-5	.....

C A P I T U L O I I I

DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO.

II.1. SELECCION DEL DISEÑO ADECUADO SEGUN EL OBJETIVO

La parte más importante en una operación donde se utiliza cemento, es el diseño de la lechada, ya que es donde se tienen que conjugar todos los factores que afectan a ésta. Dichos factores son: la profundidad de colocación del tapón, la temperatura, la presión, las condiciones reológicas del fluido de control, el estado mecánico del pozo y los problemas ocurridos durante la perforación - (pérdidas y/o flujos).

Dependiendo de los parámetros anteriores, se buscará dar las propiedades óptimas a la lechada, mediante los aditivos adecuados.

Una lechada bien diseñada es producto de que los parámetros que se consideran son los reales y que los aditivos gregados son los necesarios y en los porcentajes adecuados, ya que cualquier variación o falta de éstos, trae como consecuencia problemas durante la operación o la falla total de ésta, ocasionando erogaciones onerosas.

II.1.1. REQUERIMIENTO DE DATOS

LUGAR DE COLOCACION DEL TAPON. Si el tapón de cemento se coloca en T.R., se debe conocer el diámetro nominal y el peso de ésta, cuando se coloque en agujero descubierto, el diámetro del agujero debe ser determinado por medio del registro de calibración.

Los datos anteriores son utilizados para los cálculos hidráulicos de los fluidos que se ocuparán en la operación, y en el caso de que se utilice el método

del tapón balanceado, determinar los volúmenes de cemento y baches que deben quedar en el espacio anular y en el interior de la tubería que se utilice para desplazarlo, para que el tapón quede balanceado.

DIAMETRO Y PESO DE LA TUBERÍA DE DESPLAZAMIENTO. El diámetro nominal y el peso de la tubería que se utilice para el desplazamiento (T.P. o tubería de producción) deben conocerse para los cálculos hidráulicos de los fluidos y para determinar el volumen de desplazamiento con el que se colocará el tapón.

PRESION Y TEMPERATURA. Dos factores básicos que influyen en el diseño, son la temperatura y la presión, ambos afectan el tiempo de bombeo. La temperatura es el factor de mayor influencia, a medida que la temperatura aumenta, la lechada de cemento se deshidrata y se espesa más rápidamente.

La presión impuesta a una lechada debido a la columna hidrostática de los fluidos del pozo, también reduce la capacidad de bombeo del cemento. En pozos profundos, la presión hidrostática más la presión de superficie durante la circulación puede exceder las 20 000 lb/pg² (tabla II.1)

TABLA II.1. Efecto de la Variación de Presión sobre el Tiempo de Bombeo de una Lechada.

Profundidad (pies)	Temp. (°F)		Presión (lb/pg ²)	Tiempo Bomb. hora:min.
	Est.	Circ.		
10 000	230	144	5 000	2:10
			10 000	1:34
			15 000	1:38
14 000	290	206	10 000	8:35

			15 000	5:19
			20 000	1:14
15 000	320	248	10 000	4:11
			15 000	3:39
			20 000	2:30
			25 000	2:08

Las temperaturas de circulación se pueden obtener mediante dispositivos colocados en la tubería cuando se esta perforando. De los datos puede obtenerse la relación entre las temperaturas de circulación contra las temperaturas estáticas de fondo.

En el diseño de las lechadas se toma en cuenta la temperatura estática del pozo a la profundidad correspondiente, ya que es la condición de temperatura más crítica.

FLUIDOS EN EL POZO. En función del tipo de fluido que se tiene en el pozo, dependerá el uso de baches espaciador y/o lavador, además la densidad del fluido es determinante en la densidad de la lechada, la cual tiene que ser ligeramente mayor a la densidad del fluido de control.

Es importante determinar las propiedades reológicas del fluido de control así como el contenido de sólidos para optimizar las condiciones de desplazamiento.

Un problema de suma importancia en los trabajos de cementación, es la remoción efectiva del fluido en el pozo durante el desplazamiento. La contaminación y dilución debido al lodo, puede dañar el sistema de cementación, al igual que muchas otras sustancias que se encuentran en el lodo y en el enjarre.

Algunas contaminaciones de este tipo ocurren durante la mayoría de los trabajos, pero probablemente casi todas ocurren cuando un tapón de cemento es colocado en un sistema de lodo que ha sido tratado con exceso de sustancias químicas. El volumen de cemento en relación al volumen de lodo es mínimo y el grado de contaminación de éste último nunca se conoce. La suavidad de un tapón de cemento a medida que se perfora, es signo de contaminación.

La mejor forma para combatir los efectos nocivos de los aditivos del fluido de control, es emplear tapones limpiadores de hule y baches espaciadores.

Los tapones limpiadores ayudan a eliminar la contaminación dentro de la tubería utilizada para el desplazamiento, los baches espaciadores consisten en -- agua, soluciones ácidas, fosfatos, mezclas de cemento con agua y lechadas de bentonita, así ayudan a limpiar el agujero. Para sistemas de lodo de emulsión inversa el diesel es efectivo.

El fluido que se tenga en el pozo, debe ser homogéneo y de la misma densidad -- en el todo el sistema. Es necesario que el fluido del pozo permanezca en condiciones estáticas después de haber colocado la lechada de cemento, de lo contrario algo de gas o fluidos de formación pueden incorporarse al cemento alterando su consistencia.

Un fluido de perforación ideal deberá tener una viscosidad (E. Marsh) de 45 a 85 seg., viscosidad plástica de 12 a 20 cp y un punto de cedencia menor que -- 5 lb/100 pie². Para evitar espesamiento y enjarra, la pérdida de fluido deberá ser tan baja como sea posible, la adición de bentonita y polímeros ayuda a controlar la pérdida de fluido.

AGUA PARA MEZCLA. La función principal del agua en el cemento es mojar los -- sólidos del cemento. Muchos trabajos de cementación han resultado defectuosos, debido a la interferencia de alguna substancia en el agua de mezcla.

En teoría, el agua para mezclar el cemento deberá ser razonablemente limpia y libre de substancias químicas solubles, fango, materia orgánica, substancias -- alcalinas u otros contaminantes. Esto no siempre resulta práctico, por lo tanto, debe considerarse la fuente disponible. El agua que se encuentra por lo común en el campo o alrededor, se obtiene de una fosa abierta o de un depósito de abastecimiento, como un pozo de agua o de un lago.

El agua potable siempre se recomienda donde está disponible, a menos que el -- agua tenga un sabor marcadamente salado, en general será adecuado. Inclusive las aguas salobres podrán emplearse pero las lechadas deberán ser probadas en el laboratorio antes.

PROBLEMAS DURANTE LA PERFORACION. Cuando un tapón de cemento sea colocado en agujero descubierto, se deben tomar en cuenta los problemas que se presentaron durante la etapa de perforación, como son: pérdida de circulación, gasificaciones, zonas de alta permeabilidad o fracturas, presencia de lutitas, cavernas o flujos de agua salada.

Estos problemas modifican el diseño de la lechada y cada uno de ellos debe tratarse en la forma adecuada, con los aditivos necesarios y en los porcentajes óptimos, para evitar cualquier problema durante la operación.

II.1.2 PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO

DENSIDAD. La densidad de la lechada está en función del fluido que se tenga en el pozo, ésta debe ser siempre mayor a la del fluido de control. Como se vio en los aditivos para cemento, existen algunos para aumentar o disminuir la densidad de la lechada según se requiera.

El instrumento que se utiliza para determinar la densidad, es la balanza de lodos convencional. Para corregir los errores de medición, se tiene la balanza presurizada, la cual al presurizar la lechada, 30 lb/pg^2 aproximadamente, reduce las burbujas de aire atrapadas en la mezcla, a un mínimo espacio. Existe otro instrumento, llamado Densímetro Nuclear, que tiene una fuente radioactiva, este instrumento se utiliza en el campo y se conecta entre la unidad de mezcla y la línea de descarga al pozo, la medición es instantánea y continúa a través de una pantalla digital, dando así un registro más uniforme.

En operaciones de campo, la densidad de la lechada por lo común se determina con la balanza de lodos (para obtener una medida más real, la muestra se toma de la caja de mezcla). La densidad requerida de la lechada, en la colocación de tapones, resulta difícil cuando se trabaja con volúmenes pequeños de cemento, ya que el tiempo de bombeo de la lechada es muy corto cuando se utiliza el sistema de bombeo directo a través del embudo; cuando se utiliza un mezclador, este problema se minimiza.

VISCOSIDAD. Las lechadas deben tener una viscosidad o consistencia que ofrezca un desplazamiento eficiente al lodo y permita una buena adherencia.

Para lograr estos objetivos, las lechadas son mezcladas con una cantidad de -- agua que proveerá un volumen de cemento fraguado igual al volumen de lechada -- sin separación de agua libre. El tamaño de la partícula de cemento, el área -- superficial y los aditivos influyen en la cantidad de agua requerida para lo-- grar una viscosidad determinada. A esas cantidades de agua se les ha dado tér-- minos específicos y se definen a continuación.

AGUA MAXIMA. Es aquella cantidad de agua de mezcla para una composición de -- cemento determinado que dará un volumen de fraguado igual al volumen de lecha-- da, sin que produzca más del 1.5% de separación de agua libre. El agua máxima es la cantidad que se usa en casi todas las operaciones de cementación, porque por cada saco de cemento se desea obtener el máximo rendimiento.

AGUA NORMAL. Es la cantidad de agua de mezcla que da una lechada de 11 Uc -- (Unidades de consistencia) medidas en un consistómetro de Presión Atmosférica después de 20 minutos de agitación. el API emplea unidades de consistencia por que los valores que se obtienen no son valores de viscosidad verdadera.

Las unidades de consistencia se basan en un valor de par de torsión por medio del consistómetro. El agua normal a veces es llamada óptima, ya que propor-- ciona una lechada capaz de ser bombeable.

AGUA MINIMA. Es la cantidad de agua de mezcla que dará una consistencia de -- 30 Uc, después de 20 minutos de haber sido agitada (rinde una lechada viscosa que puede emplearse para controlar una pérdida de circulación).

La relación de cemento-agua, el volumen de la lechada y el tiempo de fraguado están estrechamente vinculados con el tamaño de las partículas o con el área -- superficial del cemento.

Debe hacerse hincapié en el hecho de que a pesar de que el aumento de contenido de agua incrementa el tiempo de bombeo y se retardará el fraguado del cemen-- to, el agua nunca debe aumentarse, debe evitarse el exceso de ésta, ya que pro-- duce siempre una lechada débil y con baja resistencia a la corrosión.

El instrumento utilizado para determinar la viscosidad de la lechada, es el ---

viscosímetro rotacional Fann, el cual proporciona una medida indirecta de está. Se utiliza para determinar la viscosidad plástica (Vp), punto de cedencia (Pc) y la resistencia del gel de la lechada. Los modelos de campo tienen dos velocidades de corte, 300 y 600 rpm (revoluciones por minuto). Los modelos de laboratorio tienen seis velocidades: 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm, con estos valores se podrá elaborar un reograma y así cuantificar la reología de la lechada.

FILTRADO. El filtrado es un fenómeno que se tiene cuando parte del agua se pierde a través de un medio permeable. La pérdida por filtrado provocará un aumento en la viscosidad y una rápida depositación de enjarre, restringiendo así el flujo. Los factores que influyen en la pérdida de agua son: el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad de la formación donde tendrá contacto la lechada.

Para medir las características de filtración de la lechada, el API estandariza y especifica una prueba de 30 minutos a 100 ó 1 000 lb/pg². La pérdida de agua controlada de una lechada, normalmente se obtiene por la adición de polímeros en concentraciones que van de 0.6 a 1.0% del peso del cemento.

Las lechadas de cemento que tienen una pérdida de agua de 50 a 150 ml en 30 minutos, en el laboratorio, se emplean frecuentemente en las cementaciones a presión.

TIEMPO DE ESPESAMIENTO. El tiempo mínimo de espesamiento o de bombeo, es el tiempo requerido para mezclar y bombear la lechada a la profundidad seleccionada, más el tiempo necesario para sacar la tubería de desplazamiento del seno de la lechada.

El equipo para determinar esta propiedad, se le llama Consistómetro, en él se simulan las condiciones del pozo, donde las temperaturas estáticas del fondo varían hasta 500 °F y las presiones exceden las 20 000 lb/pg².

Las recomendaciones específicas para el tiempo de bombeo, dependen en gran parte del tipo de trabajo, de las condiciones del pozo y el volumen de lechada que va a bombearse.

Como se vió anteriormente, existen aditivos para incrementar o reducir el tiempo de bombeo dependiendo de los requerimientos del trabajo de cementación.

RETROGRESION DE LA RESISTENCIA. Cuatro factores afectan la resistencia a la compresión, composición, temperatura, presión y tiempo. Sin embargo, a altas temperaturas, la composición del cemento puede retrogradarse (perder resistencia) luego de obtener un alto valor y nunca lograr la resistencia alcanzada a bajas temperaturas de curado.

Altos porcentajes de harina sílica inhiben la retrogresión y producen una resistencia a la compresión mucho mayor que la del cemento puro. También reduce la permeabilidad del cemento fraguado.

Generalmente se utiliza el 35% de harina de sílice cuando se requieren lechadas de baja densidad y arena de sílice cuando se requieren de alta densidad.

II.1.3. CALCULO DEL VOLUMEN DE LECHADA.

El volumen de lechada a utilizar en la operación de colocación de tapones de cemento, depende principalmente del objetivo y del lugar de colocación.

Generalmente cuando se coloca un tapón, se desea cubrir una cierta longitud ya sea de agujero descubierto o de T.R., la longitud del tapón esta en función del objetivo del mismo y del diámetro del lugar donde será colocado. Cuando se tienen diámetros grandes, se requerirá un mayor volumen de lechada que para cubrir la misma longitud en diámetros pequeños.

Cuando los tapones de cemento son colocados en T.R., el volumen de lechada se calcula utilizando el diámetro interior de ésta, y la longitud a cubrir en agujero descubierto, se recomienda utilizar un registro de calibración, para determinar el diámetro promedio del agujero y así poder calcular la capacidad de éste.

En ambos casos, al volumen de lechada se le adicionará un exceso en volumen y como es evidente, será mayor la cantidad cuando se trate de agujero descubierto.

LONGITUDES RECOMENDADAS. En la colocación de tapones para desviar, la longitud del tapón juega un papel muy importante. Se considera que la longitud mínima sea de 100 m, aunque una longitud de 150 m es mucho más recomendable. Siempre se debe considerar la posibilidad de algún grado de contaminación, por experiencia de campo la contaminación de la lechada se ha determinado de 20 a 40 m.

Para el caso de tapones de cemento de abandono, se considera recomendable cubrir 100 m de longitud, sin embargo la experiencia en una área determinada, es la que generalmente dictará la longitud.

Cuando se trata de tapones para aislar algún intervalo, la cercanía del otro intervalo a probar, restringirá la longitud, normalmente en estos casos se manejan pequeños volúmenes debido a lo cercano de los intervalos. En estos casos, se recurre a una técnica llamada "Descabezar un Tapón de Cemento", que consiste en eliminar por circulación inversa el exceso de lechada.

En general, el volumen de lechada a utilizar en cada una de las operaciones de colocación de tapones, estará regido por el tiempo necesario para mezclar, bombear, desplazar y sacar la tubería fuera de la lechada. Se debe tener en cuenta que grandes volúmenes de cemento, significan grandes longitudes y por consiguiente el número de tubos a sacar será mayor.

Para calcular el volumen total de lechada, se utilizan las siguientes expresiones.

$$C = D^2 \cdot 0.5067 \quad (2.1)$$

C = Capacidad de la T.R. o del agujero (l/m)

D = Diámetro interior de la T.R. o del agujero (pg)

$$V_l = C L_l \quad (2.2)$$

V_l = Volumen de lechada de cemento (l)

L_l = Longitud a cubrir con la lechada (m)

$$V_T = V_l + V_{exc} \quad (2.3)$$

V_T = Volumen total de lechada (l)

V_{exc} = Volumen excendente (l)

Los cálculos de una cementación se pueden dividir en dos partes, en primer lugar están los cálculos que se utilizan para el diseño de la lechada. Estos -- cálculos sirven para determinar la densidad, el rendimiento y la cantidad de agua de mezclado que se necesita para la lechada. En segundo lugar se tienen los cálculos para efectuar la operación y se hacen con los datos finales proporcionados por el diseño definitivo.

VOLUMEN ABSOLUTO. Todos los materiales de cementación insolubles, cuando se agregan a una lechada, aumentan el volumen, en una cantidad definida por peso de material. Este volumen se conoce como "volumen absoluto", y se expresa en unidades de volumen por unidades de peso.

Los materiales que como el cloruro de calcio y el cloruro de sodio, se disuelven en agua, no ocupan tanto espacio como el que se podría calcular a partir de su densidad relativa. Estos materiales sí aumentan en algo el volumen, pero la cantidad tiene que determinarse de manera empírica. A estos materiales solubles no se les puede atribuir un volumen absoluto, ya que el valor aumenta gradualmente hasta alcanzar la saturación.

Algunos materiales, tales como aceleradores y retardadores, se utilizan en cantidades tan pequeñas que no se toman en consideración en los cálculos. Sin -- embargo, si la densidad de la lechada es muy importante para el control de formaciones con alta presión y estos aditivos se utilizan en proporciones de 1% ó más sí deben tomarse en cuenta en los cálculos.

CALCULO DE LA DENSIDAD, RENDIMIENTO Y REQUERIMIENTO DE AGUA DE LA LECHADA.

La densidad de una lechada se encuentra sumando el peso de cada componente en kg/saco y dividido entre el volumen absoluto total (volumen de la lechada) en l/saco. El rendimiento se determina sumando todos los volúmenes de los componentes referidos a un saco y se reporta como litros por saco (l/saco).

El agua requerida para la lechada de cemento, es el agua que se mezcla con el cemento (ver tabla II.2), más el agua que sea necesaria adicionar si algún aditivo lo requiere.

TABLA II.2. Lechadas de cemento API, puras.

CLASE	DENSIDAD (gr/cm ³)	% AGUA DE MEZCLA	(l/saco)*	RENDIMIENTO (l/saco)*
A	1.87	46	23	39
B	1.87	46	23	39
C	1.77	56	28	44
D	1.98	38	19	35
G	1.89	44	22	38
H	1.98	38	19	35

* Saco de 50 kg.

De manera general se tiene:

	Peso de los materiales	Volumen de los materiales.
Cemento	50 kg/saco	15.9 l/saco
Agua p/cemento	1 kg/l Agua 1/saco	Agua 1/saco
Aditivos	kg/saco	(kg Vol. Abs) 1
Agua p/adit.	1 kg/l Agua 1/saco	Agua 1/saco
	Total kg	Total l

Por lo tanto;

$$\text{Densidad de la lechada} = \frac{\text{Total kg}}{\text{Total l}} \quad (\text{kg/l})$$

$$\text{Rendimiento de la lechada} = \text{Total l} \quad (\text{l/saco})$$

$$\text{Requerimiento de Agua} = (\text{Agua p/cemento} + \text{Agua p/adit}) \text{ l}$$

$$\text{Requerimiento de Agua} = \text{Agua Total} \quad (\text{l/saco})$$

La información referente a los volúmenes absolutos y los requerimientos de -- agua para los diferentes aditivos de la lechada, se encuentra disponible en manuales para cementaciones.

CALCULOS PARA LA OPERACION. Cuando la lechada de cemento probada en el laboratorio cumple ya con las propiedades requeridas, se proporcionan los datos necesarios para los cálculos de la operación, como son: densidad, rendimiento, re-

querimiento de agua y tiempo bombeable.

Normalmente la cantidad de cemento se reporta en toneladas por lo que se tienen que hacer los cálculos necesarios para determinar el volumen de lechada.

$$V_1 = Nt \cdot 20 R \quad (2.4)$$

V_1 = Volumen de lechada (l)
 Nt = Número de toneladas de cemento (ton)
 R = Rendimiento de la lechada (l/saco)

$$V_a = Nt \cdot 20 Req \quad (2.5)$$

V_a = Volumen de agua (l)
 Req = Requerimiento de agua (l/saco)

$$L_1 = \frac{V_1}{C} \quad (2.6)$$

L_1 = Longitud del tapón de cemento (m)
 C = Capacidad del lugar de colocación (l/m)

II.2. PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas realizadas a la lechada de cemento sirven para determinar sus propiedades, se llevan a cabo en el laboratorio simulando las condiciones a que será sometida, y dependiendo de los resultados se decide si cumple con los requerimientos que las condiciones de la operación necesita.

Generalmente, el procedimiento para preparar una lechada, es el siguiente; con los datos necesarios se prepara una muestra de lechada con los porcentajes de aditivos necesarios y se les practica una prueba piloto. La muestra de lechada se pasa por el consistómetro de Presión Atmosférica para efectuar la prueba de consistencia, posteriormente se corren las pruebas de filtrado, pérdida de fluido, densidad, tiempo bombeable y reología.

Cuando una de las pruebas no cumple con las propiedades requeridas, se prepara una nueva muestra variando los aditivos en sus porcentajes y nuevamente se le practican todas las pruebas hasta obtener la lechada apropiada.

Una vez que se tiene el diseño adecuado, se prepara la cantidad necesaria de cemento con los porcentajes de aditivos probados y se recirculan por medio de silos para mezclarlos, posteriormente se toma una muestra de esta mezcla y se le corren todas las pruebas, en caso necesario se le hacen los ajustes antes de mandar el cemento al pozo.

II.2.1 PARAMETROS REOLOGICOS DEL CEMENTO Y LODO.

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS. El comportamiento de flujo de un fluido está en función de dos términos, el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de cortes (σ). La velocidad de corte se define como un gradiente de velocidad en las capas intermedias que existen entre dos placas paralelas cuando el flujo es laminar. El esfuerzo de corte es la fuerza requerida por unidad de área, para proporcionar un gradiente de velocidad al fluido, dando movimiento al fluido.

Los fluidos se clasifican en Newtonianos y en No-newtonianos, los primeros representan una proporcionalidad directa y constante entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte (σ) a temperatura y presión constante, y fluyen inmediatamente después de ser aplicada una fuerza (fig. II.3).

Los fluidos No-newtonianos tienen un comportamiento diferente (lechadas de cemento y fluidos de perforación), son reológicamente complejos y su comportamiento se rige bajo el modelo "Plástico de Bingham" o el "Ley de potencias". No presentan una directa proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte a presión y temperatura constante y su comportamiento estará en función de la reología de cada fluido (fig. II.4).

FLUIDOS PLASTICOS DE BINGHAM. Es el modelo más utilizado en la industria del petróleo, dado que las lechadas de cemento y los fluidos de perforación se comportan como fluidos plásticos de Bingham y todos los cálculos reológicos se pueden hacer en base a una relación lineal entre velocidad de corte y esfuerzo de corte. Esta relación lineal se denomina "viscosidad aparente" y su valor es calculado con los datos obtenidos del viscosímetro rotacional.

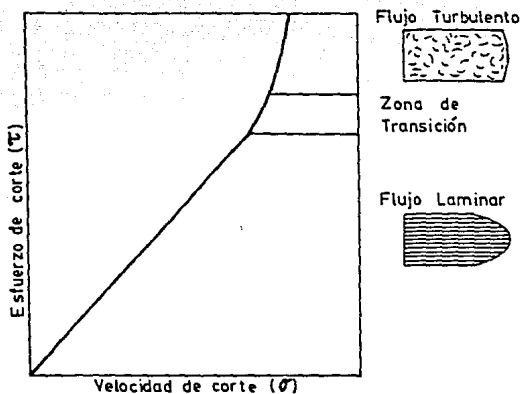


Fig.11.3... Comportamiento típico de los fluidos Newtonianos.

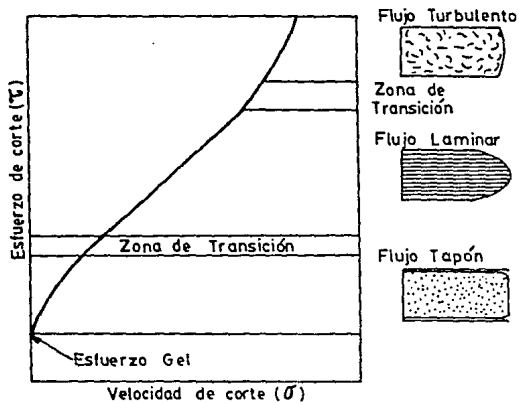


Fig.11.4... Comportamiento típico de los fluidos No-newtonianos.

El viscosímetro rotacional, puede operarse en seis diferentes velocidades, 600, -- 300, 200, 100, 6 y 3 rpm. Para este instrumento, el esfuerzo de corte (τ) está dado en lb/100 pie², y se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = \text{Lec del dia} \times \text{Factor de resorte} \times 1.066 \quad (2.7)^1$$

El valor del factor del resorte del instrumento (N) puede ser 1 ó 2. El valor de 1.066 puede cambiar dependiendo de la combinación entre el rotor y el cilindro interior móvil. La velocidad de corte (σ) es función de las rpm y de las dimensiones del rotor. Para un instrumento normal es:

$$\sigma = 1.703 \times \text{rpm} \quad (2.8)^1$$

Los dos términos utilizados para clasificar el fluido son la "Viscosidad plástica" (V_p) y el "Punto de cedencia" (P_c). La viscosidad se expresa como la pendiente -- de la línea recta y el punto de cedencia es la intersección de una línea recta -- extrapolada con el eje de esfuerzo de corte. El viscosímetro rotacional ha sido diseñado para determinar fácilmente los parámetros indicados (fig. II.5).

$$V_p = \text{Lec } 600 \text{ rpm} - \text{Lec } 300 \text{ rpm} \quad (2.9)^1$$

$$P_c = \text{Lec } 300 \text{ rpm} - V_p \quad (2.10)^1$$

La ecuación básica para este modelo es:

$$\tau = P_c + 2.0885 \times 10^{-5} (V_p) (\sigma) \quad (2.11)^1$$

- τ = Esfuerzo de corte (lb/pie²)
- P_c = Punto de cedencia (lb/100 pie²)
- V_p = Viscosidad plástica (cp)
- σ = Velocidad de corte (seg⁻¹)

¹ "Cementing Oil and Gas Wells"
Capítulo 11 (Flow Calculations)
Revista World Oil.

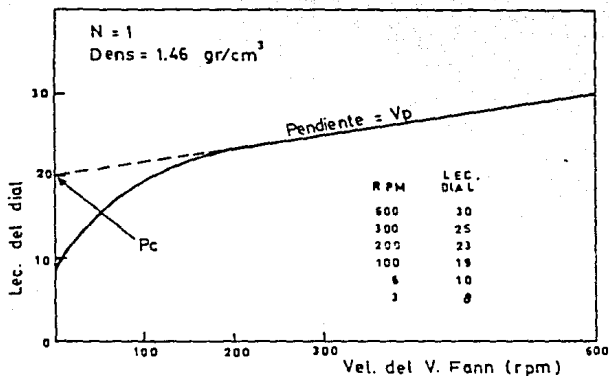


Fig.11.5.- Ejemplo del uso del V. Fann para calcular la viscosidad plástica ($V_p=5 \text{ cp}$) y el punto de cedencia ($P_c = 20 \text{ lb/100pie}^2$) con las ecuaciones del modelo plástico de Bingham.

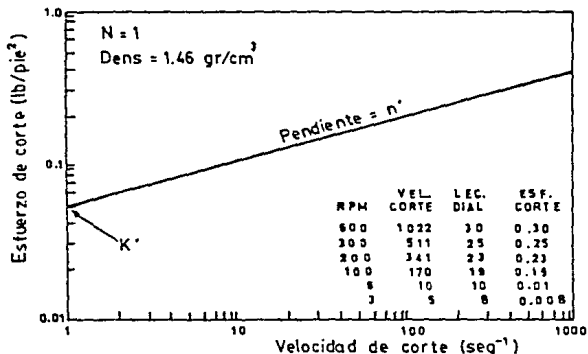


Fig.11.6.- Ejemplo del uso del V. Fann para calcular el índice de comportamiento ($n'=0.2628$) y el índice de consistencia ($K'=0.05173$) con las ecuaciones del modelo de ley de Potencias.

Esta ecuación (2.11) determina una línea recta, y a partir de ella y de la calibración del instrumento se determina la viscosidad plástica y el punto de cegencia.

Es importante conocer la diferencia entre viscosidad plástica y viscosidad aparente, la primera es la inclinación de la parte lineal de la relación esfuerzo de corte-velocidad de corte, y es constante. La viscosidad aparente depende del punto considerado, es la pendiente de la recta que une el origen con el punto en consideración (de esfuerzo de corte-velocidad de corte).

MODELO MATEMATICO DE METZNER Y REED. Llamado también "ley de potencia", se basa en que el fluido presenta una proporcionalidad entre el logaritmo del esfuerzo de corte y el logaritmo de la velocidad de corte con un esfuerzo inicial, al iniciar el flujo.

Las ecuaciones son más complejas pero más exactas que el modelo anterior y los resultados son muy cercanos al comportamiento de una lechada en el pozo.

En base a los valores obtenidos con el viscosímetro, se calculan los parámetros de este modelo matemático.

La ecuación básica es:

$$\tau = K' (\dot{\sigma})^{n'} \quad (2.12)^1$$

K' = Índice de consistencia ($\text{lb seg}^{-1}/\text{pie}^2$)

n' = Índice de comportamiento (adim.)

Mientras que el modelo de plásticos de Bingham se utiliza solamente las mediciones de 600 y 300 rpm para establecer la relación $\tau/\dot{\sigma}$, en el modelo de Ley de Potencias, para mayor exactitud, se utilizan las lecturas a 600, 300, 200 y 100 rpm, y los resultados expresados en escala logarítmica da una línea recta. Resulta entonces que n' es la pendiente de la relación $\tau/\dot{\sigma}$ en escala logarítmica o "Índice de Comportamiento del flujo" y K' la intersección de esta línea a la de esfuerzo de corte y se le conoce como "índice de consistencia" (fig. 11.6).

Por otra parte la viscosidad aparente a una determinada velocidad de corte es- ta dada por:

$$\mu = 47\ 880\ K' \sigma^{n'-1} \quad (2.13)^1$$

Esto significa que si $n'=1$, $\mu = 47\ 880\ K'$, o sea que μ es constante y por- lo tanto se trata de un fluido Newtoniano.

TEORIA SOBRE EL DESPLAZAMIENTO. (Flujo tapón-Flujo Turbulento) La condición preferida para colocar el cemento en el fondo del pozo, siempre que las condi- ciones lo permitan, es disminuir la viscosidad con el objeto de obtener flujo turbulento con un gasto moderado. Esto puede lograrse agregando reductores - de fricción o incrementando el volumen de agua a la lechada.

Existen muchos argumentos a favor del flujo turbulento, pero existen situacio- nes en que no es factible debido a: geometría del pozo, espacio anular, propie- dades de los fluidos y restricción en la presión de fondo, en estos casos se - aconseja flujo tapón.

Como se vió anteriormente las lechadas de cemento y los fluidos de perforación, son fluidos no-newtonianos y los modelos empleados para éstos son; plásticos - de Bingham y Ley de Potencias y sus parámetros son viscosidad plástica (V_p), - punto de cedencia (P_c) y el índice de comportamiento de flujo (n'), índice de consistencia respectivamente (K'), por lo tanto se tiene:

$$n' = 3.32 \log \frac{2 V_p + P_c}{V_p + P_c} \quad (2.14)$$

$$K' = \frac{N (V_p + P_c) 1.066}{100 (511)^{n'}} \quad (2.15)$$

n' = Índice de comportamiento de flujo (adim.)

K' = Índice de consistencia ($\text{lb seg}^{-1} / \text{pie}^2$)

N = Factor que depende del resorte del viscosímetro.

FORMULAS PARA EL CALCULO DE FLUJO

Velocidad de desplazamiento.

$$v = \frac{17.15 Q}{D^2} \quad (2.17)$$

- v = velocidad (pie/seg)
 Q = Gasto (bl/mín)
 D = Diámetro interior de la tubería (pg)

para el espacio anular

$$D^2 = D_o^2 - D_i^2$$

δ

$$D = \frac{4 \times \text{Área de flujo}}{\text{perímetro mojado}}$$

D_o = Diámetro del agujero (pg)

D_i = Diámetro exterior de la tubería.

Número de Reynolds

$$Nre = \frac{1.86 v (2-n') P}{K' (96/D)^{n'}} \quad (2.18)$$

Nre = Número de Reynolds (adim.)

P = Densidad del fluido (lb/gal)

Caida de presión por fricción.

$$P_f = \frac{0.039 L P v^2 f}{D} \quad (2.19)$$

P_f = Caída de presión por fricción (lb/pg²)

L = Longitud de la tubería (pie)

f = Factor de fricción (adim.)

En la fig. 11.7 se muestra la gráfica de número de Reynolds y la correlación - con el factor de fricción.

para $Nre < 2100$: $f = \frac{16}{Nre}$ Fluidos newtonianos

para $Nre > 2100$: $f = 0.00454 + 0.645 (Nre)^{-0.7}$

Fluidos no-newtonianos

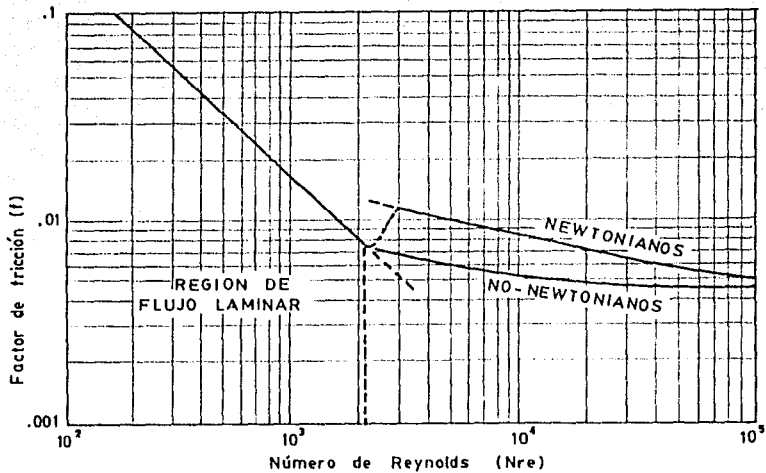


Fig.II.7.- Correlación del factor de fricción- N_{re} .

Velocidad para el flujo turbulento (Nre = 2 100)

$$v_c = \left[\frac{1.129 K' (96/D)^{n'}}{P} \right]^{1/(2-n')} \quad (2.20)$$

v_c = Velocidad crítica (pie/seg)

Presión hidrostática

$$Ph = 0.052 h \quad (2.21)$$

Ph = Presión hidrostática (lb/pg²)

h = Altura de la columna (pie)

II.2.2. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO.

Las pruebas que se le practican a una lechada de cemento son las siguientes:

- Agua libre
- Propiedades reológicas (viscosidad)
- Pérdida de fluido
- Tiempo de espesamiento
- Resistencia a la compresión
- Densidad

PREPARACION DE LA LECHADA. En la preparación de la lechada de cemento se debe contar con una balanza de precisión, un mezclador y una bureta, todos con la capacidad suficiente para los volúmenes de agua y cemento.

La composición de una lechada depende de la clase API del cemento (ver tabla -- II.8).

TABLA II.8. Composición de la lechada de cemento.

Cemento API	% de agua por peso de cmto.	Galones por saco	Litros por saco
A y B	46	5.19	19.6
C	56	6.32	23.9
D, E, F, y H	38	4.29	16.2
G	44	4.97	18.8

* saco de 94 lb (42.7 kg)

AGUA DE MEZCLADO. El agua utilizada en la prueba deberá ser la misma que se ocupará en la operación. El porcentaje de agua a utilizar para agregarle a cada uno de los cementos deberá ser conforme a los valores dados en la tabla II.9.

El agua se mide en una probeta y no deberá agregarse más de ésta, para compensar los efectos de mojabilidad, evaporación etc. El volumen de lechada para mezclarse, son 600 ml.

El adicionar bentonita al cemento requiere que la cantidad de agua se incremente. Es recomendable que para efectos de prueba, se adicione 5.3% de agua por cada 1.0% de bentonita en todas las clases API de cemento.

TABLA II.9. Requerimientos de volumen de lechada.

CLASES DE CEMENTO API

Volumen de lechada	Componentes	A y B	C	D, E, F y H	G
		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
600 ml	Agua	355	383	327	349
	Cemento	772	684	860	792

MEZCLADO DE CEMENTO Y AGUA. Una vez que se tienen los volúmenes requeridos de agua y cemento, el agua se coloca en el recipiente del mezclador girando a baja velocidad ($4000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$) y se agrega la muestra de cemento en no más de 15 segundos. Posteriormente que todo el cemento ha sido agregado al agua, se mezcla a alta velocidad ($12\ 000 \text{ rpm} \pm 500 \text{ rpm}$) durante 35 segundos.

PRUEBA DE AGUA LIBRE. Preparada la lechada, deberá depositarse en la cámara del consistómetro de presión atmosférica y permanecer durante 20 minutos a una temperatura de 80°F (27°C), posteriormente la lechada se agita durante 35 segundos, la lechada (250 ml) se coloca en una probeta graduada, se tapa para evitar evaporación, a una temperatura de 73°F (23°C). El agua desalojada por el asentamiento de la lechada después de dos horas, se le conoce como "agua libre", esta agua se mide expresándose en mililitros (ml). La clase G y H de cemento no deberán exceder de 3.5 ml (1.1%) de agua libre.

DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS.

EQUIPO. El viscosímetro rotacional Fann se utiliza para determinar las propiedades reológicas de los fluidos. De los datos de esfuerzo de corte obtenidos a diferentes velocidades de rotación del viscosímetro Fann, se efectúan los cálculos para determinar n' y K' , la viscosidad aparente, la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

OPERACION. La lechada una vez preparada se vacía inmediatamente dentro del recipiente del consistómetro. Este previamente ha sido calentado a la temperatura de prueba. La lechada se agita por un período de 20 minutos a la temperatura de prueba.

La lechada se transfiere a la copa de muestras, y se mantendrá a la temperatura final que marca la cédula correspondiente, durante el período de prueba.

Con el indicador de velocidad en 600 rpm, se coloca la copa con la lechada al nivel indicado. La lectura inicial a 600 rpm se debe tomar 60 segundos después de haber iniciado la rotación.

Se anotan las lecturas del esfuerzo de corte que se observan en el dial a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm en este orden. Para las lecturas a baja velocidad, los cambios se hacen a intervalos de 20 segundos. Cada lectura del dial se tomará exactamente antes de hacer el cambio a la siguiente velocidad inferior.

PRUEBA DE PERDIDA DE FLUIDO.

EQUIPO. Para efectuar la prueba de pérdida de fluido de una lechada de cemento, se cuenta con dos aparatos.

Modelo Estándar. Las presiones utilizadas son normalmente $1\ 000\ \text{lb}/\text{pg}^2$ con $1\ 500\ \text{lb}/\text{pg}^2$ como presión máxima de trabajo, las temperaturas de prueba son hasta de $200\ ^\circ\text{F}$. La prueba que se le hace al fluido es normalmente preacondicionada en un consistómetro y posteriormente se transfiere a la celda de prueba de pérdida de fluido. Tiene disponible dos celdas de prueba.

Modelo mezclador. Puede operar con temperaturas de prueba hasta de 400 °F, -- normalmente utiliza 1 000 lb/pg² con 1 500 lb/pg² como presión máxima de trabajo. El acondicionamiento y la prueba de la muestra se efectúa en la misma celda, eliminando la necesidad de enfriar o transferir la lechada y los posibles cambios de propiedades de la lechada en prueba.

PROCEDIMIENTO. Dependiendo de la temperatura de prueba se seguirá uno u otro de los procedimientos señalados.

Pruebas menores a 194 °F. Cuando la prueba se va a efectuar bajo las condiciones de temperatura de fondo del pozo (menores a 194°F) la lechada deberá prepararse de acuerdo a lo visto anteriormente y posteriormente colocarla en el consistómetro de Presión Atmosférica o presurizado y seguir la cédula correspondiente para efectuar la prueba.

Al terminar la prueba, la lechada se vacía dentro de la celda del aparato, precalentada. La lechada se mantendrá a la temperatura final que marca la cédula durante el período de prueba.

Pruebas Mayores a 194°F y Menores a 250°F. Cuando la prueba se efectúa bajo las condiciones de temperatura de fondo del pozo entre 194°F y 250°F, se debe seguir el procedimiento que se indica a continuación.

Precalentar la celda de pérdida de fluido a 194°F durante la preparación de la lechada, una vez que ésta ha sido preparada se coloca en el consistómetro presurizado, el promedio de incremento de presión y temperatura se hace de acuerdo a la tabla II.10.

TABLA II.10. Cédula para prueba de filtrado para temperaturas mayor de 194°F y menor a 250°F.

Tiempo (min)	Presión (lb/pg ²)	Temperatura °F	°C
0	1500	80	26.7
2	2200	91	32.8
4	3000	103	39.4
6	3700	114	45.6
8	4400	126	52.2
10	5100	137	58.3
12	5900	148	64.4
14	6600	160	71.1
16	7300	171	77.2
18	8000	183	83.9
20	8800	194	90.0

Después de 20 minutos de haber permanecido la muestra en el consistómetro, se vacía en la celda del aparato, se le coloca la cubierta de calentamiento y se tapa adecuadamente con su respectiva malla y empaque. Una vez acondicionada la celda adecuadamente, se acciona el termostato a la temperatura final de --- prueba y se procede a colocar las líneas de presión.

Se aplica 100 lb/pg² de presión a la celda por la parte superior y posteriormente 100 lb/pg² por la parte de abajo. Después de 15 minutos de que la celda quedó presurizada, la presión se aumenta por la parte de arriba a 1 000 lb/pg² y en seguida se abre la válvula de fondo donde previamente se colocó una probeta graduada.

El filtrado se recibe en la probeta durante un periodo de 30 minutos. Al final de la prueba se liberan las presiones y se deja enfriar la celda.

Cuando la prueba se efectúa para temperaturas menores de 194 °F, la diferencial de presión debe ser de 1 000 lb/pg².

Periodo de prueba. El periodo de prueba se considera desde el instante en que se aplica la presión inicial, las lecturas deben tomarse a 1, 2 y 5 minutos y después a intervalos de 5 minutos hasta completar 30. Si la deshidratación ocurre antes del periodo de los 30 minutos, el tiempo requerido para deshidratar la muestra deberá anotarse.

El volumen de filtrado debe reportarse como sigue:

a) Para periodos de prueba de 30 minutos, reportar el volumen de filtrado como el fluido perdido a 100 lb/pg² ó 1 000 lb/pg² de presión diferencial de -- prueba.

b) Para periodos de prueba cortos. Para las lechadas en que la deshidratación se lleva a cabo en menos de 30 minutos, los valores de pérdida de fluido pueden ser obtenidos de la siguiente forma:

1. Graficar los resultados en papel log-log y extrapolar al valor de 30 minutos.

2. Multiplicar la cantidad de filtrado que se obtuvo por 5.477 y dividir por la raíz cuadrada del tiempo. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_{30} = F_t \frac{5.477}{\sqrt{t}} \quad (2.22)$$

F_{30} = Cantidad de filtrado en 30 minutos.

F_t = Cantidad de filtrado al tiempo t

t = Tiempo en minutos cuando la prueba termina.

PRUEBA DEL TIEMPO DE ESPESAMIENTO. Las pruebas de espesamiento o tiempo bombeable que se le practican a la lechada, sirven para determinar el tiempo en que ésta permanece en estado fluido bajo condiciones de laboratorio dadas.

EQUIPO. Para determinar esta propiedad de la lechada se cuenta con dos aparatos que son:

Consistómetro de Presión Atmosférica. Las aplicaciones que se le dan a este equipo son las siguientes:

- Determinar los requerimientos de agua para el cemento y los aditivos.
- Determinación de la viscosidad de la lechada.
- Condiciones de prueba de la lechada, previo a otras pruebas como son: pérdida de fluido, agua libre o pruebas de reología.
- Determinar el tiempo de bombeo de la lechada para pozos someros de baja temperatura y presión.

El aparato consiste de una copa para la lechada de cemento, que gira en un compartimiento que contiene un elemento de calefacción sumergido en agua. La viscosidad del fluido en prueba se mide por la resistencia causada por la copa que gira alrededor de una paleta estacionaria fija, esta resistencia se transfiere a un resorte en espiral, indicando la viscosidad en la tapa de la copa, que se calibró para medir la consistencia en unidades Bearden. Esta consistencia se indica en una escala en la tapa de la copa de la lechada.

Consistómetro Presurizado. Se utiliza para medir la consistencia de la lechada, simulando las condiciones del pozo de presión y temperatura. La función principal de este aparato es determinar el tiempo máximo disponible de bombeo de la lechada.

La lechada de cemento se agita en una copa colocada en una cámara de presión y calentamiento, para simular las condiciones del pozo. La consistencia de la lechada dentro de la copa se mide por un potenciómetro colocado en el eje de la paleta. La resistencia en la paleta se transfiere a un potenciómetro que se calibra para cambiar la resistencia o torque a una señal de voltaje. Esta señal representa la consistencia de la lechada y aparece en el tablero de control del consistómetro y se registra en una gráfica.

Procedimiento. Una vez preparada la lechada de cemento, se vacía en la copa del consistómetro y se cierra herméticamente colocando la copa en la cámara presurizada llena de aceite. Se le coloca la fuente de calor a la cámara de presión y se inicia la operación del aparato.

La operación de llenado, sellado, colocación de la copa en la cámara y funcionamiento del equipo deberá de llevarse a cabo dentro de los 5 minutos después de haber terminado el período de mezclado.

Durante el período de prueba, la temperatura y la presión que debe existir sobre la lechada, debe ser de acuerdo a la especificación de la cédula correspondiente.

Las cédulas son elaboradas para representar las condiciones a que será sometida la lechada. Los datos necesarios para determinar el número de cédula son: operación, profundidad, temperatura y densidad del lodo.

Las cédulas que simulan las condiciones del pozo para la colocación de tapones son de la número 12 a la 21 (ver tablas II.11 y II.12).

TABLA II.11 Cédulas de prueba para cementaciones forzadas y Tapones de Cemento.

Cédula No.	Prof. (m)	Dens. Lodo (gr/cm ³)	Pres. Sup. (kg/cm ²)	Temp. Fondo Circ. °F	Tiempo (min)
12	310	1.20	35	89	23
13	610	1.20	35	98	25
14	1220	1.20	35	116	28
15	1830	1.20	56	136	31
16	2440	1.20	70	159	35
17	3050	1.40	91	186	38
18	3660	1.70	105	213	42
19	4270	1.90	127	242	45
20	4880	2.00	141	271	48
21	5490	2.20	155	301	51

TABLA II.12 Cédula número 15

Prof.	Dens. Lodo	Tiempo (min)	Presión (kg/cm ²)	Temp. (° C)
1830 m	1.20 (gr/cm ³)			
		0	56	27
		1	84	30
		2	113	33
		3	148	36
		4	176	39
		5	204	42
		6	232	46
		7	260	48
		8	295	52
		9	323	54
		10	352	58
		27	352	58
		28	380	58
		29	415	58
		30	443	58
		31	471	58

La cédula indica el tiempo en que se deben alcanzar las condiciones de presión y temperatura, las cuales deben permanecer durante la prueba.

RESULTADOS DE LA PRUEBA. Los resultados se reportan en forma gráfica, la cual registra en forma continua los datos durante la prueba.

Una gráfica típica de tiempo bombeable se muestra en la fig. II.13, en la cual se pueden distinguir dos curvas que muestran el comportamiento de la prueba.

La curva 1, muestra el tiempo en que se alcanza la temperatura de prueba, en el punto en que la curva se hace constante, corresponde al tiempo que marca la cédula para alcanzar la temperatura final de prueba.

En la curva 2, se indica el comportamiento de la lechada y se puede distinguir el efecto de la temperatura que tiene sobre ésta. Al iniciar la prueba, la gráfica muestra un voltaje mayor al que se muestra una vez que se alcanza la temperatura final de prueba. Esto es debido a que a una mayor temperatura la lechada es más fluida, así la curva permanece más o menos constante cuando la curva 1 de registro de temperatura se mantiene constante.

Cuando la curva 2 presenta un cambio brusco, incrementándose el voltaje, se indica que la lechada llegó a su límite de bombeabilidad y el tiempo correspondiente a ese punto, es el tiempo bombeable de la lechada.

PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESION.

EQUIPO. El equipo para el curado de las muestras de cemento simula las condiciones de presión y temperatura. Cuenta con una cubierta de calentamiento y un control automático de temperatura, se presuriza con una bomba hidráulica.

Para realizar la prueba de resistencia a la compresión se utiliza una prensa hidráulica con un indicador de presión, calibrado a las libras de carga que se le aplican a la muestra.

Existe otro aparato de ultrasonido para determinar la resistencia a la compresión. La resistencia se mide por la medida de cambio en la velocidad de la señal del ultrasonido, transmitida a través de la muestra de cemento. A medida que la resistencia de la muestra aumenta, el tiempo de tránsito de la señal decrece.

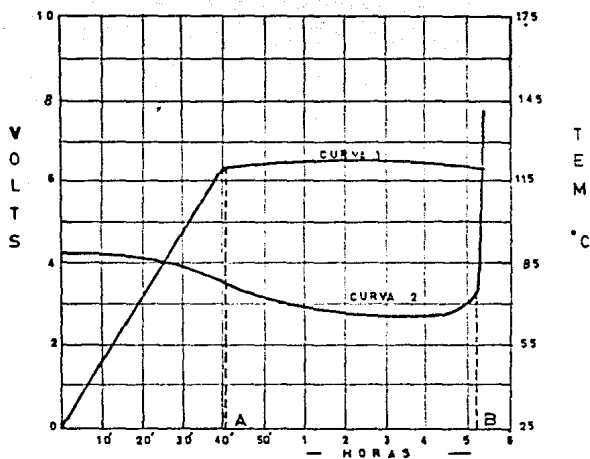


Fig.11.13.- Gráfica de Tiempo Bombeable de una lechada de cemento. El punto "A" indica la temperatura final de prueba y el punto "B", el tiempo bombeable de la lechada (5:10 hrs.).

Este equipo está conectado a una unidad microprocesadora que mide el tiempo de tránsito de la señal del ultrasonido, y los cambia a valores relativos de resistencia a la compresión.

Procedimiento. La lechada de cemento una vez preparada, se coloca en los moldes que previamente fueron preparados, se cierran herméticamente y se colocan en el aparato de prueba.

Períodos de Curado. El período de curado es el lapso de tiempo desde que la muestra se somete a temperatura en el recipiente de curado hasta que la muestra se somete a la prueba de resistencia a la compresión.

Los períodos de curado especificados para la prueba de muestras son 8 y 24 horas, con excepción del cemento clase J, para el cual el período de curado es de 12 y 24 horas, y 7 días (tabla II.14).

TABLA II.14. Mínimos requerimientos de resistencia a la Compresión.

Clase de Cemento	Cédula No.	Temp. Curado °F	Pres. Curado (kg/cm ²)	Resist. a la Compresión al tiempo de curado in- dicado (kg/cm ²)			
				8:00 Horas	12:00 Horas	24:00 Horas	7 Días
A	-	100	Atmos.	18	--	127	---
B	-	100	Atmos.	14	--	105	---
C	-	100	Atmos.	21	--	141	---
D	4S	170	211	--	--	70	---
	6S	230	211	35	--	141	---
E	4S	170	211	--	--	70	---
	8S	290	211	35	--	141	---
F	6S	230	211	--	--	70	---
	9S	320	211	35	--	70	---
G, H	-	100	Atmos.	21	--	--	---
	-	140	Atmos.	105	--	--	---
J	8S	290	211	--	35	--	---
	10S	350	211	--	--	70	70

Cuando se utilice una prensa hidráulica para las pruebas de resistencia a la - compresión, la razón de carga de fuerza normal para las muestras será de 4 000 lb/pg².

DETERMINACION DE LA DENSIDAD.

EQUIPO. Para determinar la densidad de la lechada, se utiliza la balanza de - lodos. Para determinar esta propiedad con mayor exactitud, se puede recurrir a una balanza presurizada. La operación de ésta, es similar a la balanza de - lodos.

Procedimiento. La balanza de lodos, para determinar la densidad de la lechada se utiliza de la misma manera como si se tratara de lodo excepto que la lechada antes de vaciarse a la copa de la balanza se debe remover con una espátula unas 25 veces para eliminar el aire atrapado.

Balanza Presurizada. El propósito de colocar la muestra bajo presión, es para minimizar el efecto de la entrada de aire a la lechada.

La balanza presurizada cuenta con un émbolo que sirve para transmitirle presión a la lechada, y una válvula colocada en la tapa de la copa. Una vez que se -- tiene la lechada preparada, se vacía en la copa de la balanza y se tapa con la válvula abierta, y se cierra herméticamente.

El émbolo se llena de cemento sumergiéndolo en la lechada y succionando por me -- dio de un pistón. Cuando se tenga el émbolo con lechada se coloca sobre de la válvula y se aplica presión con el mismo, presionando hacia abajo, esto hace - que la válvula se mantenga abierta y al mismo tiempo se transmita la presión a la lechada de cemento.

Cuando la presión actúa dentro de la copa, la misma presión tiende a cerrar la válvula. Así, ésta se cierra gradualmente mientras se mantiene la presión - con el pistón. Cuando la válvula se cierra completamente, se desconecta el -- émbolo.

La lechada de cemento presurizada puede entonces pesarse, la densidad puede -- leerse directamente en una de sus cuatro escalas, lb/gal, densidad relativa, - gradiente de presión lb/pg² / 1000 pies y en lb/pie³.

C A P I T U L O I I I

BACHES LAVADORES Y ESPACIADORES

III.1. DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO DE LOS BACHES

La remoción de fluido de control ha sido reconocida como una etapa crítica en toda operación de cementación. El éxito de la operación requiere que todo el espacio que deje el fluido de control se llene con cemento y éste se adhiera a la formación o a la T.R. Esto, como se puede apreciar, significa que la lechada de cemento tiene que desplazar completamente al fluido que ocupa ese espacio.

Grandes esfuerzos se han realizado para reemplazar el fluido de control por la lechada. Fallas en el reemplazo total del fluido trae como consecuencia la -- formación de interdigitaciones a lo largo del espacio anular de fluido de control en la lechada de cemento. Este fluido interdigitado al contaminarse con fluidos de la formación trae como consecuencia la formación de canales.

Los canales en el cemento fraguado permiten la migración de fluidos de la formación, resultando entonces en producción de fluidos indeseables. Este problema es más crítico cuando se colocan tapones para aislar intervalos productores de agua salada y el intervalo siguiente resulta productor de hidrocarburos.

El uso de baches apropiados espaciador y/o lavador ayudan a efectuar una buena operación. El bache espaciador o lavador pueden ser utilizados para efectuar un desplazamiento eficiente del fluido de control del lugar que ocupará posteriormente la lechada de cemento. También mantiene separada la lechada del -- fluido de control durante el desplazamiento.

La contaminación por el fluido de control puede resultar en una interfase incompatible que causa cambios adversos en las propiedades de la lechada. La interfase incompatible manifiesta un incremento en la viscosidad. Durante el -- desplazamiento, esta interfase se ve reflejada por una alta presión de bombeo.

Los aditivos típicos del fluido de perforación tales como: agentes para el -- control de pérdida de fluido, dispersantes, sal, aceite, etc. pueden ser incompatibles con la lechada de cemento.

La contaminación de la lechada por estos aditivos puede afectar desfavorablemente las propiedades críticas como: tiempo de bombeo y resistencia a la compresión desarrollada durante el fraguado. El efecto dependerá de la concentración y el tipo de contaminante.

Por esta razón, utilizar baches espaciadores y/o lavadores diseñados para que sean compatibles con los fluidos de control y la lechada de cemento, beneficiará en la eliminación de la interfase incompatible y los problemas de contaminación.

BACHES ESPACIADORES. Los baches espaciadores son fluidos especiales, diseñados para separar el fluido de control y la lechada de cemento. El uso de baches espaciadores ha permitido la aplicación de flujo tapón y hace que esta técnica se utilice en un amplio rango de aplicaciones.

El bache espaciador es básicamente un fluido compatible con la lechada y con el fluido de control. La compatibilidad es la clave, ya que la mezcla de fluidos de perforación con lechadas de cemento principalmente, resultan en floculaciones de los mismos. Sin la presencia de un bache espaciador se desarrolla una interfase muy espesa y difícil de bombear. Sin olvidar el problema de aumento de presión, el principal problema radica en que cuando la viscosidad de la interfase aumenta, esto permite la interdigitación de la lechada en el fluido de control, dejando así fluido sin desplazar. Este problema es mayor a medida que el tiempo de bombeo aumenta.

Un bache espaciador diseñado adecuadamente mantendrá separados al fluido de control de la lechada aún en las condiciones más adversas.

BACHES LAVADORES. Estos baches remueven el lodo de perforación dejado sobre la formación. Al entrar estos baches en contacto con el lodo de perforación, reducen la viscosidad del mismo adelgazándolo y facilitando su remoción por la combinación de la turbulencia y la acción de surfactantes.

Por su baja viscosidad los baches lavadores alcanzan flujo turbulento a muy bajos gastos, por supuesto que debe ser compatible con ambos fluidos, el lodo y la lechada de cemento.

Los baches lavadores pueden tener la propiedad de baja pérdida de fluido si se desea. La baja pérdida de fluido es muy utilizada para operaciones donde el cemento hará contacto con zonas de alta permeabilidad.

III.2. DISEÑO Y SELECCION DE LOS BACHES ADECUADOS

Cuando se selecciona un bache espaciador para efectuar un desplazamiento eficiente de lodo, se deben tomar en cuenta los siguientes factores.

- a) Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo.
- b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y la lechada.
- c) Características de mojabilidad del bache espaciador.
- d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión.

a) Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo.

Como se dijo anteriormente, se sabe que algún tipo de bache espaciador deberá ser colocado entre el lodo y el cemento para prevenir la incompatibilidad potencial de la interfase.

Uno de los pasos intermedios a lo largo de estos últimos años, fué el utilizar una "lechada raspadora". Una lechada raspadora se puede definir como una lechada altamente dispersa y de baja densidad, la cual posee valores bajos de pérdida de fluido y se bombea adelante del cemento, esperando que ésta proporcione un mejor sello hidráulico.

En la década de 1940 se hace uso de altos gastos de bombeo y se utiliza agua como bache espaciador, obteniéndose una mejor remoción del lodo. Fué hasta la década de 1960 que se determinó que un fluido en régimen de flujo turbulento, en contacto con el punto de interés (aproximadamente diez minutos), podría también proporcionar una mejor remoción del lodo. También se concluyó que el bache espaciador, en régimen de flujo turbulento, debe poseer características de baja pérdida de fluido para ser capaz de conservar las propiedades reológicas durante el desplazamiento.

Posteriormente, en las décadas de los años 1970 y 1980, se reconoció que los fluidos incompatibles de la lechada raspadora y la mayoría de los lodos podrían ser tratados mediante el uso de un fluido espaciador, capaz de desplazar se en flujo turbulento a razonables gastos de bombeo y aún mantener la suspensión de sólidos requeridos para obtener una densidad mayor que la del lodo.

El criterio más importante en la selección de un bache espaciador es que el fluido seleccionado pueda desplazarse en turbulencia a gastos de bombeo razonables para la geometría que presente el pozo.

Se conocen dos regímenes de flujo en la industria del petróleo y que están ampliamente aceptados como ideales para la remoción del lodo. El flujo turbulento es el más aceptado de los dos. Experiencias de campo indican que se puede asegurar una buena remoción de lodo cuando se puede mantener flujo turbulento a un punto de referencia por más de diez minutos. En algunas ocasiones los gastos para flujo turbulento son muy altos y es por eso que se han desarrollado agentes dispersantes que permitan lograr flujo turbulento a bajos gastos.

El segundo régimen de flujo aceptado es el flujo tapón, en el cual se necesita 90 pie/min (27.5 m/min) de velocidad de flujo para evitar que se quede lodo de perforación pegado en las paredes del pozo. El flujo laminar está entre estos dos casos y ocurre cuando las partículas de los extremos no tienen ningún movimiento y las del centro se mueven a la velocidad máxima. Como puede verse, este régimen debe evitarse para que no se quede lodo de perforación sin desplazar.

Cuando la densidad del lodo es inferior o igual a 9 lb/gal (1.1 gr/cm³), generalmente se utiliza agua como bache espaciador. Frecuentemente se agregan 5 lb de sosa cáustica por barril de agua dulce o agua de mar, para elevar el pH. Este sencillo bache espaciador puede mezclarse fácilmente.

Como la mayoría de los fluidos o baches de alta densidad, no son fluidos newtonianos, generalmente se utiliza el modelo de Ley de potencias para calcular los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción. Por lo tanto, se utilizan los datos del viscosímetro rotacional Fann para calcular el índice de comportamiento de flujo n' y el índice de consistencia K' .

Una vez que se han determinado los valores de n' y K' , del fluido espaciador, se deberá calcular el gasto mínimo de bombeo con el que se obtendrá flujo turbulento. Se recomienda que estos gastos se calculen con datos de laboratorio y de campo, a partir de la mezcla real del bache espaciador. El gasto crítico para obtener flujo turbulento puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Q_c = \left[\frac{Nre K' (96 / (D_h - D_p)) n'}{1.86 P} \right] \frac{1}{2 - n'} \left(\frac{D_h^2 - D_p^2}{17.157} \right) \quad (3.1)$$

- Q_c = Gastos para obtener flujo turbulento en el espacio anular (bl/min)
 Nre = Número de Reynolds (adim.)
 K' = Índice de consistencia (lb seg⁻¹/pie²)
 n' = Índice de comportamiento de flujo (adim.)
 D_p = Diámetro de la tubería (pg)
 D_h = Diámetro del agujero (pg)
 P = Densidad del fluido (lb/gal)

b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y la lechada de cemento.

En ordende importancia, para la selección del fluido espaciador, es saber si éste, es o no compatible con el lodo y la lechada. Cuando se seleccione el tipo de espaciador requerido, se deberá considerar factores como: tratamiento químico del lodo, tipo de fluido de control (base agua, base aceite o de emulsión inversa, o a base de polímeros), carga iónica del emulsificante y los aditivos químicos, para asegurar la compatibilidad con el lodo y la lechada de cemento.

c) Características de mojabilidad.

Cuando se tienen lodos base aceite o de emulsión inversa, se presenta el problema de mojabilidad, ya que la formación queda mojada por aceite.

Como la formación deberá estar mojada por agua para facilitar la adherencia del cemento, el sistema específico del lodo deberá probarse con los sistemas del posible fluido espaciador, hasta encontrar uno que sea compatible. Durante la realización de estas pruebas debe buscarse un surfactante o una combinación de éstos que dejen mojada por agua la formación. Lo anterior sería lo ideal, sin embargo, a veces no se puede realizar por lo que se recomienda se bombee un bache de fluido oleoso entre el lodo y el cemento.

Los siguientes pasos pueden ser una gufa típica de bombeo:

1. Lodo
2. 20 bl. de fluido oleoso
3. 50 bl de fluido espaciador
4. Lechada de cemento
5. Lodo

La única precaución que deberá tomarse, es la de realizar en el campo una prueba de agitado de botella, si la prueba resulta compatible en el laboratorio y no es compatible en la prueba de campo, deberá buscarse un fluido base aceite compatible que se bombeará adelante del bache espaciador.

d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión.

Cuando se diseña un bache espaciador, deberá considerarse la densidad de éste. Lo que generalmente se hace es diseñar la densidad del bache espaciador entre la densidad del lodo y la de la lechada. Se acostumbra que el fluido espaciador sea de una densidad de 0.5 lb/gal (0.06 gr/cm^3) mayor que la del lodo. Aunque baches espaciadores de mayor densidad pueden no ser perjudiciales, sí resultan más costosos. también pueden crear mayores densidades de circulación durante la colocación del cemento.

El otro problema con los baches espaciadores de alta densidad, especialmente aquellos con viscosidades suficientemente bajas para desplazarse en turbulencia, es la tendencia al asentamiento de sólidos. A menos que se utilicen polímeros al formular el bache, que rompan sus uniones con la temperatura, permitiendo así reducir la viscosidad del bache espaciador durante la colocación del cemento.

Generalmente se utiliza barita para densificar el bache espaciador. Frecuentemente las compañías diseñan sus mezclas utilizando la densidad relativa de la barita disponible, para adicionar mayor agente densificante o menos agua, según se requiera.

Como consecuencia, la reología será diferente en el campo que en la prueba realizada en el laboratorio, por lo tanto deberá realizarse otra prueba en el campo.

III.3. COMPONENTES DE LOS BACHES.

BACHES ESPACIADORES. Los baches espaciadores son fluidos espesos que ayudan a desplazar al lodo en forma de pistón, debido a la combinación de las características de viscosidad y a la diferencia de densidad entre el bache espaciador y el lodo.

Un bache espaciador, se recomienda que tenga como mínimo una diferencia de densidad con respecto al lodo, del orden de 0.03 gr/cm^3 , sin embargo ésta puede ser hasta de 0.12 gr/cm^3 .

Estos baches son desplazados en régimen de flujo tapón sin embargo existen otros que debido a su baja viscosidad, pueden ser desplazados en flujo turbulento a muy bajos gastos de bombeo. Partiendo de ésta característica, pueden ser clasificados los baches en:

Baches espaciadores Base Agua. Generalmente estos baches son desplazados en flujo tapón y son fluidos base agua con aditivos que le proporcionan las propiedades requeridas.

Los aditivos principales son los densificantes, los cuales pueden ser agregados para adquirir densidades hasta de 20 lb/gal (2.40 gr/cm^3), los materiales que se pueden agregar son: barita, hematita, arena sílica e ilmenita. Se debe tener en cuenta que mientras más finas las partículas del agente densificante, mayor es la viscosidad y la gelación del bache.

Contiene además un polímero para el control de pérdida de fluido que ayuda a reducir la pérdida de agua de la lechada, sobre todo en zonas con alta permeabilidad o de fracturas.

Generalmente se le adiciona cloruro de potasio (soluciones al 3%) para inhibir los cloruros que se encuentran en la formación y en el lodo.

Estos baches son compatibles con los lodos base agua pero pueden utilizarse con lodos base aceite agregándoles un surfactante, que cambia la mojabilidad de las paredes del agujero, ayudando a remover las capas de lodo de la formación y dejando a ésta mojada por agua, ayudando así a obtener una cementación exitosa.

Al agregarle surfactantes a los baches se genera la creación de espuma por lo cual, se debe agregar un agente antiespumante para evitar que el bache arrastre aire.

La temperatura a la cual los baches permanecen estables, está en función de los polímeros, de los surfactantes y de los aditivos en general que se agreguen. Existen en la actualidad aditivos para alta temperatura, por lo cual al hacer el diseño, se debe especificar la temperatura máxima a la que estará el bache.

Cuando se tienen condiciones de pérdida de circulación, al bache se le debe agregar aditivos para controlar la pérdida, así como cuando se tengan formaciones salinas en el pozo, el bache debe saturarse con sal.

Existen baches espaciadores base agua que se les adicionan polímeros, los cuales alteran la viscosidad a medida que aumenta la temperatura, por lo que el flujo turbulento se alcanza con bajos gastos de bombeo.

Baches espaciadores Base Aceite. Estos baches son utilizados cuando las condiciones del pozo permiten utilizar flujo turbulento y cuando el fluido de control es base aceite o de emulsión inversa.

Estos baches contienen un poderoso dispersante que permite ser densificado con barita, hasta valores de 20 lb/gal (2.40 gr/cm³) y alcanzan el flujo turbulento a bajos gastos de bombeo.

Estos baches al igual que los anteriores, se les agregan diferentes aditivos para darles las propiedades requeridas.

BACHES LAVADORES. Para eliminar al máximo el lodo de perforación el mejor método es utilizar el flujo turbulento, pero existen condiciones del pozo que imposibilitan el uso de turbulencia. En esos casos se utiliza el flujo tapón para desplazar el lodo de perforación.

La utilización de baches lavadores hace posible que la eliminación del fluido de perforación de las paredes del pozo, se lleve a cabo con gastos razonables de bombeo.

Las técnicas para eliminar el enjarre se pueden dividir en:

- Baches lavadores Químicos
- Baches lavadores de alta Viscosidad.

Baches lavadores químicos. Estos fluidos contienen aditivos que adelgazan el lodo de perforación y penetran en el enjarre, además alcanzan el flujo turbulento con facilidad.

Estos baches son fluidos base agua con un componente principal y en la concentración siguiente:

Componente	Concentración
Pirofosfato de Acido Sódico	10 lb/bl
Lignosulfonatos Ferrocromicos	4 lb/bl
Tanatos	4 lb/bl
Surfactantes	1 gal/bl

Los baches más utilizados son aquellos que contienen surfactantes, ya que son los que mejores resultados han dado en la remoción del lodo, estos surfactantes son principalmente; dispersantes y adelgazadores.

Pueden ser agregados otros aditivos: para el control de pérdida de fluido, -- para pérdidas de circulación e inhibidores de cloruros. El agua para preparar los baches puede ser dulce o salada, es compatible con los lodos base agua y - agregándole un surfactante extra, puede utilizarse con lodos base aceite.

Baches lavadores de alta viscosidad. Son fluidos base agua que trabajan por - el sistema de barrido viscoso, cumpliendo la función de la remoción del fluido de perforación, independientemente del gasto a que sean desplazados. No es necesario alcanzar flujo turbulento para obtener una excelente eliminación del - enjarre.

Su principal aditivo es un agente viscosificante, así se obtiene una buena suspensión de sólidos, además; un surfactante que contribuye con la mojabilidad - de la formación (mojada por agua), aditivos que floculan las arcillas del enj - rre formando una interfase viscosa que ayuda al barrido.

Tiene además reductores de fricción y aditivos que controlan la pérdida de -- agua. Su densidad puede ser ajustada en un amplio rango, de 8.6 a 18 lb/gal - 1.03 a 2.16 gr/cm³).

III.4. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD

Los procedimientos descritos intentan estandarizar los métodos para determinar ciertas propiedades de los baches, lavador y espaciador, mezclados con fluidos de control y lechadas de cemento.

El siguiente procedimiento de prueba, es el mismo para baches espaciadores y lavadores, todos los porcentajes están expresados en porcentaje de volumen.

FLUIDOS BASE.

Bache(s). El bache a utilizar deberá ser de preparación reciente y como lo -- indica el diseñador.

Lodo. Se deberá utilizar fluido representativo del pozo. La muestra debe -- rá ser removida para romper el gel y cualquier sedimento suspendido.

Lechada de Cemento. La muestra de la lechada deberá ser formulada del mismo - cemento que se surtió al pozo y de preferencia mezclarla con el -- agua de la localización.

Compatibilidad de mezcla de fluidos a baja temperatura.

Las mezclas deberán removerse con una espátula hasta hacerla homogénea y así - determinar las propiedades reológicas. Los datos de los fluidos se deben to-- mar antes que las mezclas sean hechas. Todas las mezclas deben guardarse has-- ta que la prueba se termine.

El volumen de fluidos requeridos para esta prueba son:

Lodo y lechada de cemento - 1000 ml de cada uno.

Bache - 2 000 ml.

Para lodos base aceite o baches base aceite, la prueba se realizará a la temperatu-- ra de fondo de circulación si es menor a los 120°F (49°C) propuestos.

Para lodos base agua, baches base agua y lechadas de cemento, las pruebas se -
deben llevar a cabo a una temperatura de 75°F.

Compatibilidad de mezcla de fluidos a alta temperatura.

La investigación de mezclas de fluidos a alta temperatura deberá incluir por--
centajes extremos de volumen, tales como:

5% de bache/95% de lodo o lechada y 95% de bache/5 % de lodo o lechada y mez--
clas de rangos medios, de las pruebas a baja temperatura que muestren una ten--
dencia de incompatibilidad, tabla III.1. En algunos casos una mezcla de flui--
dos en los rangos extremos, muestran un incremento significativo en la viscosi--
dad.

Para efectuar las pruebas anteriores, se seleccionará uno de los métodos si--
guientes:

a) Consistómetro Presurizado. Siguiendo la cédula apropiada, simulando las -
condiciones del pozo hasta alcanzar la temperatura de fondo de circulación fin--
nal.

b) Consistómetro de Presión Atmosférica. Este deberá utilizarse solamente --
para muestras que sean probadas a temperaturas menores a 194 °F (90°C). Se no
tará que la evaporación afecta el resultado final de la prueba.

Efecto de los baches en el tiempo bombeable. La prueba de tiempo bombeable en
la lechada contaminada con 5%, 25% y 50% de bache se compara con el tiempo bom--
beable de la lechada sin contaminar. La mezcla contaminada no deberá probarse
más allá del tiempo bombeable de la lechada sin contaminar, pero deberá repor--
tarse la consistencia con su respectivo tiempo.

Efecto de los baches en la resistencia a la compresión. Determinar la resis--
tencia a la compresión con 5% y 25% de bache y compararlo con muestras sin --
contaminar. Todas la muestras serán curadas a temperatura de fondo estática ó
a la temperatura apropiada de la cámara de curado y una prueba sónica del ce--
mento para la resistencia a la compresión.

TABLA III.1. Porcentaje de volúmenes para las mezclas de fluidos de pruebas de compatibilidad.

No. Prueba	% de volumen lodo/bacne o lech/bache	M E Z C L A S
1	95/5	760 ml de lodo o lechada/ 40 ml de -- bache.
2	75/25	100 ml bache más 375 ml del No.1
3	5/95	760 ml bache/10 ml de lodo o lechada
4	25/75	100 ml de lodo o lechada más 375 ml - del No.3.
5	50/50	Partes iguales de No.1 y No. 2
6	25 lodo/ 50 bache/ 25 lechada	Partes iguales de No.5/bache y No.5 - de bache/lechada.

En el campo solamente se llevan a cabo pruebas de compatibilidad de agitado de botella.

III.5. CALCULO DE VOLUMENES

Los volúmenes de los baches, espaciador o lavador, son recomendados por experiencia de campo y pruebas en laboratorio, estos volúmenes son suficientes para separar el lodo del pozo de la lechada y remover el lodo durante el desplazamiento.

Se tienen tres criterios para determinar los volúmenes de los baches, estos -- criterios son solo recomendaciones, los cuales deben ser flexibles y sobre todo se debe estudiar cada caso en particular y por supuesto que a diámetros -- grandes, se requieran mayores volúmenes.

Los criterios son los siguientes:

1. El volumen de bache debe ser tal que tenga una altura en el espacio anular de 500 a 800 pies (152 a 244 m), dependiendo de las condiciones del pozo y de la composición del fluido del pozo.

Si se desea cubrir una longitud " L_b " en el espacio anular, el volumen se determina por:

$$V_{b1} = C_{ea} L_b \quad (3.2)$$

V_{b1} = Volumen de bache en el espacio anular (l)

C_{ea} = Capacidad del espacio anular (l / m)

L_b = Longitud a cubrir con el bache (m)

donde:

$$C_{ea} = (D^2 - d^2) 0. 5067 \quad (3.3)$$

D = Diámetro interior de la T.R. o del agujero (pg)

d = Diámetro exterior de la T.P. (pg)

En el caso de que el tapón se coloque por método balanceado, se tiene que colocar un volumen del mismo bache dentro de la T.P., equivalente a una columna de longitud igual a la del bache que permanecerá en el espacio anular, en el momento en que el tapón de cemento haya sido colocado.

Por lo tanto, el volumen de bache dentro de la T.P. es:

$$V_{b2} = C_t L_b \quad (3.4)$$

V_{b2} = Volumen de bache dentro de la T.P. (l)

C_t = Capacidad de la T.P. (l/m)

Así el volumen total es:

$$V_{bt} = V_{b1} + V_{b2} \quad (3.5)$$

2. El segundo criterio se basa en que el bache lavador o espaciador tenga un tiempo de diez minutos en contacto con la formación durante el desplazamiento de los fluidos, el flujo del bache debe ser turbulento para que cumpla su objetivo.

En este caso se debe conocer en forma aproximada el gasto promedio de desplazamiento, así se podrá determinar el volumen de bache a utilizar.

$$V_{b1} = t Q \quad (3.6)$$

t = Tiempo de contacto del bache (10 min)

Q = Gasto promedio de desplazamiento (bl/min).

Igual que en el caso anterior, si el método utilizado es el del tapón balanceado, se tiene que calcular el volumen adicional.

EL volumen en el espacio anular de bache, equivale a una longitud de:

$$L_b = \frac{V_{b1}}{C_{ea}} \quad (3.7)$$

L_b = Longitud que cubre el bache en el espacio anular (m)

Volumen de bache dentro de la T.P. (fórmula 3.4)

$$V_{b2} = C_t L_b$$

EL volumen total (fórmula 3.5)

$$V_{bt} = V_{b1} + V_{b2}$$

3. Por último, se tiene un volumen fijo de bache, se recomienda 10 bl. EL volumen adicional para colocar el tapón por el método balanceado, se calcula con las fórmulas 3.4 y 3.7, y el volumen total con la fórmula 3.5.

C A P I T U L O I V

FACTORES QUE AFECTAN EL FRAGUADO DEL CEMENTO EN UN TAPON

IV.1. D I S E Ñ O I N A D E C U A D O

La lechada de cemento que ha sido diseñada y probada en el laboratorio dando los requerimientos, garantiza en parte que el proceso de fraguado se efectuará normalmente; sin embargo, la lechada probada con sus respectivos aditivos, es sólo parte de un conjunto de factores que afectan el fraguado de un tapón de cemento.

Como se dijo anteriormente, las pruebas de laboratorio se efectúan simulando las condiciones del pozo, por lo tanto, un diseño que en el laboratorio se comporte de manera normal puede variar su comportamiento en las condiciones reales, esto puede deberse a que se tomen condiciones que no son reales o que algún factor no se tome en cuenta, cuando se programa el diseño.

Cuando los parámetros no son los reales, los aditivos agregados al cemento no serán los adecuados o carecerá de algunos, esto trae como consecuencia problemas durante la colocación del tapón o en el proceso de fraguado, teniendo un fraguado prematuro o la falta de éste.

Los factores principales por los cuales un tapón de cemento no frague o frague prematuramente, son los siguientes:

COMPOSICION DEL CEMENTO. Ya que el cemento es el componente de que mayor cantidad se requiere, es importante conocer como afectan los demás aditivos el comportamiento de sus componentes.

El cemento contiene cuatro compuestos básicos y esenciales que son los siguientes:

Aluminato tricálcico	C ₃ A
Silicato tricálcico	C ₃ S
Silicato dicálcico	C ₂ S
Ferro-aluminato tetracálcico	C ₄ AF

Las propiedades del cemento, tales como el tiempo de fraguado, el desarrollo de la dureza y la resistencia a la acción química proveniente de fluidos externos, son afectadas por varios factores. Estos son: La proporción de los in--

redientes que lo componen, el tamaño de sus partículas, la cantidad de agua que se haya utilizado, la temperatura y presión bajo la cual se realizará el fraguado.

La reacción del cemento al agregársele agua a temperatura y presión atmosférica normales es diferente a la reacción que se produce bajo alta presión y temperatura. Como el proceso de hidratación varía con las condiciones del pozo y las propiedades físicas y químicas de cada cemento son variables, no es nada extraordinario que se produzcan diferencias substanciales en el fraguado del cemento.

Las variaciones de menor importancia pueden ser suficientes para alterar la respuesta esperada cuando se utilizan ciertos aditivos bajo una combinación específica de condiciones en el pozo. Uno de los principales factores que afectan el fraguado del cemento es la distribución del tamaño de sus partículas (granulometría). Si el cemento se ha molido tan finamente que sus partículas tienen menos de 7.5 micrones de diámetro, esta mayor área de superficie dará como resultado un fraguado más rápido, mayores resistencias iniciales, y algunas veces se requerirá de una mayor cantidad de aditivos para obtener resultados satisfactorios.

Los diversos compuestos que se forman por medio del proceso de hidratación constituyen el cemento fraguado. Ciertos compuestos desempeñan funciones muy específicas en cuanto a las propiedades de fraguado de la lechada.

Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , forman la mayor parte del cemento; por lo tanto, la mayor parte de la dureza que éste haya alcanzado en un periodo de siete días y la resistencia final que habrá de alcanzar el cemento fraguado son el resultado de la hidratación de los silicatos de calcio, para formar cristales de hidrato de silicato de calcio.

El aluminato tricálcico, C_3A , es en gran parte responsable del fraguado inicial, así como de los grados de resistencia iniciales, debido a su rápida hidratación. La concentración de C_3A es también un factor importante en el control al ataque por sulfatos.

La contribución del ferro-aluminato tetracálcico al fraguado del cemento varía con la temperatura y los aditivos que se hayan utilizado. Bajo ciertas condiciones, es similar a la reacción de C_3A .

La hidratación del cemento es una reacción exotérmica o se a que despidе calor. Cuando el cemento se solidifica en una área cerrada, tal como un pozo, donde el calor no puede ser rápidamente eliminado, se produce un apreciable aumento de temperatura.

TIEMPO DE ESPESAMIENTO. La retardación o aceleración del fraguado de las lechadas se logra mediante la introducción de productos químicos que alteran el proceso de hidratación que se produce cuando el cemento entra en contacto con el agua.

Se debe tener cuidado con el uso de los retardadores para asegurarse de que no interfieran demasaido con la dureza del cemento.

Los compuestos, tales como el cloruro de calcio y el cloruro de sodio generalmente son excelentes aceleradores. Cuando se agregan a la lechada de cemento, el incremento de carácter iónico de la fase acuosa hace que los principales -- compuestos del cemento seco, C_3S , C_2S y C_3A , se hidraten y liberen el hidróxido de calcio, que son los responsables de la resistencia del cemento.

Las celulosas, los lignosulfatos y los derivados del azúcar se utilizan ampliamente como retardadores. Aditivos como éstos inhiben la hidratación y la precipitación del hidróxido de calcio ya sea por medio de la formación de un complejo químico con los compuestos del cemento no hidratado o simplemente median te el cubrimiento de las partículas no hidratadas, impidiendo así su contacto con el agua.

El fraguado del cemento se acelera mediante ajustes en su composición, ajustes en el tamaño de sus partículas y también agregando un producto químico acelerador. La manera más efectiva de acelerar el fraguado del cemento es agregar un acelerador químico. Existen varios productos que producen la aceleración, sin embargo, los más útiles son el cloruro de calcio y el cloruro de sodio en bajas concentraciones.

Estas sales trabajan más o menos de la misma forma, aunque el cloruro de calcio es mejor como acelerador y promueve un rápido desarrollo de la resistencia.

El cloruro de calcio es siempre un acelerador, se recomienda de 2 a 3% por peso de cemento como concentración óptima. La utilización de un 10% por peso de cemento produce un fraguado instantáneo.

EL cloruro de sodio acelerará igualmente el desarrollo de la resistencia inicial del cemento, pero no lo logrará tan rápidamente como el cloruro de calcio. El cloruro de sodio hasta un 10% por peso de agua produce aceleración y las concentraciones entre 20% y el punto de saturación, produce retardación.

PORCENTAJES DE ADITIVOS NO ADECUADOS. Los aditivos agregados al cemento para -- darles las propiedades requeridas, cuando no son los adecuados, pueden traer -- efectos contrarios a los que se pretendían, ya sea por falta de algún aditivo o -- por exceso en el porcentaje.

En el caso de los aditivos para retardar el fraguado del cemento, se debe seleccionar el adecuado en base a las condiciones del pozo, principalmente la temperatura, ya que algunos retardadores permanecen estables hasta una determinada temperatura, debido a lo cual existen en el mercado retardadores para baja y alta temperatura.

Respecto a los porcentajes de aditivos a utilizar, es importante conocer los rangos recomendados por la literatura especializada ya que en el caso del cloruro de sodio, en concentraciones del 10% o menores por peso de agua, actúa como un acelerador, en concentraciones del 15 al 20%, no tiene efecto sobre el tiempo de espesamiento y el desarrollo de resistencia a la compresión, en cambio, en concentraciones mayores al 20%, funciona como un retardador.

Algunos retardadores como el ligno-sulfonato de calcio, es un retardador muy activo, ya que ligeros cambios en la concentración de éste en la lechada, causa -- cambios significativos en el tiempo de espesamiento con las variaciones resultantes en el desarrollo de la resistencia a la compresión. Este efecto es más notorio a temperaturas bajas.

Además se debe tomar en cuenta la compatibilidad de los aditivos entre sí, ya -- que entre ellos pueden existir reacciones adversas a las propiedades requeridas, también se debe considerar el agua que se utilice para la formación de la lechada.

IV.2. TIPOS DE BACHES Y VOLUMENES NO ADECUADOS

Los baches espaciador y/o lavador a utilizarse requieren cuidadosa selección para que cumplan con su objetivo. La selección óptima de estos baches depende del objetivo específico y de las condiciones del pozo. Los factores más importantes a considerar son:

Tipo de fluido de control: base agua, base aceite (emulsión inversa) y base polímeros.

Reología del fluido de control y de la lechada, presión hidrostática requerida para controlar el pozo.

Características de la formación: zonas sensibles al agua (lutitas, arcillas), zonas fácilmente fracturables o con pérdida de circulación; formaciones con alta permeabilidad; flujos de agua salada o con aportación de hidrocarburos.

Propiedades deseadas de los baches: flujo turbulento con bajos gastos; estabilidad en la suspensión de sólidos a condiciones estáticas.

Aún cuando se hayan tomado en cuenta los factores arriba mencionados en la selección de los baches, cuando alguno no es real o no se determina lo mejor posible, pueden ocurrir los siguientes problemas:

INCOMPATIBILIDAD. Esta incompatibilidad puede existir entre el bache y la lechada, bache y lodo o entre baches en el caso de utilizar bache lavador.

Ya que el objetivo principal del bache espaciador es el de evitar el contacto de la lechada con el fluido de control del pozó, éste debe ser compatible con ambos y el contacto debe evitarse durante toda la operación para evitar la canalización de la lechada en el lodo.

La utilización de baches lavadores, en los casos que se requiera, se les debe realizar pruebas de compatibilidad con el bache espaciador y con el lodo. En los baches lavadores químicos, se debe tener cuidado con los surfactantes que se utilizan, ya que algunos se degradan a determinadas temperaturas.

Los problemas de incompatibilidad pueden evitarse realizando las pruebas propuestas por el API, así se evita que los baches constituyan un problema y cumplan con su objetivo.

FALTA DE ESTABILIDAD. Como se dijo anteriormente, los baches en general están compuestos de fluidos base agua, base aceite (diesel) y aditivos. Algunos de éstos son estables hasta una temperatura específica.

Por tal motivo, las condiciones de presión y temperatura del pozo se deben determinar lo mejor posible, y en el caso de la temperatura, se recomienda utilizar la temperatura estática ya que es la condición más crítica en pozos de rápida recuperación térmica.

Si las condiciones de presión y temperatura no son los correctos, los aditivos seleccionados no serán los adecuados, por lo que algunos se pueden degradar, ocasionando que los baches pierdan sus propiedades reológicas y la colocación del tapón de cemento no se efectúe en las condiciones óptimas, por lo tanto su frágido se verá afectado.

FALTA DE DENSIDAD Y VISCOSIDAD. la densidad, la viscosidad y el gel de los baches espaciadores, deben ser mayores sus valores que los del lodo y menores que los del cemento, sin embargo estas propiedades pueden verse afectadas en los baches durante el proceso de desplazamiento.

Cuando se tienen condiciones como zonas con alta permeabilidad o con fracturas, las propiedades reológicas pueden verse afectadas debido a la pérdida de fluido de los baches, ocasionando que pierdan su poder de suspensión (gel) y su viscosidad se vea incrementada.

Como se sabe, estos baches contienen sólidos en suspensión, los cuales pueden precipitarse cuando las propiedades reológicas del bache cambien, ya sea por deshidratación o por inestabilidad de alguno de sus componentes.

Con respecto a los baches lavadores químicos, estos deben ser lo más fluidos que se pueda para poder cumplir con su objetivo, pero si se tienen problemas de pérdida de fluido, difícilmente lo logrará, ya que el bache se vuelve más viscoso y no podrá alcanzar el flujo turbulento con gastos razonables de bombeo como fue

diseñado. Como consecuencia las paredes del pozo no se limpiarán, esto posteriormente se refleja en un tapón sin consistencia.

VOLUMENES DE BACHES NO SUFICIENTES. La posibilidad de que se mezcle el lodo con el cemento, siempre existe, durante el bombeo y el desplazamiento. Tal contaminación puede resultar en: tiempos acelerados o retardados de bombeabilidad, reducida resistencia a la compresión del cemento, mala adherencia del cemento, incremento en la pérdida de fluido y con lodos de emulsión inversa, la mezcla puede resultar imbombeable.

Pruebas de laboratorio muestran que los productos químicos inorgánicos tienen un efecto errático en los cementos, que generalmente tienden a acelerar el fraguado; el efecto depende de la concentración. Los productos químicos orgánicos generalmente retardan y pueden inhibir completamente el fraguado del cemento.

Para prevenir los problemas antes descritos de contacto lodo lechadas, lo mejor es minimizar el contacto. Por lo tanto, se recurre a tapones de hule y a la utilización de baches (lavadores y espaciadores).

Para que los baches cumplan con su objetivo, debe diseñarse y calcularse los volúmenes adecuados, de acuerdo a las condiciones particulares de cada operación. Existen volúmenes recomendados, que han sido determinados por experiencias de campo y por pruebas de laboratorio, los cuales son los siguientes:

- Un volumen equivalente a 150 m como mínimo, de longitud en el espacio anular.
- Un tiempo de contacto mínimo de 10 minutos del bache en la zona de interés.

Sin embargo, si las condiciones del pozo son muy críticas, estos volúmenes deben ser mayores.

Cuando las condiciones del pozo son de alta presión, la utilización de baches -- lavadores se tiene que deshechar, debido a que a su baja densidad no podrán contrarrestar la presión de formación.

Cuando la colocación del tapón de cemento se lleve a cabo por el método balanceado, se debe considerar el volumen de bache que quedará dentro de la tubería de desplazamiento.

La determinación de los volúmenes óptimos de los baches, deberán basarse siempre en un registro de calibración del agujero.

IV.3 ACONDICIONAMIENTO DEL POZO

Las causas por las cuales un tapón de cemento no se coloque con éxito, se debe a dos factores fundamentales respecto al acondicionamiento del pozo, los cuales son:

REMOCION DEL ENJARRE. Todos los fluidos de perforación desarrollan una capa de lodo en las paredes del agujero denominada enjarre, el cual se presentará principalmente en aquellas formaciones que son altamente permeables.

Este enjarre en la colocación de un tapón de cemento causa problemas de adherencia del cemento con la formación y es más crítico cuando se tienen fluidos de perforación con un alto tratamiento químico, debido a problemas durante la perforación.

Por tal motivo el pozo se debe acondicionar para efectuar la operación, en caso de que exista cualquier otro problema como pérdida de circulación o flujos, es recomendable que éstos sean tratados y solucionados y posteriormente continuar con la colocación del tapón de cemento.

Cuando se tienen lodos con alta pérdida de fluido, se forma un enjarre de espesor considerable, se pueden utilizar elementos mecánicos, diseñados para remover el enjarre, como son los raspadores, y mejorar la superficie de adherencia del cemento directamente a la formación.

Esta operación afecta positivamente la colocación del tapón, pero se debe tener cuidado, ya que si la eliminación del enjarre se logra en su totalidad, podría ocasionar pérdida de circulación u otros problemas relacionados con la deshidratación del cemento.

Generalmente los lodos con pérdida de fluido muy bajo producen un enjarre delgado, el cual, con la utilización del bache lavador adecuado será suficiente para removerlo.

ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE CONTROL. El fluido de control que se tenga en el pozo debe tener sus propiedades reológicas en buenas condiciones y ser homogéneas en todo el sistema.

Generalmente se toman muestras del fluido de control a la entrada del pozo (presa de succión) y a la salida de ésta (presa de recolección) para determinar sus propiedades. Los valores de las propiedades obtenidas no deben variar, los de entrada de los de la salida, en caso contrario, el fluido debe ser acondicionado hasta que las propiedades sean homogéneas.

Para acondicionar el fluido de control se recomienda se circule como mínimo un ciclo, para asegurar que los sólidos que se encuentren en el fondo salgan a la superficie y para remover cualquier cantidad de gas que se tenga.

Se debe tener en cuenta que un exceso en el tiempo de circulación, puede traer efectos contrarios a los esperados, ya que puede erosionar zonas poco consolidadas como son las arenas, debido al constante flujo.

IV.4. CONDICIONES REOLOGICAS DEL FLUIDO DE CONTROL

El fluido de control debe tener las propiedades reológicas óptimas de ser posible, éstas dependen del tipo de fluido base que se tenga (agua, aceite o polímeros) y de las condiciones del pozo.

Las propiedades del fluido de control que pueden conducir a malos trabajos de colocación de tapones son: altos esfuerzos gel, alta viscosidad, alta densidad y excesivo contenido de sólidos.

Bajo ciertos límites bien definidos de presión de fondo del pozo, puede ser deseable bajar la densidad, conjuntamente con el esfuerzo gel y la viscosidad, cerca del límite mínimo de presión de fondo del pozo, esto mejoraría la eficiencia de desplazamiento y una mejor remoción del enjarre.

El alto contenido de sólidos puede ser tratado con los métodos, químicos o mecánicos, ya que además es una forma de controlar la densidad del fluido. De ser posible, la utilización de un dispersante químico orgánico ayudará a obtener buenas propiedades reológicas.

Se debe tomar en cuenta, que las propiedades reológicas del fluido de control con que se solicitó el diseño de la lechada, deberán ser las mismas al momento de -- efectuar la operación. Si existe gran diferencia entre los valores de densidad de la lechada y el fluido de control, se puede presentar el problema de que el tapón, una vez colocado, se deslice hacia abajo, y se contamine.

En pozos donde se tengan que colocar tapones de abandono y se tenga fluido de baja densidad, la operación debe efectuarse a preventor cerrado y con el pozo estrangulado. Así, se contrarresta la presión diferencial a causa de la gran diferencia de densidades.

IV.5. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

Durante la operación de colocación de tapones, existen muchos factores por los cuales el fraguado del cemento no se lleve a cabo en condiciones normales, sin embargo, existen otros factores previos a la operación y posteriores a ésta que deben ser considerados.

Se describen a continuación los siguientes:

EQUIPO Y MATERIAL PARA EFECTUAR LA OPERACION. Antes de efectuar la operación se debe verificar que exista el equipo que se utilizará y que esté conectado adecuadamente a las conexiones del pozo, en el caso de la unidad de alta presión que se utilice para desplazar, se debe conectar por los dos accesos al pozo (T.P. y T.R.), por si es necesario circular en inverso (fig. IV.1)

Así, una vez instalado el equipo, se deben probar sus conexiones con una presión mayor a la que se espera utilizar durante la operación.

El equipo que se encuentra en el pozo (perforación o reparación) deberá probarse el funcionamiento adecuado de sus bombas, malacate y mesa rotatoria, así como -- las conexiones de suministro de agua y lodo.

Por lo que respecta al material, se debe verificar que se encuentre en la localización el cemento, con la descripción de los aditivos agregados, los datos de rendimientos, requerimiento de agua, densidad y tiempo bombeable, y que sean -- iguales a los del diseño solicitado.

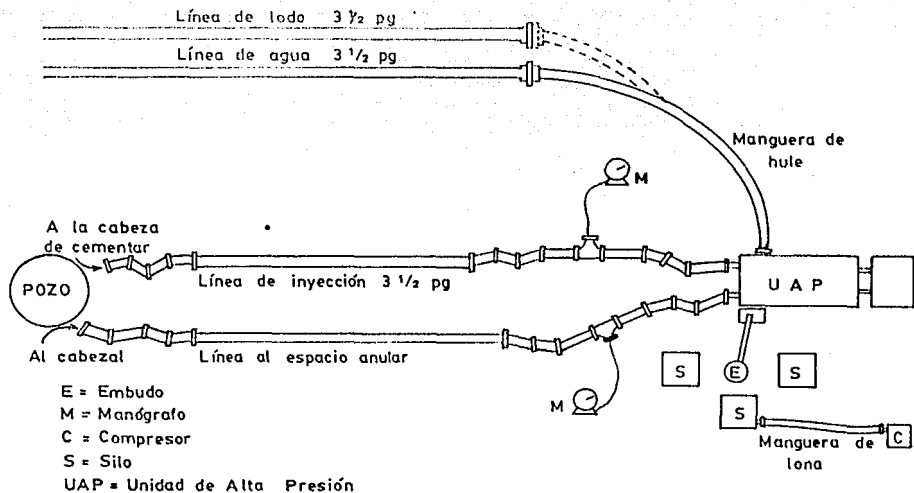


Fig.IV.1... Instalación de líneas superficiales para colocar Tapones por Circulación.

EL fluido que se ocupe para desplazar el tapón de cemento, así como el agua de mezcla, exista en cantidad suficiente.

Si se utilizarán baches, que sean los solicitados con sus respectivas propiedades, si alguno de éstos (lavador o espaciador) se debe preparar en la localización, verificar que se prepare según las recomendaciones del proveedor, posteriormente realizar pruebas de compatibilidad con el fluido de control y la lechada de cemento.

EJECUCION DE LA OPERACION. Con el equipo instalado y probado, se debe verificar la profundidad a donde se encuentra el extremo de la tubería así como el peso en el indicador del equipo.

Una vez que los cálculos de la operación fueron ya realizados, se debe elaborar un programa operativo, mismo que se debe dar a conocer al personal indicado para que la operación tenga un mejor desarrollo.

Uno de los problemas que se tienen en esta etapa, es la de obtener la densidad de la lechada programada. Cuando se utiliza el mezclador "Jet" para mezclar el cemento con agua, es difícil obtener la densidad de la lechada, ya que el mezclador está directamente conectado a la línea de bombeo que va al pozo, por lo que el cemento una vez mezclado se va directamente al pozo.

El problema radica en que normalmente son volúmenes pequeños los que se manejan en los tapones de cemento, y por otra parte la determinación de la densidad de la lechada utilizando la balanza de lodos es lenta. Esto hace que el operador no tenga el tiempo suficiente para ajustar el gasto de agua de mezclado.

Esto trae como consecuencia que las propiedades de la lechada no sean homogéneas y que existan anillos de cemento con un contenido de agua menor o mayor al diseñado.

Para tener un mejor control sobre la densidad, se recomienda el uso de un recirculador, en el cual una vez que el cemento ha sido mezclado, se recircula, dando le homogeneidad y ajustar el valor de la densidad de la lechada si es necesario. Posteriormente se bombea al pozo.

Una vez que se inicia el mezclado del cemento, se debe apuntar la hora, esto es importante para tener un control sobre el tiempo bombeable de la lechada.

GASTO DE DESPLAZAMIENTO. Los patrones de flujo tapón y turbulento tienen aproximadamente el mismo frente de avance plano. Estos tipos de perfiles, comparados con el perfil de flujo laminar, establecerán un mayor contacto con el fluido de perforación durante el desplazamiento. Esto da por resultado una óptima remoción del fluido de perforación, una reducida canalización del cemento y una mejor adherencia del cemento a la formación.

El patrón de flujo aceptado para el desplazamiento del fluido de perforación es el turbulento. Como se mencionó anteriormente existen condiciones en que no es posible utilizar el flujo turbulento, en estos casos se recomienda más el régimen de flujo tapón que el laminar. El régimen de flujo tapón en combinación con un mayor esfuerzo gel y densidad del cemento que del fluido de perforación, facilitará el desplazamiento del lodo.

El efecto de la densidad y resistencia del gel de la lechada de cemento se aprecia en la fig. IV.2.

Durante el desplazamiento de los baches y la lechada, se debe rotar la tubería, esto se hace para que cuando la lechada llegue al fondo, mediante el movimiento, se homogenice la lechada, la tubería se debe rotar entre 20 y 30 rpm.

Al término del desplazamiento del tapón de cemento a la profundidad programada, si éste fué colocado por el método balanceado, un indicador de que no existe --- descompensación de columnas es, que la presión final en superficie sea igual a cero ($P_f = 0$). Se procede entonces a sacar la tubería lentamente para no provocar turbulencia o desequilibrar las columnas.

PRUEBA DEL TAPON DE CEMENTO. El tiempo que se le debe de dar al tapón de cemento para que frague, debe ser el óptimo ya que tiempos excesivos retardan las operaciones posteriores y tiempos pequeños pueden interrumpir el proceso de fraguado.

La cima del tapón se debe checar con barrena o con tubería franca. En el caso en que el tiempo de fraguado resulte mayor al que fué programado, se corre el --

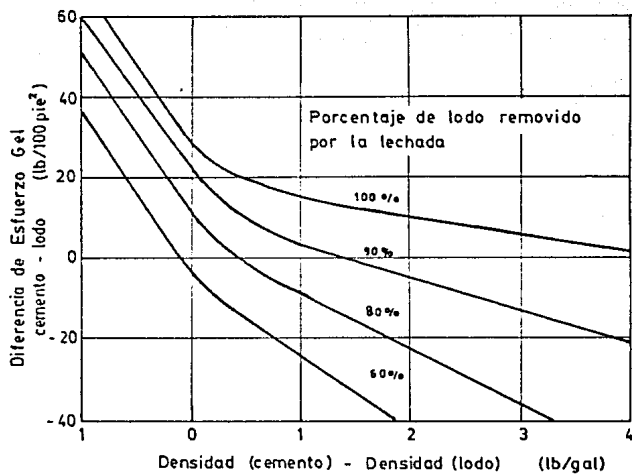


Fig.1V.2._ Efecto combinado de las diferencias de densidad y esfuerzo gel en un régimen de flujo tapón.

riesgo que al intentar checar la cima del tapón, la tubería quede atrapada en el cemento, por lo que, cuando exista duda en el tiempo de fraguado requerido se debe circular y observar en la superficie el material que desaloja el pozo.

Para probar la resistencia del tapón, éste se prueba con presión y peso, cuando se trata de tapones para desviar, la velocidad con que es rebajado el tapón será indicativo de su resistencia. Para los demás tapones, sólo se prueban con presión y peso.

RECOMENDACIONES. Durante la colocación de tapones, es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones.

Verificar las características de la tubería que se esté usando dentro del pozo; diámetros, peso, capacidad, y longitud de toda la sarta.

El fluido de control siempre deberá estar homogéneo en sus propiedades, tanto -- dentro del pozo como en las presas.

Verificar que el conjunto de preventores opere satisfactoriamente.

Comprobar que la potencia del malacate para mover la sarta de tubería sea confiable y que las bombas del equipo operen satisfactoriamente.

Revisar que el fluido de control contenido en las presas sea como mínimo el 70% de la capacidad del pozo; si no es así, preparar la cantidad faltante.

Verificar que exista suficiente agua natural.

Utilizar baches separadores cuando el fluido de control no sea agua, verificando al efectuar el cálculo, que éstos cubran como mínimo 150 m de longitud en el espacio anular y en T.P.

Verificar en las boletas que el cemento a utilizarse sea el diseñado y que se especificquen sus características como: cantidad de aditivo, densidad, rendimiento, agua requerida y tiempo bombeable.

Probar la unidad de bombeo y sus conexiones superficiales con presión.

Coordinar con el personal que interviene en la operación el programa de la misma, con el propósito de obtener una participación efectiva de cada uno de ellos -- (reunión de planeación y seguridad).

La operación debe de terminarse antes que el tiempo bombeable se rebase.

Con el fin de efectuar un análisis de propiedades al cemento, recuperar tres -- muestras.

Verificar que la densidad de la lechada al estarla preparando, sea homogénea y que el bombeo sea continuo.

C A P I T U L O V

METODOS DE COLOCACION

V.1. M E T O D O S E X P E R I M E N T A L E S

Debido a las constantes fallas en la colocación de tapones de cemento, particularmente en los utilizados para desviar pozos, se han efectuado numerosas investigaciones para determinar las causas.

En un artículo publicado por R.M. Beirute*, investigó el comportamiento de un tapón de cemento líquido después de dejarlo en el pozo. Por medio de experimentos de laboratorio y un modelo matemático, demostró que las lechadas de cemento pesadas, colocadas encima de lodos ligeros, forman interfases inestables, las cuales, debido a las fuerzas gravitacionales adversas, pueden originar el flujo de fluidos, contaminando el tapón o haciendo que éste se mueva hacia abajo ocasionando la falla de la operación. Sus observaciones, cuando estaba realizando los experimentos, concuerdan bastante bien con las descripciones de fallas de tapones de cemento reportadas en el campo en esta zona.

Se diseñaron una serie de experimentos para investigar el fenómeno de la estabilidad de los tapones de cemento dentro del pozo. La idea era determinar si éste -- era el principal factor que contribuía a las fallas, particularmente cuando se -- colocaban tapones por el método balanceado, sin el uso de un tapón puente o cualquier otra forma de soporte abajo del tapón. Si se encontraba que la inestabilidad del tapón era también una causa seria de la falla, el objetivo de la investigación era encontrar las formas de controlar el problema.

Partiendo de la problemática de la inestabilidad de los tapones de cemento dentro del pozo, se presentan dos métodos experimentales, llevados a cabo por diferentes investigadores.

USO DE UN BACHE VISCOSO DE BENTONITA Y HERRAMIENTA DESVIADORA DE FLUJO.

TRABAJO EXPERIMENTAL. Los experimentos se realizaron simulando un pozo, construido de tubos de lucita transparente, de aproximadamente 18 pg (46 cm) de largo y 1.75 pg (4.4 cm) de diámetro interior, como se muestra en la fig. V.1.

* "Flow behavior of an Unset
Cement Plug in Place"
SPE 7589, 1978.

Para simular la tubería de perforación (T.P.) se usó tubería de cobre, de 0.5 -
pg (1.3 cm) de diámetro.

El lodo de perforación y las lechadas de cemento que se usaron en los experimentos, se mezclaron en la forma más parecida a la que se emplea en el campo. Se usó un lodo de perforación con bajo contenido de sólidos, no dispersos (BCSND) - de 9.0 lb/gal (1.08 gr/cm³), en los experimentos. Se escogió éste, debido a que proporciona la mayor diferencia de densidad entre la lechada y el lodo de perforación. Esta diferencia se tiene en la mayoría de las situaciones en la colocación de tapones. En la tabla V.8, se proporciona una lista de los fluidos utilizados en los experimentos.

Los experimentos iniciales se realizaron para simular lo más real posible las técnicas de colocación. Comúnmente bajo operaciones normales de campo, el lodo se acondiciona y se bombea una lechada de cemento a través de la tubería franca, retornando por el espacio anular. La densidad del cemento es algunas veces de 6 a 7 lb/gal (0.72 a 0.84 gr/cm³) mayor que la del lodo del pozo. En la fig. V.2 se muestra un esquema ideal de la colocación de un tapón, la tubería centrada en el agujero, los fluidos regresando por el espacio anular, una colocación uniforme del cemento y del bache espaciador en el espacio anular y muy poca perturbación abajo de la tubería.

La primera serie de experimentos, utilizando tubería franca para colocar el cemento y el bache, dió resultados completamente diferentes a los que se muestran en la fig. V.2.

La fig. V.3, muestra un esquema más realista de los que se observó en el laboratorio y se cree que ocurre en el campo. Esta figura muestra: la tubería hacia un lado del pozo; una gran parte del tapón de cemento canalizándose hacia el fondo del pozo a través del lodo; y el lodo más ligero, desplazándose hacia arriba por el espacio anular.

El autor R. M. Bairute, notó que la estabilidad de la interfase entre la lechada y el lodo, era fundamental para el éxito del trabajo. También destacó que, aún en los casos en los que la interfase se comportaba de manera estable, las perturbaciones, tales como el movimiento del modelo de prueba o la filtración de gas a la interfase, podría iniciar el flujo de fluidos hacia dicha interfase. Sus --

experimentos se llevaron a cabo mediante una colocación cuidadosa del fluido pesado en la parte superior del ligero; observando después el comportamiento del flujo. Los experimentos fueron más allá. Como se ha indicado, los fluidos en realidad eran desplazados hacia abajo del aparato de prueba.

Utilizando una tubería de perforación o de producción simulada, se observó que la agitación creada por la lechada, al ser desplazada a través de la tubería de perforación franca simulada, era con frecuencia suficiente para iniciar el flujo, aún antes de que se terminara de colocar completamente el tapón (ver fig. V.3). En otras palabras, la tendencia de los fluidos a fluir, cuando se colocan tapones, era un factor de control de mayor importancia que la que se le había dado originalmente.

Así, el problema no era solo el control de la estabilidad de la interfase después de que el tapón se ha colocado, sino el ser capaces de colocar el tapón en el pozo sin perderlo durante la operación. Se investigaron dos propuestas: una, sobre el uso de bache viscoso de bentonita, con el fin de crear un apoyo para la lechada, y la otra, relacionada con el uso de una herramienta desviadora de flujo, al final de la tubería, para cambiar la dirección de flujo de los fluidos; de vertical y hacia abajo a horizontal y hacia arriba.

Cuando se utilizó el bache de bentonita adelante de la lechada, el procedimiento de colocación fué como se muestra en la fig. V.4. Primero la columna de bentonita se coloca abajo del punto donde se colocaría el tapón de cemento. Posteriormente, se levanta la T.P. hasta la parte superior del bache de bentonita (que será el punto donde se localizará el fondo del tapón de cemento), y posteriormente se colocó la lechada a través de la T.P. franca. Se observó que se podía obtener un tapón débil o regular cuando se usaban lechadas de baja densidad, sólo si se tenía cuidados extremos al colocar el bache de bentonita y la lechada de cemento.

Las lechadas de cemento de mayor densidad, que podían utilizarse para obtener un tapón regular, era de 11.8 lb/gal (1.42 gr/cm³). Todas las lechadas con densidad mayores a ésta, se diluían en el lodo y se canalizaban hacia el fondo del cilindro de prueba (fig. V.3). Para obtener un tapón estable con tubería franca, la lechada y el bache de bentonita debían bombearse lentamente y colocarse uniformemente en el cilindro, rotando la tubería mientras se estaba bombeando.

En la mayoría de los experimentos, el bache de bentonita no tendía a caer al fondo, debido a que su densidad era muy parecida a la del lodo.

Por otra parte, el bache de bentonita con frecuencia se canalizaba hacia arriba, a través del lodo y no tenía contacto con las paredes de todo el cilindro. En esos casos, a medida que se colocaba el cemento, éste se canalizaba hacia abajo casi instantáneamente a través de los huecos dejados por el fluido ascendente de la columna, desplazando hacia arriba del espacio anular, al lodo de perforación más ligero y menos viscoso. Las lechadas de cemento de mayor densidad que se probaron (mayores de 13.8 lb/gal) también penetraban el bache de bentonita desplazando parte de éste junto con lodo de perforación hacia arriba del espacio anular.

En una segunda serie de experimentos se utilizó una herramienta desviadora de flujo al final de la tubería para colocar el bache de bentonita y la lechada de cemento. La fig. V.5 es un esquema del diseño que se sugiere para la construcción de la herramienta desviadora. Esta se diseñó con el propósito de cambiar la dirección del flujo de los fluidos. Los resultados de estos experimentos mostraron un aumento considerable en la estabilidad y calidad del tapón de cemento. El bache espaciador de bentonita y la lechada de cemento se distribuyeron más uniformemente en el cilindro y permanecieron mucho más estables durante y después de la colocación. Con el uso de la herramienta desviadora de flujo y el bache viscoso de bentonita, se pudieron colocar buenos tapones de cemento de 15.8 lb/gal. (1.90 gr/cm^3) y tapones regulares de 17.5 lb/gal (2.10 gr/cm^3) en lodo de 9.0 lb/gal (1.08 gr/cm^3) fig. V.6.

En la última serie de experimentos se utilizó la herramienta desviadora, pero no el bache de bentonita. Los resultados de tales experimentos verificaron la importancia de la herramienta desviadora de flujo para crear una interfase estable lodo-cemento y para proporcionar una distribución uniforme de los fluidos en el interior del pozo. Se obtuvieron tapones de cemento satisfactorios con lechadas de 13.8 lb/gal (1.66 gr/cm^3) y más ligeras. Los intentos con lechadas de 14.8 lb/gal (1.78 gr/cm^3) fueron originalmente estables, pero al poco tiempo ésta se canalizaba lentamente hacia el fondo del cilindro. Lo mismo ocurrió con lechadas de mayor densidad a la de 14.8 lb/gal.

Los resultados de estos experimentos indican que el uso de la herramienta desviadora de flujo y de un bache viscoso de bentonita, podrían incrementar enormemente las posibilidades de obtener buenos tapones de cemento. La fig. V.7, muestra la forma correcta en que se recomienda usar la herramienta desviadora para colocar el bache viscoso de bentonita y la lechada de cemento. Como se indicó anteriormente, el bache de bentonita debe colocarse de manera similar a la lechada de cemento, con su extremo superior en el punto donde se desea que quede el fondo del tapón de cemento. La tubería se levantará hasta justo la cima del bache de bentonita para colocar la lechada de cemento. Debe usarse el método del tapón balanceado.

BACHE VISCOSO DE BENTONITA. El bache de bentonita puede prepararse en el campo, adicionando bentonita a una porción de fluido de perforación existente, para hacerlo más viscoso y darle mayor gel. El bache de bentonita debe ser lo más viscoso posible, pero debe permanecer bombeable. La cantidad máxima de bentonita que puede tolerar un lodo, bajo en sólidos no dispersos, en promedio es de 25 a 30 lb/bl (71 a 86 kg/m³) en total. En los experimentos se adicionaron 15 lb/bl (43 kg/m³) de bentonita para preparar un bache con una viscosidad plástica de 61.0 cp y un punto de cedencia de 125.0 lb/100 pie², como se muestra en la tabla V.8. Para aplicaciones en el campo se recomienda el uso de un volumen suficiente para formar un apoyo que tenga la misma longitud que la que tendrá el tapón de cemento.

HERRAMIENTA DESVIADORA DE FLUJO. Esta herramienta fuerza el flujo de los fluidos hacia la pared del pozo. Esto permite una colocación más uniforme del bache de bentonita y de la lechada de cemento en el pozo. Además, esta acción reduce la canalización y ayuda a la limpieza del pozo, gracias a su acción limpiadora. Con la reducción de la canalización de la lechada, se puede obtener un tapón más resistente y de mejor calidad.

Es posible construir una herramienta desviadora de flujo simplificada, tapcando el extremo inferior de la tubería de producción o de perforación y luego perforar de 6 a 8 agujeros de 0.75 a 1.0 pg, en los costados del tubo.

Si se construye así la herramienta, se recomienda que se perforen los agujeros suficientes para crear la misma área de flujo que el área del interior del tubo.

CEMENTOS DISPERSOS. Una de las recomendaciones originales de Beirut*, fué reducir el uso de dispersantes en las lechadas de cemento para tapones. Durante los experimentos, él notó que las lechadas mezcladas con dispersantes parecían tener una mayor tendencia a canalizarse y diluirse con el lodo, comparadas con aquellas que no tenían dispersantes. Las lechadas con dispersantes tenían consistencias y viscosidades menores, lo que asociado con la alta diferencia de densidades entre el lodo y el cemento, provocaba que la estabilización del tapón fuera más difícil. En general, mientras más cercana sea la densidad de la lechada de cemento a la del lodo, más estable será el tapón. De igual forma, se cree que los aditivos que hacen a la lechada más susceptible a la dilución o adelgazamiento, harán más difícil la estabilización del tapón.

CONCLUSIONES.

1. Los experimentos descritos en este trabajo verificaron que la interfase entre un tapón de cemento líquido denso que descansa en la parte superior de un lodo de baja densidad, puede ser bastante inestable y por lo tanto, esta inestabilidad es un factor determinante en la colocación de tapones.
2. La agitación física provocada por el uso de una tubería franca para colocar un tapón de cemento, es suficiente para generar una interfase inestable entre el cemento y el lodo de perforación, reduciendo la posibilidad de que el tapón permanezca en el lugar deseado, sin importar la diferencia de densidades entre el lodo y el cemento. Esta conclusión se basa en los resultados que se obtuvieron de un modelo del pozo sin escala.
3. De los experimentos realizados, se encontró que el uso del bache con la adición de bentonita por sí mismo, sin la herramienta desviadora de flujo, no fué generalmente efectivo.
4. La colocación del bache viscoso de bentonita y el tapón de cemento, por medio de la herramienta desviadora de flujo colocada en el extremo de la tubería, incrementó la estabilidad del tapón durante y después de su colocación, permitiendo una máxima diferencia de densidades, del cemento sobre el lodo, de 6.8 -- lb/gal (0.82 gr/cm^3).

5. La colocación del tapón de cemento por medio de la herramienta desviadora de flujo, sin el uso del bache viscoso de bentonita, dio como resultado la obtención de un buen tapón de cemento para una diferencia de densidades entre el cemento y el lodo, de 4.8 lb/gal (0.56 gr/cm^3).

6. Las lechadas de cemento con dispersantes, parecen más susceptibles a la dilución y a la inestabilidad (contaminación lodo-cemento).

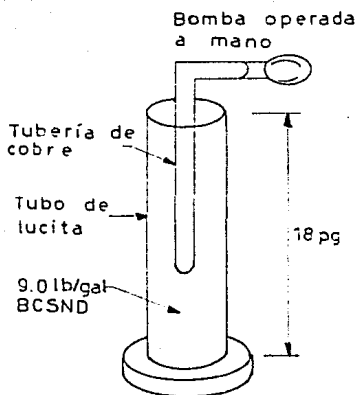


Fig.V.1._Aparato de prueba.

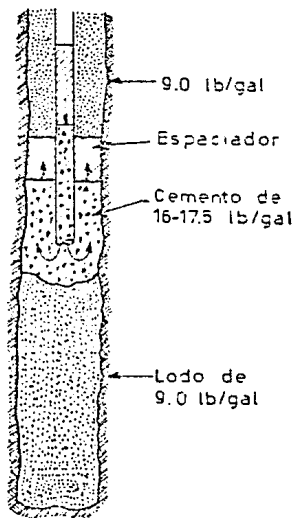


Fig.V.2._Caso ideal.

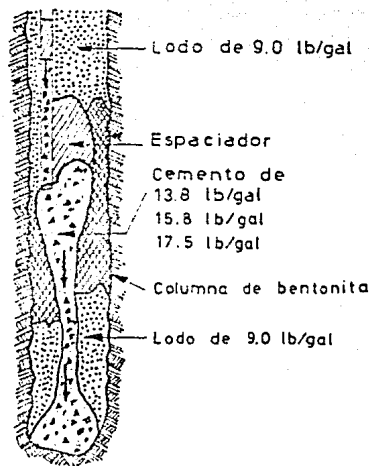


Fig.V.3._ Resultado experimental de una interfase inestable.

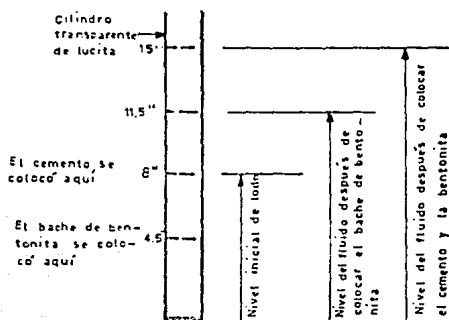


Fig.V.4._ Procedimiento de colocación del tapón.

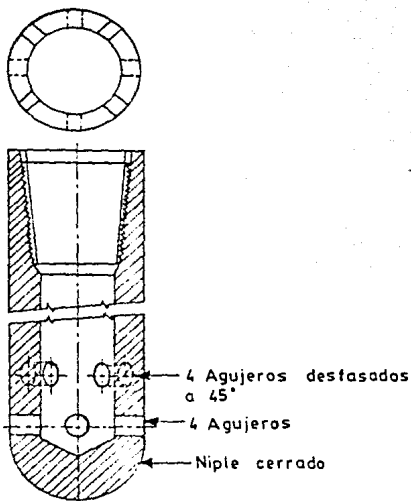


Fig.V.5.- Herramienta desviadora.

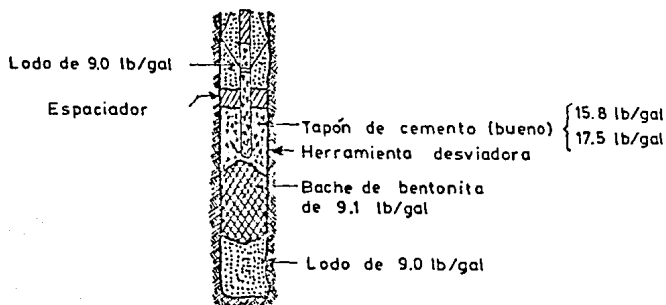


Fig.V.6.- Resultados experimentales.

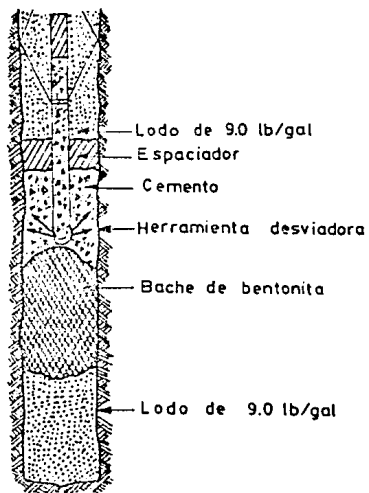


Fig.V.7.- Técnica recomendada.

TABLA NO. V.8.- PROPIEDADES REOLOGICAS DE LOS FLUIDOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS.

FLUIDO	MATERIAL	DISP. DE										CONSIST.		
		DENSIDAD lb/gal	CEMENTO (%)	ESF. GEL 10 seg.	A 3 RPM 10 min.	LECTURA DEL			VISCOSIMETRO			A 20 min. lb. (Newtons)		
					600	300	200	100	6	3	VP	Pc		
1	Lodo BCSND*	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--
2	Bache 1, 10 lb/bl	9.1		25	60	105	77	--	--	--	--	28	49	--
3	Bache 2, 15 lb/bl	9.1		80	122	247	186	--	--	--	--	61	25	--
4	Bache 3, 18 lb/bl	9.2		150	ME**	345	265	--	--	--	--	80	185	--
5	Clase G, 30% de H ₂ O	17.5	1.25			201	101	65	31	1	1	100	1	5
6	Clase G, 44% de H ₂ O	15.8	0			115	74	62	49	18	11	41	33	6
7	Cemento G. aerado	13.8	0			166	107	84	64	20	11	63	40	7
8	Cemento G. aerado	11.8	0			207	135	205	75	18	11	72	63	9
9	Clase G, 30% H ₂ O	17.5	0.75			230	119	85	47	5	4	111	8	8
10	Clase G, 44% H ₂ O	15.8	0	13		124	83	71	55	19	12	41	42	
11	Clase G, 38% H ₂ O	16.4	0	15		217	162	130	100	29	19	55	107	
12	Cemento G. aerado	14.8	0	12		154	119	100	82	12	14	35	84	10
1	Lodo BCSND	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--
1	Lodo BCSND	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--
1	Lodo BCSND	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--
1	Lodo BCSND	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--

* Bajo Contenido en Sólidos no dispersos

** Muy espeso.

USO DE UN SISTEMA DE FLUIDO REACTIVO (SFR) Y HERRAMIENTA DESVIADORA.

La característica importante de este método para colocar tapones, es un sistema de fluido reactivo (SFR), que contiene un componente químico que reacciona con salmuera de cloruro de calcio creando la formación rápida de gel. Este gel posteriormente servirá como un puente, sobre el que la lechada de cemento permanecerá hasta que sea lo suficientemente resistente para soportarse por sí mismo. Además de reaccionar el SFR con salmuera de cloruro de calcio, también reacciona, formando gel, al contacto con la lechada de cemento. Así, cualquier residuo de SFR que no reaccionó con la salmuera, lo hará con la lechada de cemento, incrementando la estabilidad del tapón.

TRABAJO EXPERIMENTAL. El equipo utilizado para efectuar las pruebas consta de: un tubo de acrílico de 3.75 pg de diámetro interior (simula el pozo), tubo de acrílico de 1 pg (simula la T.P.), tubo de descarga, para los propósitos de circulación, recipientes para los diferentes fluidos utilizados en las pruebas y una bomba (fig. V.9). Las pruebas se realizaron circulando fluidos de pozo, bombeado algunos baches espaciadores y alguna otra solución química como salmuera y diesel, y posteriormente se desplazó la lechada de cemento a su lugar correspondiente.

Durante y después de la operación, se hicieron observaciones visuales de lo que ocurrió en el modelo. En algunos casos, los fluidos fueron coloreados para hacer notar los efectos y hacer posible distinguir el comportamiento del flujo durante las pruebas.

RESULTADOS. Como puede verse en la tabla V.10, en las pruebas 1 y 2, la lechada de cemento se canalizó hacia el fondo dentro de la salmuera y del lodo, cuando se intentó realizar la prueba por el método balanceado tradicional (con tubería franca), fig. V.12. La canalización de la lechada también ocurrió cuando se utilizó la herramienta desviadora simple (fig. V.11), prueba 3, igualmente cuando la diferencia de densidades del cemento-lodo fue de 3.1 lb/gal (0.37 gr/cm³), prueba 4.

Las pruebas realizadas con el SFR y la herramienta desviadora con el extremo abierto (fig. V.11), se tuvo éxito en la colocación de tapones de cemento, fallando cuando no se utilizó el SFR gelificado abajo de la tubería antes de circular

el cemento a su lugar. Si el volumen del SFR no es suficiente, algunas lechadas de cemento se canalizarán a través de ésta. El volumen del SFR debe ser solo el suficiente, para facilitar la sacada de la tubería después de haberlo colocado en el lugar deseado.

Una prueba se efectuó con la herramienta desviadora simple (fig. V.11) y el SFR, prueba 8. Este método falló probablemente debido al poco volumen o falta de éste del SFR que no fué colocado abajo de la tubería, una prueba realizada con la herramienta desviadora simple y canica, también falló. Algunas gelaciones del SFR pudieron haberse tenido abajo de la tubería pero aparentemente no fueron lo suficientemente capaces para mantener la lechada de cemento en su lugar. También sólo una pequeña cantidad de bache espaciador fué utilizado entre la lechada y el SFR. La gelación del SFR dentro de la herramienta desviadora, pudieron haber restringido u obstruido el flujo. Estos resultados indicaron la necesidad de utilizar volúmenes grandes de bache espaciador adelante de la lechada de cemento, para limpiar el espacio anular y separar la lechada del SFR, ya que también el SFR reacciona con ésta.

De las pruebas realizadas con herramienta desviadora alargada y asiento para canica (fig. V. 11) con SFR, se obtuvieron buenos tapones, pruebas 10 y 11. Estas pruebas fueron realizadas colocando el SFR y la canica fué lanzada cuando se bombeaba la última porción de éste, seguido por un gran volumen de bache espaciador. Cuando la canica se asentó en la herramienta, el flujo fué desviado hacia los costados, por los orificios de la tubería en los costados, dejando un volumen considerable del SFR gelificado abajo. Un gran volumen de bache espaciador fué bombeado para limpiar el espacio anular por arriba de los orificios, en seguida se bombeo la lechada de cemento. Este método resultó un éxito, debido al gran volumen del SFR gelificado, colocado abajo de los orificios laterales de la herramienta.

CONCLUSIONES.

1. El sistema de Fluido Reactivo (SFR) puede ser utilizado con tubería franca o con la herramienta desviadora para colocar con éxito un buen tapón de cemento.
2. El SFR provee un medio de colocación de buenos tapones de cemento, sin el riesgo de la canalización de la lechada hacia el fondo en pozos con condiciones

críticas como son, diferencias de densidades tan altas como de 7.1 lb/gal ----
(0.85 gr/cm³).

3. Grandes volúmenes de bache espaciador pueden ser utilizados para limpiar el espacio anular y minimizar la contaminación.

4. La gelación del SFR no ocurre hasta después de que se coloque en el lugar de seado.

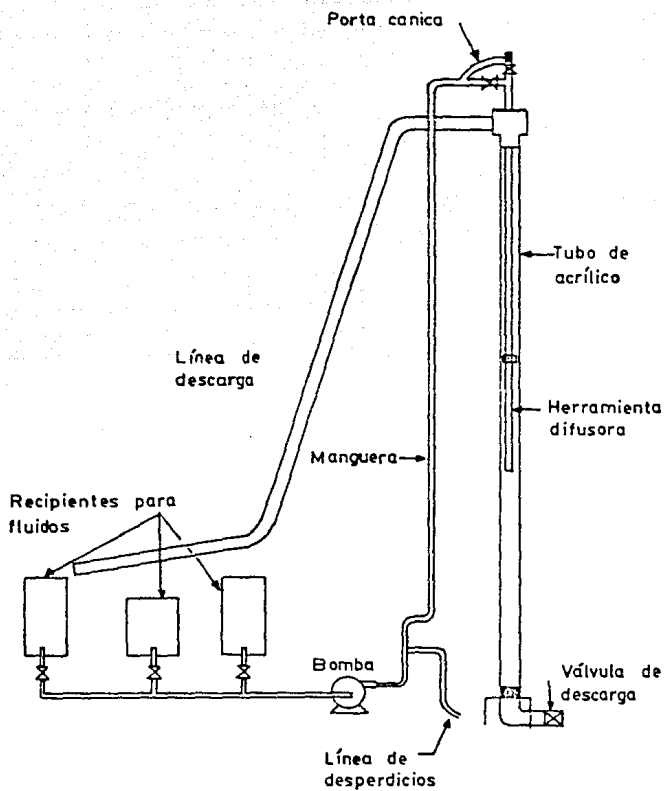
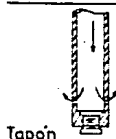


Fig.V.9._ Modelo para las pruebas de tapones de cemento.

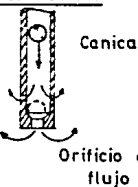
TARIFA NO. V.10.- RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL MODELO PARA COLOCAR TAPONES.

NO. PRUEBA	FLUIDO DEL POZO		TIPO	HTA	SFR ^a (S/R)	ESPAC. AGUA (gal)	DENS. LECHE		RESULTADOS DE LA PRUEBA
	Lb/gal	(gr/cc)					Lb/gal	(gr/cc)	
1	9.4	(1.13)	LBA ^b	ABIERTA	N	0	16.7	(2.00)	Tapón canalizado
2	9.6	(1.15)	SAL ^c	ABIERTA	N	0	16.7	(2.00)	Canalizado
3	9.4	(1.13)	LBA	D.S. ^d	N	0	16.7	(2.00)	Tapón canalizado
4	9.4	(1.13)	LBA	D.S.	N	0	12.5	(1.50)	Se mantuvo un rato, canalizó
5	9.4	(1.13)	LBA	ABIERTA	S	1	16.7	(2.00)	Buen tapón
6	9.6	(1.15)	SAL	ABIERTA	S	1	16.7	(2.00)	Buen tapón (Se sacó TP desp. de colocar el SFR)
7	9.6	(1.15)	SAL	ABIERTA	S	1	16.7	(2.00)	Falló el tapón
8	9.4	(1.13)	LBA	D.S.	S	1	16.7	(2.00)	Tapón canalizado
9	9.6	(1.15)	SAL	DAC ^e	S	1	16.7	(2.00)	Se bajó cuando se lanzó canica.
10	9.6	(1.15)	SAL	DAC	S	1	16.7	(2.00)	Excelente tapón
11	9.6	(1.15)	SAL	DAC	S	5	16.7	(2.00)	Excelente tapón
12	9.6	(1.15)	SAL	DSC ^f	S	1	16.7	(2.00)	Se bajó cuando se lanzó canica
13	16.0	(1.92)	LBA	ABIERTA	N	0	18.0	(2.16)	Buen tapón
14	16.0	(1.92)	LBA	ABIERTA	S	1	16.7	(2.00)	Bueno, algo movido
15	16.0	(1.92)	LBA	ABIERTA	S	1	18.1	(2.17)	Fallo
16	15.0	(1.80)	LWAC ^g	DAC	S	5	16.7	(2.00)	Buen tapón
a	Sistema de Fluido Reactivo (SI/No)						f Difusor Simple con Canica		(fig. V.11)
b	Lodo Base Agua						g Lodo Base Aceite.		
c	Salmuera								
d	Difusor Simple (fig. V.11)								
e	Difusor Alargado con Canica (fig. V.11)								

Difusor Simple



Difusor con Canica



Orificios de flujo
Difusor Alargado

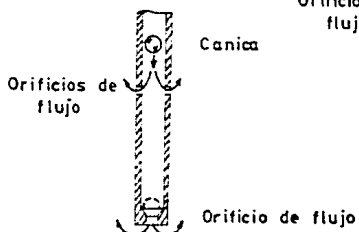


Fig.V.11...Herramientas Difusoras.

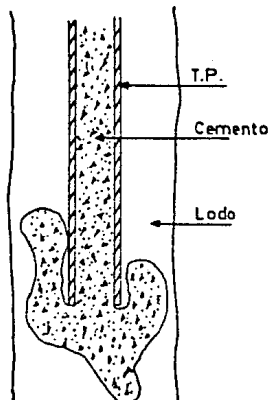


Fig.V.12...Canalización de un tapón de cemento.

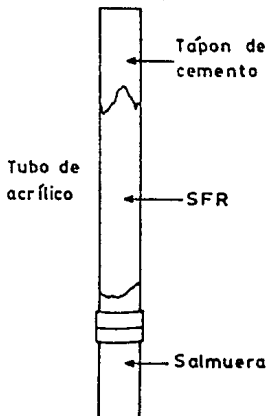


Fig.V.13...Ejemplo de un tapón en el modelo de prueba.

V.2. M É T O D O S P R A C T I C O S .

Los métodos prácticos utilizados en la colocación de tapones de cemento, son -- tres básicamente.

1. Método del tapón balanceado.
2. Método de los dos tapones.
3. Método de la cuchara vertedora (Dump-Bailer)

El método del tapón balanceado, es el más utilizado debido a que es muy simple. Debido a que se tienen constantes fallas con este método, se le han hecho algunas modificaciones para obtener mejores resultados.

El método de los dos tapones utiliza tapones de hule en el desplazamiento de la lechada de cemento, evitando así, la contaminación del cemento con el lodo.

El método de la cuchara vertedora requiere de condiciones muy especiales para -- ser utilizado.

Cada uno de los métodos ofrecen ventajas y desventajas y su operación en algunos casos, difiere mucho una de otra. A continuación se describe cada uno de los -- métodos con sus variaciones.

V.2.1 M É T O D O D E L T A P O N B A L A N C E A D O

Cuando se va a colocar un tapón de cemento, la tubería de producción o perforación, se lleva su extremo hasta la profundidad deseada. Entonces se bombea la lechada de cemento hacia abajo por la tubería, para llenar el espacio anular de abajo hacia arriba. Si se utilizan baches (lavador y espaciador), éstos se bombearán previo a la lechada. El problema consiste en evitar que el tapón se mueva después de colocado. Esto se logra mediante un proceso denominado balanceo -- del tapón (fig. V.14).

La lechada de cemento se debe detener en un punto donde la parte superior de la columna de ésta, en el espacio anular tenga aproximadamente la misma altura que dentro de la tubería. El fluido utilizado para desplazar la lechada debe tener

la misma densidad que el fluido del espacio anular, de tal manera que las columnas estén balanceadas (fig. V.14). En este momento se saca la tubería, quedando el extremo de ésta, por encima de la cima teórica del tapón de cemento.

La expresión "tapón balanceado", se refiere a la colocación de un volumen de cemento en el fondo, de tal manera que las columnas estén balanceadas para que no exista movimiento de fluidos cuando la tubería se levante. Si el fluido que se tiene en la tubería es más pesado, continuará saliendo por la tubería hacia el espacio anular después de haber suspendido el bombeo. Si el fluido que se tiene en el espacio anular es más pesado, entonces el flujo se establecerá en dirección contraria. Si las columnas no se balancean, es posible que el cemento se contamine con lodo.

Cuando se bombea un bache espaciador o un lavador en el espacio anular antes del cemento, es necesario bombear una columna de fluido que tenga la misma longitud y densidad, detrás de la lechada en la tubería, para mantener las columnas balanceadas (fig. V.14).

Igualmente, el desplazamiento de fluido por el volumen de la tubería sumergida en la lechada de cemento, hará que la lechada suba más alto que el llenado necesario hasta que se saque la tubería. Esto se deberá tomar en consideración cuando se calcule el volumen de lechada requerida.

CALCULOS. Los cálculos se realizan en base a los volúmenes de cemento y baches que se tienen en la localización, por lo que son necesarios los datos de toneladas de cemento, el rendimiento de la lechada, requerimiento de agua, tiempo bombeable y el volumen de los baches.

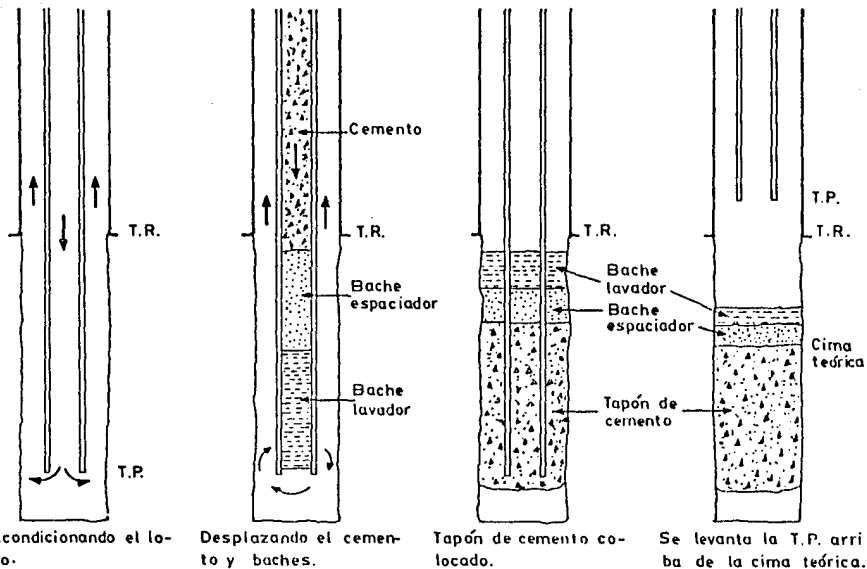
VOLUMEN DE LECHADA DE CEMENTO

$$V_1 = Nt \ 20 \ R \quad (5.1)$$

$$V_1 = \text{Volumen de lechada (l)}$$

$$Nt = \text{Número de toneladas de cemento (ton)}$$

$$R = \text{Rendimiento de la lechada (l/m)}$$



Acondicionando el lodo.

Desplazando el cemento y baches.

Tapón de cemento colocado.

Se levanta la T.P. arriba de la cima teórica.

Fig.V.14... Diagrama del método del tapón balanceado.

CAPACIDADES

Espacio anular (entre T.R. y T.P. o T.P. y agujero)

$$C_{ea} = (D^2 - d^2) 0.5067 \quad (5.2)$$

Agujero o T.R.

$$C = D^2 0.5067 \quad (5.3)$$

Tubería de producción o T.P.

$$C_t = d_t^2 0.5067 \quad (5.4)$$

Todas las capacidades (C_{ea} , C y C_t) están en (l/m)

D = Diámetro interior de la T.R. o del agujero (pg)

d = Diámetro exterior de la T.P. (pg)

d_t = Diámetro interior de la T.P. (pg)

ALTURA DE LA LECHADA EN EL POZO CON LA T.P. DENTRO. Como se vió anteriormente, el tapón debe quedar balanceado por lo que las longitudes de las columnas de cemento deben ser iguales, por lo tanto:

$$h_1 = \frac{V_1}{C_{ea} + C_t} \quad (5.5)$$

h_1 = Altura de la columna de cemento (m)

ALTURA DE LOS BACHES EN EL POZO CON LA T.P. DENTRO.

$$h_2 = \frac{V_{be}}{C_{ea} + C_t} \quad (5.6)$$

$$h_3 = \frac{V_{bl}}{C_{ea} + C_t} \quad (5.7)$$

h_2 = Altura del bache espaciador (m)

h_3 = ALTURA del bache lavador (m)

V_{be} = Volumen total de bache espaciador (l)

V_{bl} = Volumen total de bache lavador (l)

VOLUMENES DE BACHES POR DELANTE Y POR DETRAS DEL CEMENTO.

$$V_1 = C_{ea} h_3 \quad (5.8)$$

$$V_2 = C_{ea} h_2 \quad (5.9)$$

$$V_3 = \text{Volumen de lechada}$$

$$V_4 = C_t h_2 \quad (5.10)$$

$$V_5 = C_t h_3 \quad (5.11)$$

VOLUMEN DE DESPLAZAMIENTO.

De la fig. V.15, tenemos que:

$$h_4 = \text{Prof} - (h_1 + h_2 + h_3) \quad (5.12)$$

$$V_d = C_t h_4 \quad (5.13)$$

$$V_d = \text{Volumen de desplazamiento (l)}$$

$$h_4 = \text{Altura de la columna por desplazar (m)}$$

CIMA TEORICA DEL TAPON DE CEMENTO.

Una vez que la lechada quedó colocada y que la tubería se levante para quedar -- fuera de ésta, se debe determinar la cima teórica del tapón de cemento (fig. V.15)

$$L_1 = \frac{V_1}{C} \quad (5.14)$$

$$CT = \text{Prof} - L_1 \quad (5.15)$$

$$L_1 = \text{Longitud del tapón de cemento (m)}$$

$$CT = \text{Cima teórica (m)}$$

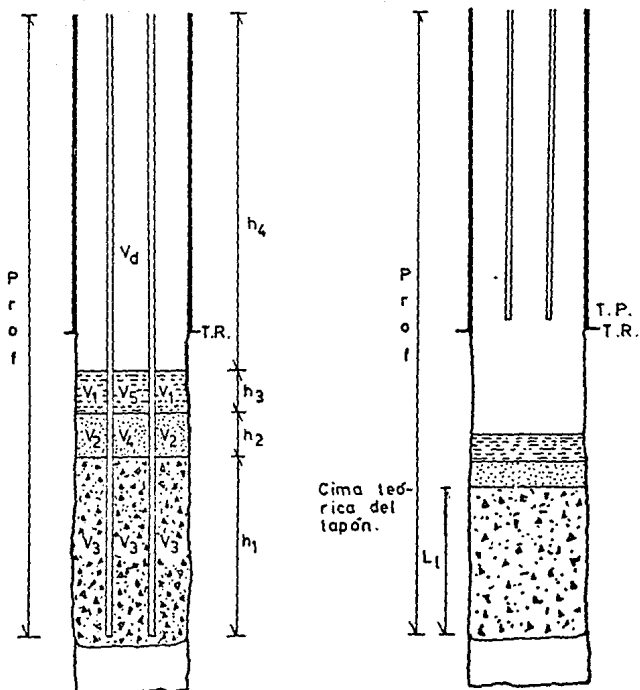


Fig.V.15.- Diagrama de volúmenes utilizados en la colocación de un tapón de cemento.

Algunas variaciones del método del tapón balanceado, son los siguientes:

TAPON DE CEMENTO EN SENO DE BACHE. Esta operación puede realizarse de dos maneras diferentes. Una es bombeando todos los fluidos a utilizar (baches, lechada) y desplazarlos, cuando haya salido un volumen determinado de bache al espacio anular (previo cálculo), se levanta un tubo de la T.P. y se continúa bombeando hasta colocar el tapón de cemento. La otra forma es: bombear un volumen de bache y desplazarlo hasta el extremo de la T.P., y colocarlo como tapón balanceado, posteriormente se levanta la T.P. para que el extremo quede dentro del bache y proceder a colocar el tapón de cemento.

AFINAR UN TAPON DE CEMENTO. Se conoce comunmente como "descabezar un tapón", esta operación se lleva a cabo cuando la longitud del tapón de cemento es pequeña. Cuando ya se tiene el tapón de cemento colocado a la profundidad deseada, se levanta la T.P. a donde quiera que quede la cima del tapón y se circula en inverso hasta que el exceso de la lechada salga a superficie.

OPERACION.

1. Colocar la tubería (de perforación o producción) a la profundidad deseada.
2. Bombear volumen de bache lavador (si se utiliza).
3. Bombear volumen de bache espaciador.
4. Bombear volumen de lechada de cemento rotando la tubería de 20 a 30 rpm.
5. Bombear volumen de bache espaciador.
6. Bombear volumen de bache lavador.
7. Bombear volumen de fluido de desplazamiento.
8. Al terminar de bombear el fluido de desplazamiento, verificar que la presión final sea cero ($P_f = 0$).
9. Levantar la tubería, quedando el extremo 200 m arriba de la cima teórica del tapón de cemento.

VENTAJAS.

- No requiere de equipo adicional.
- La operación es sencilla.
- Permite la circulación en inverso cuando se desea afinar un tapón de cemento.

DESVENTAJAS.

- Puede existir contaminación de la lechada con lodo, especialmente cuando se manejan pequeños volúmenes de cemento.
- Formación de fases inestables lodo-lechada.
- Riesgo de que el tapón se canalice cuando se tienen grandes diferencias de densidad lechada-lodo.
- Es difícil establecer la cima del tapón de cemento con exactitud.

V.2.2. METODO DEL TAPON BALANCEADO CON DIFUSOR.

Este método utiliza una herramienta en el extremo de la T.P., denominada "difusor", éste proporciona algunas ventajas sobre el método tradicional (con tubería franca)

La primera ventaja de esta herramienta es la distribución uniforme del flujo de la lechada de cemento cuando es colocada, lo cual minimiza la posibilidad de cualquier canalización de la columna de lechada. La segunda ventaja igual de importante a la primera, es que esta herramienta permite que la columna de lechada permanezca intacta después de haber sido colocada.

FUNCIONAMIENTO DEL DIFUSOR. La herramienta consta de cuatro componentes principales, éstos son fáciles de mover excepto la unión viajera, que es parte del collar de aislamiento. La unión viajera se recupera con la tubería y puede volverse a utilizar. Los componentes del difusor son:

- Collar de aislamiento
- Tapón limpiador.
- Tubo cola de aluminio.
- Zapata perforada.

Después de que la herramienta es conectada y bajada a la profundidad deseada, la lechada de cemento es bombeada y desplazada hasta la zapata perforada, la cual --

distribuye el flujo uniformemente en el lugar de colocación. El tapón limpiador es colocado y desplazado hacia el fondo. Una vez que el tapón llegó al collar de aislamiento, éste se desconecta con los demás componentes del difusor incluyendo el tapón limpiador de hule, de la T.P. y la unión viajera. La lechada ya colocada permanece aislada de cualquier movimiento. La unión viajera se recupera de la T.P., se revisa para poder ser utilizada en otra operación, fig. V.16.

OPERACION.

1. Bajar la herramienta con la T.P. a la profundidad deseada (puede ser recomendable en algunos casos colocar un bache de bentonita abajo del lugar donde se colocará el tapón de cemento.
2. Bombear volúmenes de baches y lechada de cemento. Parar el bombeo y soltar el tapón limpiador de hule, bombear volúmenes de baches y desplazar hasta que la lechada llegué aproximadamente 30 m arriba del extremo de la T.P. (unión viajera).
3. Reducir el gasto de bombeo y continuar hasta que el tapón limpiador llegué a la camisa soltadora, esto se verificará por un ligero incremento de presión.
4. Incrementar lentamente la presión hasta alcanzar la presión con que se romperán los pernos. La camisa soltadora se liberará, notándose una repentina caída de presión. Así la T.P. y la unión viajera quedarán desconectadas de la herramienta. Durante este paso, el tapón limpiador salió de la unión viajera.
5. Levantar la T.P., posteriormente sacar a la superficie y desconectar la unión viajera.

CALCULOS. Los cálculos son los mismos que se realizan en el método del tapón balanceado tradicional, es conveniente hacer notar que la longitud a utilizar de tubería cola de aluminio, será la misma que la longitud del tapón de cemento, y la cima teórica se calculará con dicha tubería dentro del cemento.

VENTAJAS.

- Se evita la contaminación y la formación de la interfase inestable en la base del tapón de cemento, debido al uso de la zapata perforada.
- Se evita la canalización del cemento debido a que la columna de lechada permanece intacta una vez colocada.
- No existe riesgo de sobredesplazamiento de la lechada.
- La cima del tapón se puede establecer con exactitud.



Difusor colocando la lechada de cemento.



Lechada colocada con la sarta liberada.

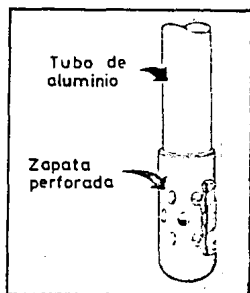
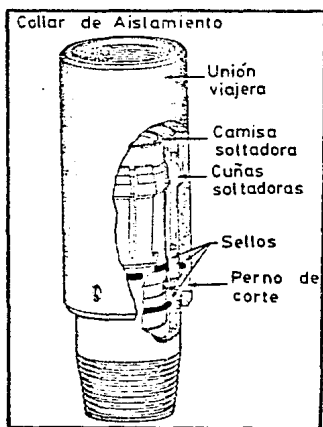


Fig.V.16... Herramienta difusora para la colocación de tapones de cemento.

DESVENTAJAS

- Costo adicional de equipo.
- No se recomienda para longitudes grandes de tapón de cemento.

V.2.3. METODO DE LOS DOS TAPONES

Este método utiliza dos tapones de hule; un tapón de fondo y otro de desplazamiento, para aislar el cemento del fluido del pozo (similar a una cementación primaria). Además de los tapones, se utiliza una herramienta especial, que se conecta en el extremo de la tubería (T.P.), llamada "Receptor de Tapones", la cual permite el paso del tapón de fondo y así quede fuera de la T.P., fig. V.17.

La herramienta es bajada con la T.P. a la profundidad deseada y se inicia a colocar el tapón de fondo seguido por la lechada de cemento, bombeando la cantidad deseada. Se libera el tapón de desplazamiento de la cabeza de cementar y se bombea el fluido de desplazamiento.

El tapón de desplazamiento se alojará en un asiento del receptor de tapones, causando un repentino incremento de presión en la superficie, cuando el tapón se haya asentado. Este asiento ayuda a que el tapón quede asegurado, previniendo que el cemento regrese por la T.P. Posteriormente la tubería se levanta a la profundidad deseada, ya sea fuera del tapón de cemento o dentro de él, para circular en inverso el exceso de lechada.

Con presión adicional se rompen los pernos de corte de la herramienta, deslizándose hacia el fondo de ésta el asiento junto con el tapón de desplazamiento, esto permite que se establezca la circulación directa o inversa (fig. V.18).

CALCULOS. Los cálculos son los mismos que se realizan en el método del tapón balanceado tradicional, excepto para el volumen desplazamiento y la longitud de tubería que se tiene que levantar para quedar fuera del cemento.

El cálculo del volumen de desplazamiento se efectúa utilizando la longitud hasta donde se encuentra el receptor de tapones, por lo tanto, la altura de la columna de cemento con la tubería dentro, se debe calcular solamente con la capacidad del espacio anular.

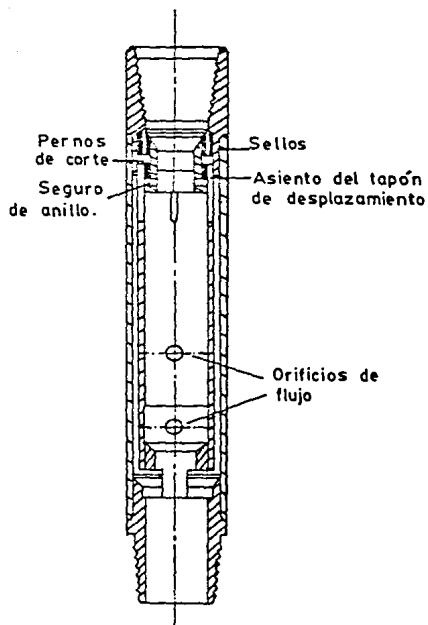
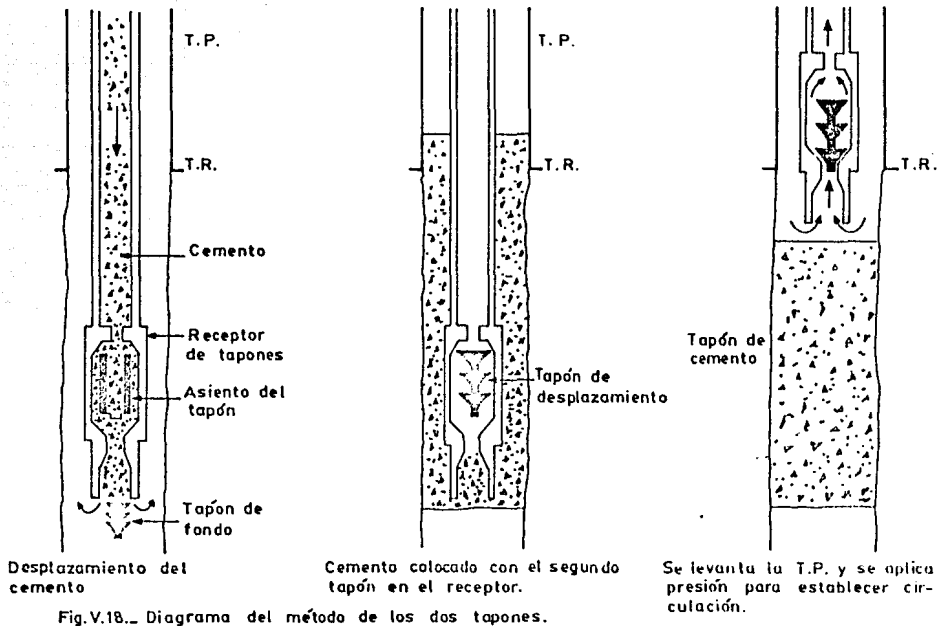


Fig.V.17.- Diagrama del Receptor de tapones.



OPERACION.

1. Colocar el receptor de tapones en el extremo de la tubería e introducirlo a la profundidad deseada.
2. Introducir el tapón de fondo en la T.P. y bombear la cantidad de lechada deseada detrás de éste. liberar el tapón de desplazamiento e iniciar a bombear el fluido de desplazamiento.
3. La T.P. se levanta entonces hasta que su extremo quede a la profundidad deseada.
4. Aplicar una presión de $2\ 000\ \text{lb/pg}^2$ en la T.P. para liberar el asiento del receptor de tapones.
5. Circular en inverso.

VENTAJAS.

- Se puede establecer la cima del tapón de cemento con exactitud.
- El uso de tapones tanto adelante como atrás de la lechada de cemento, reducen la contaminación de ésta.
- No existe riesgo de sobredesplazamiento de la lechada.
- Se previene la entrada de cemento u otros fluidos del pozo al interior de la T.P. hasta que se aplica presión para comunicarla.

DESVENTAJAS.

- El costo del equipo.

V.2.4. METODO DE LA CUCHARA VERTEDORA.

El método de la cuchara vertedora (Dump-Bailer) es generalmente utilizado en pozos entubados de poca presión, poca profundidad, pero también puede ser utilizado en pozos profundos y con mayor presión con ayuda de otras técnicas. En pozos someros y de baja presión, no se requiere de lodos pesados, ya que el pozo puede ser controlado con salmueras, agua dulce o aceite.

Las aplicaciones de este método son generalmente limitados a las condiciones donde la densidad de la lechada desplazaré el fluido del pozo.

Puede colocarse arena o grava por debajo del intervalo deseado del tapón de cemento, o un tapón puente mecánico puede ser colocado en la base del tapón (fig. V.19) El cemento es bajado con la cuchara vertedora, que consiste principalmente de pequeños tubos que contienen la lechada, la cuchara se baja con cable de acero hasta la profundidad deseada y es descargada la lechada sobre el tapón puente por medio de un dispositivo mecánico-eléctrico que se acciona en superficie.

Solo puede ubicarse un volumen limitado por viaje, por lo tanto se harán tantos viajes como lo requiera la longitud del tapón de cemento. Este dispositivo de la cuchara vertedora hace que existan pocos problemas de contaminación; y la profundidad de la ubicación del tapón es fácilmente controlable.

OPERACION.

1. Se prepara el volumen de lechada de cemento requerido y se coloca en la cuchara vertedora (pequeños tubos).
2. Se introduce al pozo la herramienta y se baja a la profundidad deseada con cable de acero.
3. Se acciona el dispositivo mecánico-eléctrico en superficie para liberar la lechada de cemento.
4. Se saca a superficie la cuchara vertedora.
5. Se prepara otro volumen de lechada y se procede de la misma manera. La operación se repite hasta cubrir el intervalo deseado.

VENTAJAS.

- El equipo es simple y de fácil operación.
- La contaminación del cemento es mínima.
- La profundidad de colocación del tapón de cemento, es fácilmente controlable.
- Se recomienda en pozos perforados con aire.

DESVENTAJAS.

- Los pozos deben tener poca presión.
- El fluido en el pozo debe ser agua o salmuera.
- Se debe utilizar un tapón puente (retenedor).
- Maneja pequeños volúmenes de cemento.
- Se utiliza sólo para profundidades someras.

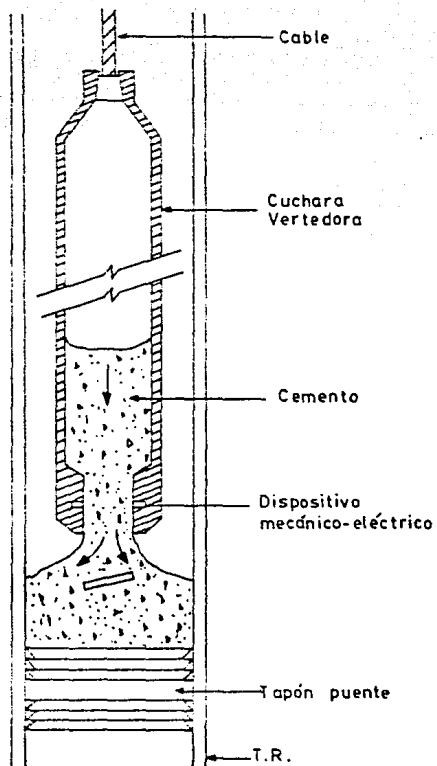


Fig.V.19.- Colocacion de un tapón de cemento con la cuchara vertedora.

V.2.5 METODO DEL TAPON TBT.

El método TBT (True-Tubing Bridge) se utiliza para colocar tapones de cemento en T.R. a través de la tubería de producción.

La herramienta que se utiliza tiene un dispositivo que permite colocar el tapón de cemento sin que el pozo tenga que ser controlado, ya que cuenta con una válvula con un mecanismo de reloj que permite el paso de los fluidos del pozo durante un determinado tiempo.

La herramienta cuenta con un tubo de ventilación, que permite que los fluidos del pozo fluyan a través del tapón de cemento, contenido en una bolsa de hule, sin -- contaminarlo (tapón puente). La bolsa de hule se introduce desinflada con la -- herramienta en la primera corrida, en ésta, se vaciará el volumen de lechada que -- lleva la cuchara vertedora, lo que ocasionará que la bolsa se expanda hasta el -- diámetro interior de la T.R. donde es colocada.

La bolsa con cemento sirve como un tapón puente para el volumen de cemento que -- posteriormente será colocado encima. Las corridas posteriores de la cuchara ver-- tedora se harán para cubrir parte del tubo de ventilación y esperar a que la vál-- vula de la herramienta, cierre y enseguida colocar el volumen de cemento deseado (ver. fig. V.20).

La herramienta TBT está compuesta de las siguientes partes:

- Cabeza
- a).- Adaptador
 - b).- Registro CCL (de coples)

- Cuchara Vertedora
- a).- Actuador
 - b).- Tubos para cemento.

Tubo de Ventilación.

- Tubo Mandril
- a).- Bolsa de hule
 - b).- Válvula con mecanismo de reloj.

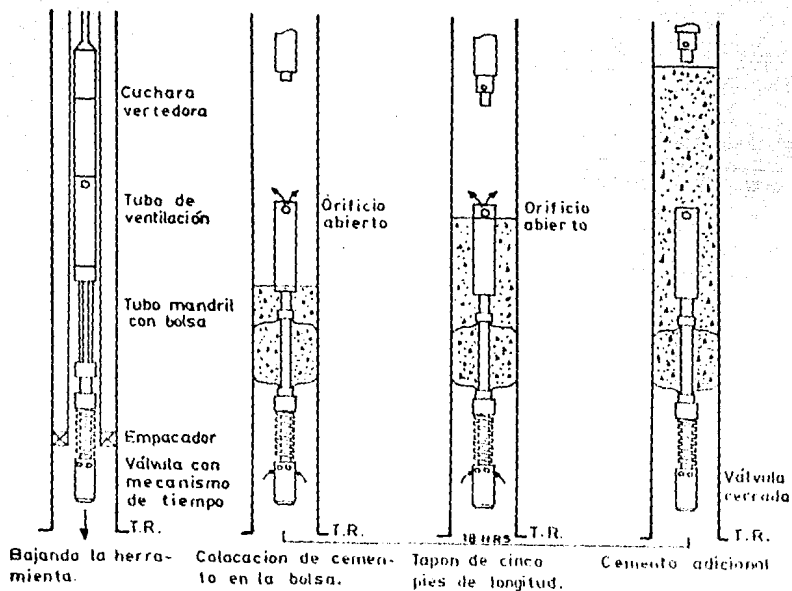


Fig.V.20.- Secuencia operativa de la herramienta del método T.R.T.

La herramienta existe en dos diferentes diámetros exteriores 1 11/16 pg y 2 1/8 - pg, la bolsa de hule existe para varios diámetros de T.R. desde 3 1/2 a 9 5/8 pg.

La herramienta se introduce al pozo completa en la primera corrida, posteriormente solo la cuchara vertedora (fig. V.21).

La utilización de un registro de coples (CCL) en la herramienta es con el fin de que la bolsa de hule sea colocada en el cuerpo del tubo y no en algún cople.

OPERACION.

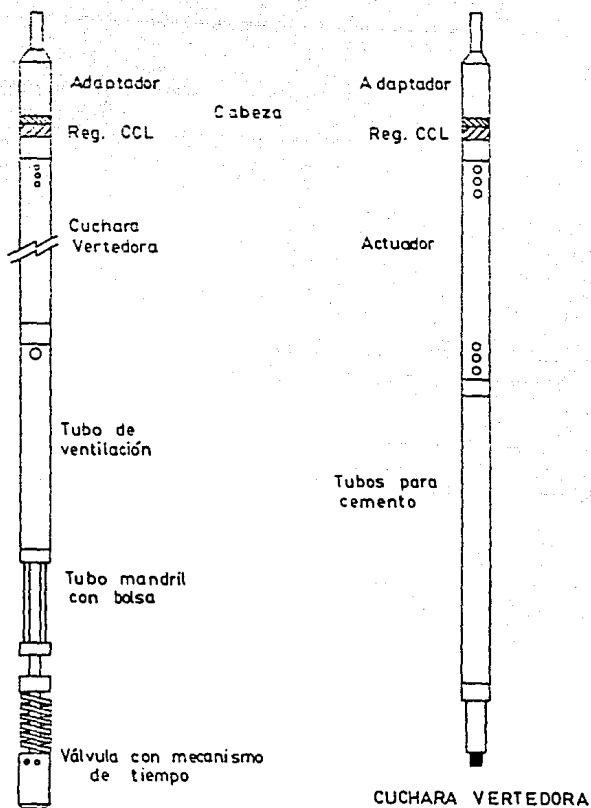
1. Armar la herramienta TBT (fig. V.21), se prepara la lechada de cemento y se coloca en los tubos de la cuchara vertedora. Se mete al pozo y se baja a la profundidad deseada (fig. V.20).
2. Se acciona el dispositivo mecánico-eléctrico de la cuchara vertedora para liberar la lechada, ésta entra en la bolsa de hule expandiéndose al diámetro interior de la T.R., el cemento sobrante quedará vertido alrededor del tubo mandril, al mismo tiempo, la cuchara vertedora se desconecta del resto de la herramienta para ser recuperada.
3. La cuchara vertedora se llena de cemento y se baja hasta donde se encuentra el tubo de ventilación adicionando un nuevo volumen de cemento. El cemento no debe cubrir el orificio de ventilación del tubo hasta que la válvula cierre.
4. Una vez que la válvula cerró debido al mecanismo de reloj, se baja el volumen necesario de cemento con la cuchara vertedora.

VENTAJAS.

- No se necesita controlar el pozo para colocar el tapón de cemento.
- No se requiere el empleo de un equipo de reparación.
- El tiempo de cierre del pozo es corto.
- No se requiere sacar la tubería de producción.
- La longitud del tapón se puede manejar a voluntad.

DESVENTAJAS.

- El tapón debe ser colocado en agua dulce o salada, o en fluidos aportados por el pozo.
- El pozo debe estar libre de asfaltos o depósitos de parafina.
- El tapón de cemento sólo es probado con presión.



HERRAMIENTA TBT

Fig.V.21...Herramienta utilizada para colocar tapones de cemento por el método TBT.

C A P I T U L O V I

EJEMPLO PRACTICO DE APLICACION

VI.1 TAPON PARA DESVIAR

La colocación de tapones de cemento para desviar un pozo es una operación que se recorre a ella para corregir problemas tales como: accidentes mecánicos (pescados), correcciones en la trayectoria del pozo o para iniciar la perforación dirigida.

El siguiente ejemplo trata de un tapón de cemento utilizado para desviar la tra--yectoria original del pozo, a causa de un accidente mecánico. Los datos son los siguientes.

ZONA:	Sureste
DISTRITO:	Villahermosa
CAMPO:	Escarbado
POZO:	No.1
TIPO:	Exploratorio-Terrestre

VI.1.1. CONDICIONES DEL POZO

El pozo Escarbado No.1 se encontraba perforando la formación Cretácico Superior, con barrena 8 3/8 pg a la profundidad de 5 289 m, cuya litología se compone de un 80% de caliza gris claro y 20% de marga café rojizo. El fluido de perforación es un lodo base aceite con una densidad de 1.68 gr/cm³ y con bajo contenido de sólidos, 80 seg (embudo Marsh). La última T.R. cementada que se tiene es de 9 5/8-pg a 5 087 m (zapata) hasta superficie (fig. VI.2)

Al estar perforando, a la profundidad de 5 289 m, con barrena de 8 3/8 pg, se observó pérdida parcial de circulación, por lo que se trató de controlar dicha pérdida, preparando baches de lodo y bombeando éstos con diferentes concentraciones de Obturante Granular Medio (O.G.M.), sin éxito.

Durante una operación de bombeo de 20 m³ de lodo de perforación con densidad de 1.60 gr/cm³ con una concentración de 75 kg/m³ de O.G.M., con la barrena a 5 261 m se desplazó dicho bache con 40 m³ de lodo de perforación con un gasto Q = 3.5 bl/min y una presión de desplazamiento P = 55 kg/cm², al iniciar la circulación se observó pérdida de 2 m³, al finalizar el desplazamiento se observó circulación normal.

Al sacarse la barrena a 5 034 m se observó desprendimiento de la T.P. de 5 pg XH de 19.5 lb/pie, cayendo la sarta al fondo del pozo, quedando como pez 5 018 m de tubería (longitud de pez = L.P.) y la boca de pez (B.P.) a 271 m.

Después de haberse efectuado las operaciones de pesca, se logró recuperar 5012.33 m de tubería, quedando en pozo una L.P. = 5.67 m y la B.P. = 5283.33 m, mismo -- que no se pudo recuperar.

PEZ: Barrena 8 3/8 pg, 1 tubo lastra-barrena y 1 estabilizador.

Una vez que se decidió colocar un tapón de cemento para desviar el pozo, se tomaron los siguientes registros: Inducción con Rayos Gama, Desviación Calibración y Densidad-Neutrón Compensado en el intervalo de 5283 m a 5087 m.

Se colocaron tres tapones de cemento sin éxito hasta colocar el cuarto tapón con éxito. A continuación se describe cada uno de ellos.

PRIMER TAPON.

Lechada de Cemento. 7 toneladas de cemento tipo "C" con los aditivos:

35.00% Harina Sílica
0.25% Antiespumante
1.00% Fluidizante (dispersante)
0.40% Controlador de filtrado
1.30% Retardador
4.00% controlador de cloruros
0.65% Intensificador del reardador

Densidad de la lechada: $\rho = 1.94 \text{ gr/cm}^3$
Rendimiento: $R = 47.5 \text{ l/saco}$
Requerimiento de agua: $\text{Req} = 25 \text{ l/saco}$
Tiempo bombeable: T.B. = 4:20 hrs.

BACHES

$$4 \text{ m}^3 \text{ de bache espaciador} = 1.75 \text{ gr/cm}^3$$

OPERACION. El tapón de cemento se colocó por el método del tapón balanceado.

Con T.P. franca de 5 pg de 19.5 lb/pie a 5283 m se circuló acondicionando el fluido de perforación con las siguientes propiedades:

$P = 1.61 \text{ gr/cm}^3$, 75 seg. $V_p = 55 \text{ cp}$ y $P_c = 24 \text{ lb/100 pie}^2$. Se bombeo la lechada de cemento de $P = 1.94 \text{ gr/cm}^3$ entre baches de fluido espaciador, desplazó la misma con 294 bl de lodo de perforación con un $Q = 4 \text{ bl/min}$ y una presión $P = 140 \text{ kg/cm}^2$.

Durante la operación se observó circulación normal y la tubería se rotó con 30 rpm. la presión final fué igual a cero, se levantó la T.P. a 4700 m. Cima teórica de tapón de cemento a 5130 m, con un tiempo de fraguado de 72 hrs.

RESULTADOS. Con barrena de 8 3/8 pg se verificó la cima de cemento a 5143 m, se rebajó cemento sin consistencia a 5200 m. Se rebajó cemento hasta 5230 m con una velocidad de 0.2 m/min.

Se metió barrena 8 3/8 pg, herramienta desviadora y motor de fondo perforando -- desviado a 5294 m, donde suspende la perforación por encontrar resistencia. Por lo que se concluye que existió una mala operación de perforación desviada y falta de longitud del tapón de cemento por lo cual se volvió a caer al pozo original.

SEGUNDO TAPON.

Lechada de cemento. 12 toneladas de cemento tipo "G" con los aditivos siguientes

- 35.00% Arena Sílica
- 0.40% Controlador de filtrado
- 1.00% Fluidizante
- 1.00% Retardador
- 0.30% Antiespumante
- 4.00% Controlador de cloruros

Densidad de la lechada: $P = 2.00 \text{ gr/cm}^3$
Rendimiento: $R = 45.45 \text{ l/saco}$
Requerimiento de agua: $\text{Req} = 22 \text{ l/saco}$
Tiempo bombeable: T.B. = 4:00 hrs.

BACHES

3 m³ de bache lavador para fluido base aceite.
4 m³ de bache espaciador $\rho = 1.80 \text{ gr/cm}^3$.

OPERACION. El tapón de cemento se colocó por el método del tapón balanceado en seno de bache.

Con extremo de la T.P. franca de 5 pg a 5283 m, se circuló acondicionando lodo; $\rho = 1.61 \text{ gr/cm}^3$, 65 seg, $V_p = 42 \text{ cp}$ y $P_c = 14 \text{ lb/100 pie}^2$. Se colocó 0.5 m³ de bache espaciador y se levantó la T.P. a 5275 m donde se colocó el tapón de cemento, bombeando lechada de cemento de densidad variable de 2.00 a 2.02 gr/cm³, entre baches de espaciador y lavador. Desplazó lechada con 278 bl de lodo con un $Q = 5 \text{ bl/min}$ y una $P = 32 \text{ kg/cm}^2$. Al salir el cemento al extremo de la T.P. se bajó el gasto a $Q = 3 \text{ bl/min}$ y la $P = 14 \text{ kg/cm}^2$, presión final igual a cero.

La tubería se rotó con 20 rpm, se observó circulación normal. Se levanto extremo T.P. franca a 4658 m. Cima teórica del tapón de cemento a 5000 m, tiempo de fraguado de 80 hrs.

RESULTADOS. Con barrena de 8 3/8 pg se verificó la cima de cemento a 5040 m, rebajó cemento a 5060 con una velocidad de 0.25 m/min, prosiguiendo a rebajar cemento puenteado sin consistencia hasta 5273 m. Por lo que se concluye que el tapón de cemento se contaminó en su totalidad con fluido de perforación.

TERCER TAPON

Lechada de cemento. 15 toneladas de cemento tipo "C" con los aditivos siguientes:

35.00% Harina Silica

0.60 l/saco Controlador de filtrado

1.20 l/saco Fluidizante (dispersante)

0.60 l/saco Retardador

0.30 l/saco Antiespumante

4.00% Controlador de cloruros

Densidad de la lechada: $\rho = 2.00 \text{ gr/cm}^3$

Rendimiento: $R = 45.46 \text{ l/saco}$

Requerimiento de agua: $Req = 20.72 \text{ l/saco}$

Tiempo Bombeable: T.B. = 4:00 hrs.

BACHES

3 m³ de bache lavador para fluido base aceite.
5 m³ de bache espaciador: $\rho = 1.80 \text{ gr/cm}^3$.

OPERACION. Al efectuarse las pruebas de compatibilidad de la lechada de cemento con el bache espaciador, en la localización, se observó ligero incremento de viscosidad al mezclarlos y después de 30 minutos aproximadamente, se observó floculación total de la lechada y del bache, debido a lo cual se suspendió la operación.

VI.1.2 DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO

(CUARTO TAPON)

Los datos necesarios para el diseño, son los siguientes.

OBJETIVO DEL TAPON: Para desviar
LUGAR DE COLOCACION: Agujero descubierto
DIAMETRO DEL AGUJERO: 9 pg promedio (por registro)
PROFUNDIDAD: 5275 m
TEMPERATURA ESTÁTICA: 288 °F (142°C) a 5275 m
FLUIDO EN EL POZO: Lodo base aceite (con O.G.M.)
PROPIEDADES: $\rho = 1.61 \text{ gr/cm}^3$, $V_a = 72 \text{ cp}$, $V_p = 59 \text{ cm}$, $P_c = 26 - 1\text{b}/100 \text{ pie}^2$ y Salinidad 93,000 ppm.
LONGITUD A CUBRIR CON EL TAPON: 300 m
TIEMPO BOMBEABLE REQUERIDO: 4:00 hrs.

Ultima T.R. cementada: 9 5/8 pg P-110, 53.5 lb/pie a 5087 m

Profundidad del pozo: 5287 m (Boca de Pez)

Tubería de desplazamiento: T.P. 5 pg XH, 19.5 lb/pie

El diseño final de la lechada de cemento quedó de la siguiente manera:

35% Harina Sílica

Ayuda a prevenir la dureza inicial en pozos -
con alta temperatura.

4%	Controlador de cloruros	Este aditivo evita la reacción de la lechada con cloruros del lodo de perforación.
0.25%	Antiespumante	Evita que al ser mezclada la lechada, arrastre aire por la formación de espuma.
0.4%	Controlador de filtrado	Reduce la deshidratación de la lechada en pozos con alta temperatura.
1.0%	Fluidizante	Este aditivo es un reductor de fricción (dispersante) por lo que hace a la lechada más fluida.
1.3%	Retardador	Amplia el tiempo de espesamiento de la lechada.
0.65%	Intensificador del retardador	Se agrega este aditivo para que el retardador tenga un mayor rendimiento, así se evitan grandes cantidades de retardador.

Cantidad de cemento: 15 toneladas.

PRUEBAS DE LABORATORIO.

- Tiempo bombeable: 4:00 hrs (fig. VI.1)

- Propiedades reológicas a 27 °C:

$L_{600} = 178$, $L_{300} = 98$, $L_{200} = 70$ y $L_{100} = 40$

$V_p = 80$ cp

$P_c = 18$ lb/100 pie²

$n' = 0.86$

$K' = 0.0048$ lb/100 pie² seg

- Agua libre a 27 °C: 0.0 cm³

- Pérdida de fluido: $F_{30} = 10$ cm³

- Densidad de la lechada: 1.94 gr/cm³

- Rendimiento de la lechada: 47.5 l/saco

- Requerimiento de agua: 25 l/saco.

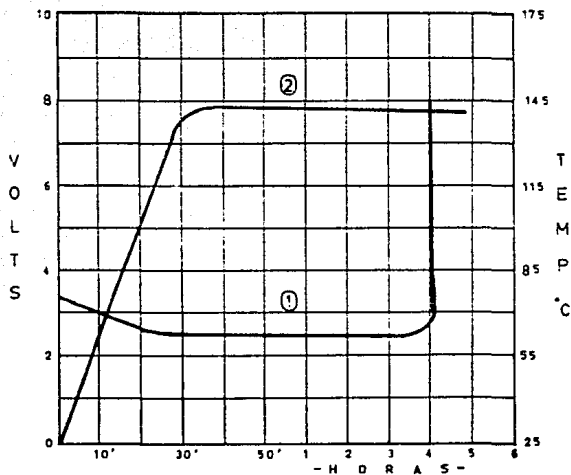


Fig.VI.1.- Gráfica de tiempo bombeable de la lechada, con un tiempo de 4:00 hrs. a una temperatura de 142 °C.

- ① Tiempo bombeable
- ② Temperatura

VI.1.3 DISEÑO DE BACHES

En este caso sólo se utilizó bache espaciador, el cual es un fluido base aceite - que no crea altas viscosidades en las interfaces. Contiene además un poderoso -- dispersante lo que permite que pueda ser densificado con barita, posee baja pérdida de fluido y además puede ser bombeado en flujo turbulento con bajos gastos de bombeo. Es estable hasta 400°F (204 °C). La densidad del bache es de 1.80 gr/cm³ (densidad del lodo = 1.61 gr/cm³).

Se utilizaron 7 m³ de bache, ya que debido a los problemas de contaminación, se programó tener una columna de 170 m de bache en el espacio anular y también se colocó un tapón de bache espaciador en la base del tapón de cemento, para evitar -- contaminación.

VI.2 CUIDADOS PRE - OPERATIVOS

Se verificó la tubería con que se efectuaría la colocación del tapón (grado, peso y diámetro), el peso de la sarta y la profundidad a la cual se encontraba.

- T.P. 5 pg XH, 19.5 lb/pie
- Peso en el indicador del equipo de perforación 132 ton (peso del block = 8 ton)
- Extremo de la T.P. franca a 5275 m.

Verificando la profundidad a la que se encuentra la T.P. franca.

PESO DE LA SARTA (Ws)

$$\begin{aligned} W_s &= \text{Peso unitario (lb/pie)} \times \text{Profundidad (pies)} \\ W_s &= 19.5 \text{ lb/pie} \times 5275 \text{ m} \times 3.28 \text{ pie/m} = 337,389 \text{ lb} \end{aligned}$$

FACTOR DE FLOTACION (Ff)

$$\begin{aligned} Ff &= 1 - \frac{P_{\text{lodo}}}{P_{\text{acero}}} \\ Ff &= 1 - \frac{1.61}{7.85} = 0.795 \end{aligned}$$

PESO DE LA SARTA CON FACTOR DE FLOTACION (Wf)

$$Wf = 337,389 \text{ lb} \times 0.795 = 268,192 \text{ lb}$$

$$Wf = 122 \text{ ton}$$

PESO TOTAL (Wt)

$$Wt = Wf + \text{Peso del block}$$

$$Wt = 122 \text{ ton} + 8 \text{ ton} = 130 \text{ ton}$$

$$Wt = 130 \text{ ton}$$

Por lo que el peso de la T.P. en el indicador del equipo es aproximadamente igual al calculado.

Se verificaron las condiciones del equipo de perforación; bombas y malacate (en condiciones satisfactorias).

Se verificó el equipo a utilizar, así como el material solicitado.

Equipo en la localización:

- Unidad de alta presión
- Unidad mezcladora (recirculador)
- Unidad con cemento dosificado (15 ton)
- Pipa con agua de mezcla (10 m^3)
- Pipa con bache espaciador (7 m^3)

Se verificaron las propiedades del fluido de perforación, densidad y viscosidad a la entrada y la salida del pozo.

$$\text{Presión de circulación} = 50 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Gasto de circulación} = 6 \text{ bl/min}$$

Así, con las condiciones anteriores y las cantidades de los materiales en la localización, se realizarón los cálculos necesarios para efectuar la operación.

CALCULOS.

1) Para acondicionar el fluido de control, se circulará como mínimo un ciclo, - por lo que se determina el tiempo de circulación.

Datos: Bombas Triplex
Carrera 12 pg
Diámetro del pistón 6.5 pg
Número de emboladas (70, 80, 90) EPM
Eficiencia de la bomba (80%)

- VOLUMEN DE FLUIDO DE PERFORACION A CIRCULAR

$$C_t = (4.276)^2 \times 0.5067 = 9.265 \text{ l/m}$$

$$C_{ea} = (9^2 - 5^2) \times 0.5067 = 28.375 \text{ l/m}$$

$$C_{ea} = (8.535^2 - 5^2) \times 0.5067 = 24.24 \text{ l/m}$$

$$V_t = 9.265 \text{ l/m} \times 5275 \text{ m} = 48,873 \text{ l}$$

$$V_{ea} = 28.375 \text{ l/m} \times (5275 - 5087) \text{ m} = 5,335 \text{ l}$$

$$V_{ea} = 24.24 \text{ l/m} \times 5087 \text{ m} = 123,309 \text{ l}$$

$$V_{tf} = V_t + V_{ea} + V_{ea}$$

$$V_{tf} = 48,873 \text{ l} + 5,335 \text{ l} + 123,309 \text{ l} = 177,517 \text{ l}$$

$$V_{tf} = 177,517 \text{ l}$$

- GASTO DE LA BOMBA

$$Q = 0.0386 \times D_p \times C_p$$

Q = Gasto de la bomba (l/emb)

D_p = Diámetro del pistón (pg)

C_p = Carrera del pistón (pg)

$$Q = 0.0386 \times (6.5)^2 \times 12 = 19.58 \text{ l/emb (eficiencia 100\%)}$$

$$Q = 19.58 \times \text{Eficiencia}$$

$$Q = 19.58 \times 0.80 = 15.66 \text{ l/emb}$$

- NUMERO DE EMBOLADAS

$$\text{No emb} = \frac{V_{tf}}{Q}$$

$$\text{No emb} = \frac{177,517 \text{ l}}{15.66 \text{ l/emb}} = 11,333 \text{ emb}$$

- TIEMPO NECESARIO

$$t = \frac{\text{No emb}}{\text{EPM}}$$

$$t = \frac{11,333 \text{ emb}}{70 \text{ emb/min}} = 162 \text{ min}$$

$$t = \frac{11,333 \text{ emb}}{80 \text{ emb/min}} = 142 \text{ min}$$

$$t = \frac{11,333 \text{ emb}}{90 \text{ emb/min}} = 126 \text{ min}$$

Por lo tanto sí se circula el fluido de perforación con un gasto de 80 EPM, se necesitan 2:30 hrs. aproximadamente para completar un ciclo.

2) Para colocar el tapón de cemento por el método del tapón balanceado, en seno de bache, se realizaron los siguientes cálculos:

a) Para colocar el bache espaciador en el fondo del pozo, éste se colocará como un tapón balanceado.

Volumen de bache a colocar, 7 bl (1,113 l).

- ALTURA DEL BACHE EN T.P. Y ESPACIO ANULAR (h_{bb})

$$h_{bb} = \frac{V_{bb}}{C_t C_{ea}}$$

$$h_{bb} = \frac{1,113 \text{ l}}{(9.265 + 28.375) \text{ l/m}} = 30 \text{ m}$$

- VOLUMEN PARA DESPLAZAR EL BACHE ESPACIADOR (V_{db})

$$V_{db} = C_t \times (\text{Prof} - h_{bb})$$

$$V_{db} = 9.265 \text{ l/m} \times (5275 - 30) \text{ m} = 48,595 \text{ l}$$

$$V_{db} = 306 \text{ bl}$$

b) Para efectuar los cálculos para el tapón de cemento, se debe considerar que - la T.P. se levantará a 5247 m.

De los datos de laboratorio, se tiene:

15 ton de cemento

Rendimiento R = 47.5 l/saco

Requerimiento de agua Req = 25 l/saco

- VOLUMEN DE AGUA REQUERIDO PARA LA LECHADA DE CEMENTO (V_a)

$$V_a = 15 \text{ ton} \times 20 \text{ saco/ton} \times 25 \text{ l/saco} = 7,500 \text{ l}$$

- VOLUMEN DE LECHADA DE CEMENTO (V_1)

$$V_1 = 15 \text{ ton} \times 20 \text{ saco/ton} \times 47.5 \text{ l/saco} = 14,250 \text{ l}$$

$$V_1 = 89.6 \text{ bl}$$

- LA ALTURA DEL VOLUMEN DE LECHADA EN T.P. Y ESPACIO ANULAR

$$h_1 = \frac{14,250 \text{ l}}{(9.265 + 28.375) \text{ l/m}} = 378.60 \text{ m}$$

Como puede verse en la fig. VI.2 parte de la lechada queda dentro de la T.R. de 9 5/8 pg, por lo que se determina primero el volumen correspondiente al espacio anular entre T.P. y agujero, y el volumen restante de lechada, se determina la longitud que cubre dentro de la T.R. de 9 5/8 pg.

- VOLUMEN DE LECHADA ABAJO DE LA ZAPATA (V_{11})

$$V_{11} = (9.265 + 28.375) \text{ l/m} \times (5247 - 5087) = 6,022 \text{ l}$$

- VOLUMEN DE LA LECHADA RESTANTE (V_{12})

$$V_{12} = V_1 - V_{11}$$

$$V_{12} = 14,250 - 6,022 = 8,228 \text{ l}$$

- ALTURA DEL VOLUMEN DE LECHADA RESTANTE DENTRO DE LA T.R. 9 5/8 pg

$$h_{11} = \frac{8,228 \text{ l}}{(9.265 + 24.24) \text{ l/m}} = 246 \text{ m}$$

- ALTURA TOTAL DEL VOLUMEN DE LECHADA CON LA T.P. DENTRO

$$h_1 = (5247 - 5087) \text{ m} + 246 \text{ m} = 406 \text{ m}$$

c) Se determina ahora el volumen de bache espaciador que se bombeará por delante y por detrás de la lechada, considerando el volumen restante de los 7 m³.

$$V_{be} = 7,000 \text{ l} - 1,113 \text{ l} = 5,887 \text{ l}$$

- ALTURA DEL BACHE EN EL POZO CON LA T.P. DENTRO

$$h_2 = \frac{5,887 \text{ l}}{(9.265 + 24.24) \text{ l/m}} = 176 \text{ m}$$

- VOLUMEN DE BACHE ESPACIADOR POR DELANTE DE LA LECHADA

$$V_1 = 24.2 \text{ l/m} \times 176 \text{ m} = 4,259 \text{ l}$$

$$V_1 = 26.77 \text{ bl}$$

- VOLUMEN DE BACHE ESPACIADOR POR DETRAS DE LA LECHADA

$$V_2 = 9.265 \text{ l/m} \times 176 \text{ m} = 1,628 \text{ l}$$

$$V_2 = 10 \text{ bl}$$

- VOLUMEN DE DESPLAZAMIENTO

$$h_3 = \text{Prof} - (h_1 + h_2)$$

$$h_3 = 5247 - (406 + 176) = 4665 \text{ m}$$

$$V_d = C_t h_3$$

$$V_d = 9.265 \text{ l/m} \times 4665 \text{ m} = 43,230 \text{ l}$$

$$V_d = 272 \text{ bl}$$

- CIMA TEORICA DEL TAPON DE CEMENTO

$$L_1 = \frac{V_1}{C}$$

$$L_1 = \frac{14,250 \text{ l}}{41 \text{ l/m}} = 347 \text{ m}$$

Como puede verse en la figura VI.2, el tapón queda colocado en agujero entubado y descubierto, por lo que se debe determinar nuevamente la cima del tapón de cemento sin T.P. dentro:

- VOLUMEN DE LECHADA EN EL AGUJERO (V_{1a})

$$V_{1a} = 41 \text{ l/m} \times (5247-5087) = 6,560 \text{ l}$$

- VOLUMEN DE LECHADA EN LA T.R. (V_{ltr})

$$V_{ltr} = V_1 - V_{1a}$$

$$V_{ltr} = 14,250 - 6,560 = 7,690 \text{ l}$$

- LONGITUD DE LA LECHADA EN LA T.R. (h_{tr})

Capacidad de la T.R.

$$C = (8.535)^2 \times 0.5067 = 36.9 \text{ l/m}$$

$$h_{tr} = \frac{V_{ltr}}{C}$$

$$h_{tr} = \frac{7,690 \text{ l}}{36.9 \text{ l/m}} = 208 \text{ m}$$

- CIMA TEORICA DEL TAPON DE CEMENTO

$$L_1 = 5087 \text{ m} - 208 \text{ m} = 4879 \text{ m}$$

$$L_1 = 4879 \text{ m}$$

VI.3 EJECUCION DE LA OPERACION

1. Con extremo de la T.P. 5 pg a 5275 m, se circuló acondicionando fluido de perforación, durante 2:30 hrs. (1 ciclo), resultando las siguientes propiedades:

Entrada del fluido al pozo: $\rho = 1.61 \text{ gr/cm}^3$ Viscosidad = 75 seg

Salida del fluido del pozo: $\rho = 1.61 \text{ gr/cm}^3$ Viscosidad = 75 seg.

$V_p = 59 \text{ cp}$, $P_c = 26 \text{ lb/100 pie}^2$ y Salinidad = 93,000 ppm

2. Se probaron las conexiones superficiales con 350 kg/cm^2 , resultando satisfactorias.

3. Se colocó tapón de 7 bl de fluido espaciador de 1.80 gr/cm^3 , desplazándolo -- con 306 bl de fluido de perforación con una $P = 98 \text{ kg/cm}^2$, y un $Q = 6 \text{ bl/min}$ y -- presión final igual a cero.

4. Se levantó T.P. a 5247 m y se bombeó 27 bl de bache espaciador de una ---- $P = 1.80 \text{ gr/cm}^3$. Se mezcló y bombeó 90 bl de lechada de cemento de $P = 1.94 \text{ gr/cm}^3$.

5. Se bombeó 10 bl de fluido espaciador de $P = 1.80 \text{ gr/cm}^3$.

6. Se desplazó lechada de cemento y baches con 272 bl de fluido de perforación -- con una $P = 56 \text{ kg/cm}^2$ y un $Q = 5 - 3 \text{ bl/min}$, presión final igual a cero.

7. Se levantó la T.P. a 4630 m lentamente.

Durante la operación se observó circulación normal y al bombear el bache espaciador por delante de la lechada, se rotó la T.P. hasta que se colocó el tapón de cemento en su lugar.

VI.4 CUIDADOS POST - OPERATIVOS

1. Sacar T.P. lentamente hasta 200 m arriba de la cima del bache espaciador.
2. Romper circulación en directo para lavar la T.P.
3. Continuar sacando T.P. a superficie.
4. Meter barrena 8 3/8 pg a 3500 m, esperar en total 80 hrs de fraguado, circulando a intervalos.
5. Bajar a reconocer la cima del cemento a $\pm 4879 \text{ m}$. Probar con 5 ton de peso y presión de 140 kg/cm^2 .

VI.5 RESULTADOS

Con barrena 8 3/8 pg se verificó cima de cemento a 4934 m. Probó tapón de cemento con 15 ton de peso y presión de 140 kg/cm² durante 30 minutos, soportando satisfactoriamente la prueba.

Rebajó tapón con barrena a 4963 m con una velocidad de 0.2 m/min y de ahí hasta 5150 m rebajó tapón con una velocidad de 0.1 m/min, considerándose satisfactorio. Se sacó barrena a la superficie.

Se armó herramienta desviadora y metió misma con barrena 8 3/8 pg y motor de fondo 6 1/2 pg a 5150 m. Se perforó desviado a 5156 m donde se tomó desviación 2° - 30', rumbo S 60° W (desalojando 40% cemento y 60% formación)

Se continuó perforando desviado con los siguientes resultados:

Profundidad (m)	Desv.	Rumbo	Perfora.
5165	4°0'	S 55° W	80% marga café 20% cemento
5172	4°15'	S 49° W	90% marga café 10% cemento
5195	4°45'	S 50° W	90% caliza café 10% marga café
5215	4°45'	S 50° W	100% caliza café claro.
5248	5°15'	S 55° W	100% marga café rojizo.
5280	5°0'	S 60° W	100% marga café rojizo
5338	4°15'	S 55° W	90% caliza café 10% marga café
5460	4°30'	S 80° W	90% caliza café 10% marga café

EL pozo se continuó perforando hasta 5736 m. donde se cemento la T.R. de 7 pg, -- por lo que se concluye que el tapón de cemento para desviar cumplió con el objetivo.

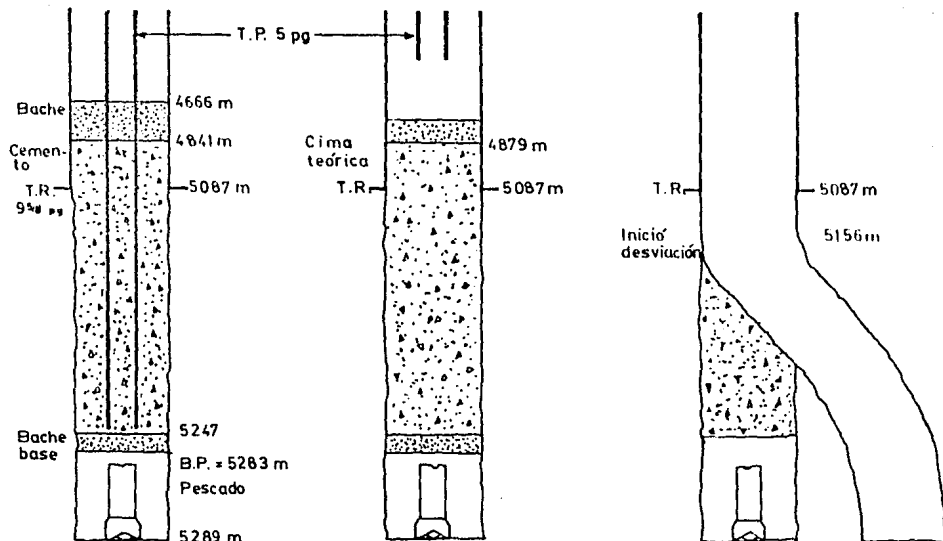


Fig.VI.2...Diagrama del estado mecánico del pozo Escarbado No 1, y la colocación de un tapón de cemento para desviar.

CONCLUSIONES

La colocación de tapones de cemento, es una operación que cumplirá con un objetivo específico, puesto que un tapón mal colocado ocasionará un incremento en los costos de operación y retraso en las operaciones subsecuentes.

Cada operación debe ser considerada como un caso particular por lo cual, el método y el diseño de la lechada de cemento será exclusivo de cada tapón de cemento de acuerdo al objetivo.

Las lechadas de cemento deben ser diseñadas de acuerdo a las condiciones de: Profundidad, temperatura, diámetro del lugar de colocación, propiedades reológicas del fluido de control y del objetivo del tapón, así el volumen de lechada debe ser suficiente y se determinará en base a un registro de calibración, cuando se trate de agujero descubierto. Los aditivos que se agreguen a la lechada, deben ser los adecuados y en las cantidades específicas de las pruebas API, los tiempos de espesamiento no deben ser excesivos ya que altos porcentajes de retardador, disminuyen la resistencia a la compresión del cemento, tiempos largos de espera de fraguado y en consecuencia contaminación del cemento.

El tiempo de fraguado debe ser determinado en base a pruebas de resistencia a la compresión a las 24:00 hrs de fraguado, y la mínima permisible será de 35 kg/cm².

La temperatura para efectuar el diseño de la lechada, debe ser obtenida de Registros Geofísicos, utilizando la temperatura circulante a excepción de pozos de alta temperatura (rápida recuperación térmica) en que se empleará la estática. El tiempo de espesamiento máximo recomendable será igual al tiempo requerido para la operación más 60 minutos por cualquier falla del equipo de perforación impondrable.

Siempre que sea posible, la densidad de la lechada deberá tener un valor cercano a la del fluido de control y contener el mínimo porcentaje de dispersante, cuando la diferencia entre la densidad de la lechada y la del fluido de control sea considerable, deberá colocarse un bache de apoyo con suficiente viscosidad y de densidad intermedia, para el método del tapón balanceado.

Con respecto a los baches espaciadores, deberán utilizarse siempre, los lavadores cuando sea necesario. Estos se diseñarán de acuerdo al fluido base que se tenga como fluido de control. Los volúmenes a utilizarse deben estar basados en un registro de calibración del agujero y deberán ser equivalentes a una altura mínima de 150 m o un tiempo de contacto de 10 minutos (lo que sea mayor), sin embargo -- las condiciones del pozo pueden requerir un mayor volumen.

Las propiedades del bache espaciador de densidad, viscosidad y poder gelificante, deben ser mayores que las del fluido de control y menores que las de la lechada. Las pruebas de compatibilidad de los baches con la lechada y con el fluido de control, se deben llevar a cabo en el laboratorio y verificarlas en el campo.

El acondicionamiento del fluido de control se debe efectuar previo a toda operación, siendo las propiedades reológicas las mismas con que se solicitó el diseño de la lechada de cemento. Siempre que sea posible, la densidad, la viscosidad, - gel y contenido de sólidos deberán ser los valores mínimos que las condiciones -- del pozo lo permitan

El método que se utilice para la colocación de un tapón de cemento, deberá seleccionarse de acuerdo a las condiciones del pozo y al objetivo del tapón.

Cuando se utilice el método del tapón balanceado, debe conectarse en el extremo -- de la T.P. una herramienta desviadora de flujo y rotar la misma a ± 30 rpm al -- iniciar el bombeo de los baches. Al finalizar el desplazamiento, levantar la -- T.P. lentamente hasta salir de los baches.

En el método de "los dos tapones" se debe calibrar la T.P. que se utilizará, y -- éste se recomienda cuando se tienen problemas graves de contaminación.

El método de "la cuchara vertedora" es recomendable cuando se manejan pequeños -- volúmenes de cemento y en pozos con bajas presiones y profundidades someras.

Para la colocación de tapones de cemento para aislar intervalos el método "TBT -- (True-Tubing Bridge)" es el más indicado ya que evita que el aparejo de produc-- ción tenga que ser sacado del pozo eliminando el riesgo de que la tubería de pro-- ducción pueda ser dañada, ahorrando equipo y tiempos de intervención en repara-- ciones mayores.

Parte del éxito de la operación consiste en seleccionar el método adecuado a las condiciones del pozo.

REFERENCIAS

- "Cementing Oil and Gas Wells". Seire de artfculos Publicados por la revista World Oil.
- "API Specification for Material and Testing for Well Cement". Segunda Edición, - junio 15 de 1984.
- "Manual de Cementaciones HALLIBURTON"
- "Manual de Cementaciones DOWELL SCHLUMBERGER"
- Francisco Garaicochea P., Miguel A. Benitez H.: "Apuntes de Terminación de Pozos" Fac. de Ingeniería, UNAM, 1985.
- Miguel A. Benitez H., Francisco Garaicochea P.: "Apuntes de Fluidos de Perforación", Fac. de Ingeniería, UNAM, 1988.
- Parsons, C.P.: "Plug-Back Cementing Methods", Trans., AIME (1936) 118, 187-194
- Salahub, W.F. and Ripley H.E.: "Good Procedures Insure Open Hole Plug Success", - World Oil (Jan 1979) 125-128.
- D.L. Bour, D.L. Sutton and P.G. Creel,: "Development of Effective Methods for Placing Competent Cement Plugs", SPE 15008 March 13-14, 1986.
- Crenshaw, P. L.: "Setting Cement Plugs for Sidetracking and Directional Drilling" Proc., 22nd Annual Southwestern Petroleum Short Course Assn., Lubbock, TX (1975) 7 - 12.
- Griffin, T.J. and Root, R.L.: "Cementing Spacers and Washes Improve Production", Oil and Gas J. (Sep 12, 1977) 115-122, 125.
- R.C. Smith, R.M. Beirute and G.B. Holman.: "Improved Method of Setting Successful Cement Plugs", J.P.T. (Nov. 1984).
- Nota Informativa: SCHLUMBERGER "Plus Plug", (The positive True Tubing Bridge -- Plug from Schlumberger), C-11896.
- Nota Informativa: Sentry Oilfield Equipment, "Secondary Spot Cementing", (1988)