



**FACULTAD DE INGENIERIA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FRANCISCO GARAICOCHEA PETRIRENA  
MANUEL BOUSIEGUEZ LIZARRAGA  
TOMAS BECERRA ARTEAGA

**TEMAS SELECTOS  
SOBRE  
CEMENTACIONES  
DE POZOS**

DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE EXPLOTACION DEL PETROLEO





## P R E F A C I O

*Quizás el resultado más valioso de toda educación es la capacidad para obligarse uno mismo a hacer lo que tiene que hacer y cuando debe hacerse, le guste o no. Esta es la primera lección a aprender.*  
T. HUXLEY.

En febrero de 1979 se firmó un convenio de colaboración entre la UNAM-PEMEX, IMP y el CIPM (Colegio de Ingenieros Petroleros de México). El objeto del convenio ha sido elevar el nivel académico de los alumnos del área de Ingeniería Petrolera en la Facultad de Ingeniería, tanto en licenciatura como de posgrado, así como crear el Doctorado, y promover la superación de un mayor número de profesionales que laboran en la industria petrolera, por medio de cursos de actualización y especialización.

Uno de los programas que se está realizando a nivel de licenciatura, dentro del marco del convenio, es la selección y traducción de artículos técnicos. El objetivo es formar colecciones de artículos sobre especialidades de Ingeniería Petrolera, que ayuden a complementar la instrucción de los alumnos. También se desarrolla esta actividad para promover, en Petróleos Mexicanos, la aplicación de técnicas que en otros países se emplean en forma extensiva y con resultados satisfactorios.

En los artículos de aquí se presentan se tratan temas relacionados con las cementaciones de pozos y tuberías de revestimiento. A continuación se presenta un resumen de estos artículos:

*Una Interpretación Científica para el Uso de Cementos Tixotrópicos.* En este artículo se presenta una explicación del comportamiento reológico de las lechadas tixotrópicas y se dan algunos lineamientos para su aplicación en la solución de problemas de pérdidas de circulación de las cementaciones forzadas.

*Método Mejorado para la Colocación con Éxito de Tapones de Cemento.* Una de las causas principales de la falla de los tapones es la inestabilidad de la lechada de cemento que se coloca sobre un lodo de menor densidad. En este artículo se presenta una técnica de diseño y de colocación de la lechada, basada en el empleo de una herramienta desviadora, que ha permitido realizar con éxito el taponamiento en campos donde la colocación de los tapones era difícil.

*La Cementación: Llenando el Vacío entre los Resultados de Laboratorio y las Operaciones de Campo.* Se mencionan diversas causas por las que fallan las cementaciones. Se sugieren procedimientos operativos, mejoras en los equipos, métodos de prueba y de control de calidad de la lechada, para realizar cementaciones satisfactorias. El autor concluye que a pesar de 50 años de investigación y desarrollo la cementación prima es aún más un arte que una ciencia.

*Desplazamiento del Lodo Durante las Operaciones de Cementación: Estado de Arte.* En este artículo se resumen los principales trabajos desarrollados sobre el tema del desplazamiento del lodo durante la cementación. Se discuten temas diversos, como el movimiento de la tubería, el acondicionamiento del lodo, la geometría del agujero, el diseño de los fluidos espaciadores, el uso de centradores y el control de la operación. En un apéndice se enlistan las actividades recomendadas para realizar la cementación.

*Una Técnica Probada para la Cementación de Tuberías Cortas en la Cuenca Greater Green River, Wyoming.* Se describe una técnica que ha permitido elevar el éxito de las cementaciones, del 20% al 100%. La técnica se desarrolló para resolver varios problemas relacionados con la cementación de tuberías cortas, como son: el acondicionamiento del lodo de perforación, el diseño de la lechada de cemento, el empleo de centradores, raspadores, fluidos espaciadores y limpiadores, y la utilización de empacadores.

*Soluciones a Problemas Relacionados con la Cementación de Pozos Desviados.* Se indica el efecto de las propiedades del fluido de perforación sobre la remoción de los materiales sólidos que se acumulan en la parte inferior de un agujero desviado durante su perforación. Utilizando un modelo de laboratorio a escala se investigó también el efecto de los centradores, del movimiento de la tubería y de los fluidos limpiadores, sobre la remoción de los materiales mencionados. Se presentan sugerencias para mejorar la cementación de pozos desviados mediante la eliminación del canal de sólidos asentados en el costado inferior del pozo.

Las traducciones no siempre se apegan con rigor a las versiones originales, ya que se realizaron procurando transmitir los conceptos y experiencias que los autores tratan de comunicar en sus escritos. Sin embargo pueden también ser útiles para mejorar el vocabulario de las personas que, interesadas en mantener sus conocimientos actualizados, han desarrollado el hábito del estudio de artículos que se editen en inglés.

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACION DEL PETROLEO

Noviembre de 1986



# I N D I C E

	PAGINA	
I	UNA INTERPRETACION CIENTIFICA PARA EL USO DE CEMENTOS TIXOTROPICOS	1
II	METODO MEJORADO PARA LA COLOCACION CON EXITO DE TAPONES DE CEMENTO	6
III	LA CEMENTACION: LLENANDO EL VACIO ENTRE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y LAS OPE RACIONES DE CAMPO.	26
IV	DESPLAZAMIENTO DEL LODO DURANTE LAS OPE RACIONES DE CEMENTACION: ESTADO DEL ARTE	52
V	UNA TECNICA PROBADA PARA LA CEMENTACION DE TUBERIAS CORTAS EN LA CUENCA GREATER GREEN RIVER, WYOMING	83
VI	SOLUCIONES A PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CEMENTACION DE POZOS DESVIADOS.	92

# UNA INTERPRETACION CIENTIFICA PARA EL USO DE LOS CEMENTOS TIXOTROPICOS

C. Clark Clement.

Artículo traducido de la revista  
J.P.T. de marzo de 1979, por Manuel  
Bousiéguéz Lizárraga y Francisco  
Garaicochea.

## INTRODUCCION.

Los cementos tixotrópicos se han usado en el campo por muchos años. Con estos sistemas de lechadas de cemento se han resuelto problemas complicados de pérdida de circulación y de cementación forzada. Sin embargo, en muchas ocasiones, en las que ha sido necesario el uso de estos cementos, para situaciones de cementación difíciles, se han empleado en su lugar cementos convencionales. Esta preferencia hacia las lechadas convencionales, ha sido motivada grandemente por la aprehensión al uso de los cementos tixotrópicos que exhiben propiedades físicas únicas, que nunca se han explicado completamente. Tampoco se ha establecido un procedimiento o guías de acción para usar los cementos tixotrópicos.

## DEFINICION.

En el pasado, se han definido las lechadas de cementos tixotrópicos, como lechadas que se comportan como un fluido al aplicarles un esfuerzo cortante, pero las cuales, al cesar este esfuerzo, se empiezan a gelificar. Una definición más completa y precisa es que una buena lechada tixotrópica es aquella que se mezcla con facilidad, pero en la cual se incrementa rápidamente su viscosidad, tanto a la temperatura ambiente como a la del fondo del pozo, a medida que la velocidad de corte se aproxima a cero. Además, este incremento en la viscosidad ocurre repetidamente, a medida que la velocidad de corte se incrementa y disminuye, alternativamente.

## PRUEBAS DE LABORATORIO Y RESULTADOS.

Con fines comparativos se midieron las propiedades reológicas de una lechada ligera de cemento común, 12.5 lb/gal, y las de un cemento tixotrópico típico, también de 12.5 lb/gal. Se usaron los mismos procedimientos, a 120°F, para ambas lechadas.

das.

En las Figs. 1 y 2 se comparan las características del esfuerzo cortante vs la velocidad de corte. Para la lechada tixotrópica, el esfuerzo cortante se incrementa significativamente a medida que la velocidad de corte aumenta (Fig. 1). Nótese que los valores del esfuerzo cortante mantienen una curva simple durante casi 20 minutos, antes de aumentar bruscamente. Este cambio brusco es típico de las lechadas tixotrópicas y es importante recordarlo cuando se emplean estas lechadas en el campo.

Como se esperaba, las propiedades reológicas fueron importantes para predecir las propiedades de flujo de ambas lechadas e indicaron la resistencia al corte relativa de las lechadas, a diferentes velocidades de corte y a diferentes tiempos. Al correlacionarlos a las condiciones dinámicas del agujero, estos valores indican el esfuerzo cortante necesario para iniciar y mantener el movimiento de la lechada, cuando el cemento está en la tubería y dentro de la formación.

El cemento puede ser bombeado en la tubería, siempre y cuando la lechada no se detenga por más de 20 minutos. Después de este tiempo la lechada sería inmóvil. Además, la lechada podría ser detenida y bombeada alternativamente, varias veces, siendo aún tixotrópica, según se observó en las pruebas.

#### UNA EXPLICACION MATEMATICA SIMPLIFICADA.

Las lechadas de cements tixotrópicos actúan de manera similar a los fluidos conocidos como plásticos de Bingham. Estos fluidos tienen dos propiedades que los describen: 1. Punto de cedencia,  $\tau_y$ ; 2. viscosidad plástica,  $\mu_p$ . A su vez, la presión requerida para que empiecen a fluir, se relaciona directamente con el punto de cedencia. La presión requerida para mantener el flujo continuo se relaciona directamente con la viscosidad plástica.

Para el flujo en una tubería:

$$\Delta P_y = \frac{\tau_y}{225 d} \quad (\text{Punto de Cedencia}) \quad (1)$$

$$\Delta P_p = \frac{\mu_p l_1 V}{1500 d^2} \quad (\text{Viscosidad Plástica}) \quad (2)$$

Combinando las Ecs. 1 y 2, para determinar la caída por fricción total, necesaria para iniciar y mantener el flujo en la tubería, resulta la siguiente ecuación:

$$\Delta P_f = \frac{\mu_p l_1 V}{1500 d^2} + \frac{\tau_y l_1}{225 d} \quad (3)$$



Ahora, considerando que el flujo dentro de la formación es el más crítico y determina si el cemento tixotrópico sella en realidad una zona, el flujo por una fractura o ranura puede describirse por:

$$\Delta p_y = \frac{\tau_y l_2}{400 W} \quad (\text{Punto de Cedencia}) \quad (4)$$

$$\Delta p_p = \frac{\mu_p l_2 V}{400 W^2} \quad (\text{Viscosidad plástica}) \quad (5)$$

Combinando una vez más las ecuaciones, se tiene:

$$\Delta p_f = \frac{\mu_p l_2 V}{4000 W^2} + \frac{\tau_y l_2}{400 W} \quad (6)$$

Donde:  $d$  = diámetro de la tubería, en pg.;  $l_1$  = longitud de la tubería, en pies;  $l_2$  = longitud de la fractura, en pies;  $\Delta p_y$  = presión requerida para mantener el flujo después de vencer el punto de cedencia, en lb/pg<sup>2</sup>;  $\Delta p_f$  = caída de presión total por fricción, en lb/pg<sup>2</sup>;  $\Delta p_y$  = presión necesaria para producir el flujo, en lb/pg<sup>2</sup>;  $\tau_y$  = punto de cedencia, en lb/100 pies<sup>2</sup>,  $\mu_p$  = viscosidad plástica, en cp;  $V$  = velocidad del fluido en pies/seg; y  $W$  = amplitud de la ranura, en pg.

Estas ecuaciones están simplificadas, pero permiten entender el incremento de la presión, dentro de la formación, provocado por las tendencias a gelificarse de los fluidos tixotrópicos. Además, debido a las características de alta pérdida de fluido de estas lechadas, la presión necesaria para iniciar y mantener el flujo se incrementará a medida que se incrementa la relación de sólidos, con respecto al agua, dentro de la formación. Esto va de acuerdo con el Ec. 6, la cual muestra que la presión se incrementa a medida que aumentan el punto de cedencia y la viscosidad plástica. Dentro de la formación misma, el cemento se volverá más viscoso y tenderá a gelificarse, lo cual provoca una resistencia creciente a fluir, a medida que la lechada pierde agua.

Muchos otros factores, además de los considerados en las ecuaciones anteriores, afectan el obturamiento de una formación con problemas. Sin embargo, aquí no pueden tomarse en cuenta todos estos factores, debido a que se requeriría un análisis completo de variables, tales como: las alturas de las fracturas, la presión de fracturamiento, la presión hidrostática, los gastos de bombeo, las amplitudes de las fracturas, el tipo de formación, etc. Sin embargo, pueden compararse los efectos de una lechada tixotrópica de 12.5 lb/gal con los de una lechada convencional, también de 12.5 lb/gal, para un caso particular, usando los datos del laboratorio y las ecuaciones de presión

en un ejemplo teórico (Tabla 1).

Se supone que la tubería de producción y la fractura están llenas con la lechada, y que las bombas se pararon. En las Tablas 2 y 3 se muestra que tanta presión tendría que aplicarse, a tiempos diferentes, para iniciar y mantener un flujo de 1 bl/min. Nótese que la lechada tixotrópica ofrece mucha mayor resistencia al flujo que la lechada convencional.

T A B L A 1

EJEMPLO TEORICO

Tipo de Trabajo: Cementación Forzada

Profundidad, pies	4000
Gasto de bombeo, bl/min	1
Diámetro de la Tub. de producción, pg.	2
Espesor de la fractura, pg.	0.1
Longitud de la fractura, pies.	50
Altura de la fractura, pies	10

T A B L A 2

LECHADA DE CEMENTO TIXOTROPICO DE 12.5 lb/gal

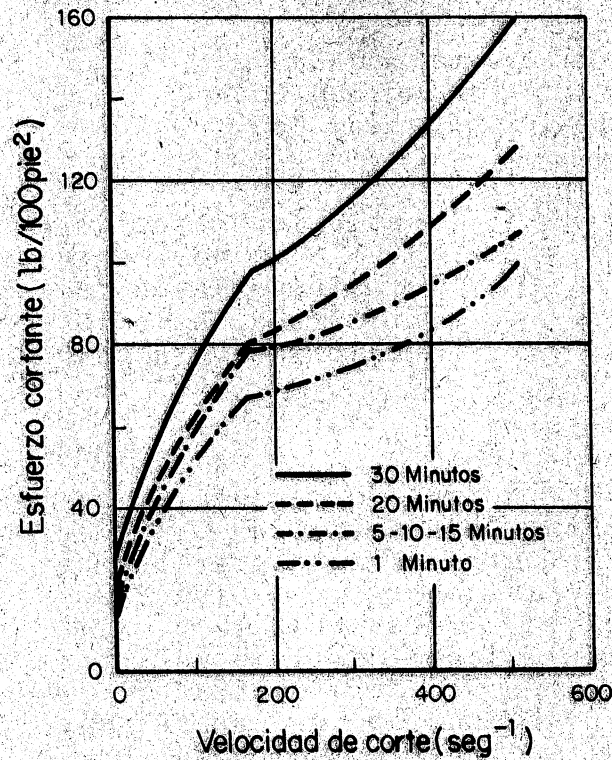
Tiempo (minutos)	$T_y$	$\mu_p$	Caída de presión en la Tubería	Caída de presión en la Formación
1	18	140	560	205
10	22	177	701	258
20	23	177	710	259
30	28	204	831	300

T A B L A 3

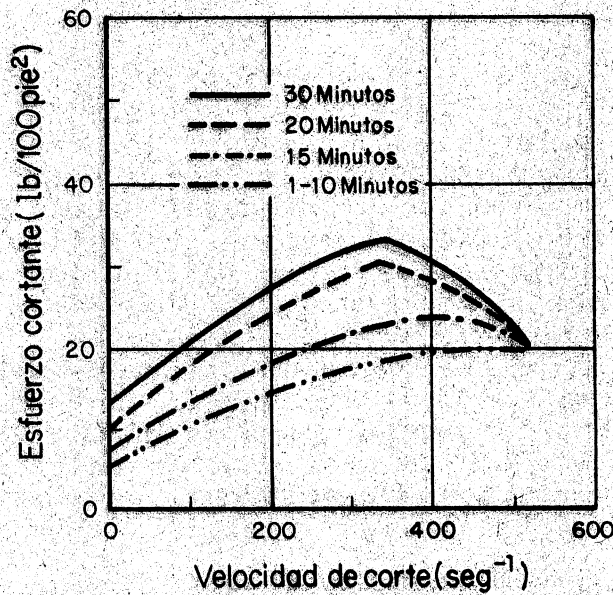
LECHADA DE CEMENTO CONVENCIONAL DE 12.5 lb/gal

Tiempo (minutos)	$T_y$	$\mu_p$	Caída de presión en la Tubería	Caída de presión en la Formación
1	5	23	110	36
10	7	23	128	39
20	13	35	216	62
30	19	36	272	70





**Fig 1 - Esfuerzo cortante vs velocidad de corte para una lechada tixotrópica de 12.5 lb/gal.**



**Fig 2 - Esfuerzo cortante vs velocidad de corte para una lechada convencional de 12.5 lb/gal.**



## METODO MEJORADO PARA COLOCAR CON EXITO TAPONES DE CEMENTO.

R.C. Smith, SPE, Amoco Production Co.  
R.M. Beirute, SPE, Amoco Production Co.  
G.B. Holman, SPE, Amoco Production Co.

Artículo traducido de la revista  
J.P.T. de noviembre de 1984, por  
el alumno Manuel Bousiéquez  
Lizárraga, bajo la supervisión de  
Francisco Garaicochea P.

### RESUMEN:

La colocación de tapones de cemento en agujero descubier-  
to ha sido históricamente una actividad difícil. Con frecuencia  
se requieren varios intentos para colocar tapones de cemento,  
antes de obtener uno que quede a la profundidad programada y  
que tenga la suficiente resistencia para permitir la desviación  
del agujero. El comportamiento de flujo inestable, resultante  
de una lechada de cemento de alta densidad que reposa sobre un  
lodo de baja densidad, es una de las causas principales de la  
falla de los tapones. La práctica común del uso de tubería fran-  
ca o tubería de producción, para colocar el tapón, es también  
un factor importante que contribuye al fracaso en la colocación  
de tapones. Este artículo presenta una técnica de colocación y  
de diseño de materiales que han permitido realizar con éxito el  
taponamiento en el primer intento en muchos casos de campos don-  
de la colocación de tapones era difícil. Se presentan varios ca-  
sos.

Para examinar el problema de la inestabilidad asociado  
con los tapones, se llevó a cabo una investigación experimental.  
Esta consistió en la colocación de tapones de cemento, de densi-  
dad y propiedades reológicas conocidas, en la parte superior de  
lodo de perforación, también de propiedades conocidas. Los ex-  
perimentos se realizaron usando tubería de plástico transparente  
(lucita), para simular el agujero o la tubería de revesti-  
miento (T.R.) y tubería de cobre como la de perforación (T.P.).  
En cada prueba, el agujero se llenó inicialmente con lodo de  
perforación. Luego, se desplazó cemento a través de la T.R. si-  
mulada, haciendo que el lodo saliera hacia el espacio anular.  
La capacidad del tapón de cemento, para permanecer en el lugar  
donde se le había colocado, fue observada visualmente y correla-  
cionada con otras observaciones experimentales. Este artículo  
incluye los resultados de esta investigación experimental.

La principal conclusión de esta investigación es que la  
estabilidad y calidad de un tapón de cemento para desviación o  
para cualquier otro propósito, puede ser mejorada enormemente a  
través del uso de la nueva técnica de colocación propuesta.

## INTRODUCCION.

A principios de 1980, se dirigió un proyecto de investigación para determinar las posibles causas de las constantes fallas en la colocación de tapones de cemento, particularmente los tapones que se usan para desviación, según se ha reportado de algunas áreas de operación. Estas fallas reportadas parecían más comunes cuando se introducían tapones en pozos con lodos de perforación de densidad menor de 10 lb/gal (1198 kg/m<sup>3</sup>).

Como parte de la investigación, se llevó a cabo un estudio detallado de la literatura publicada sobre el tema. Se estudiaron más de 150 artículos que trataban sobre muchos aspectos relacionados con la colocación de tapones de cemento. Para un estudio detallado, se seleccionó un grupo de artículos que parecían contener la información más importante. Estos artículos y otros más, se citan como referencias generales al final de este trabajo. El grupo de artículos seleccionados proporcionó un censo concerniente a técnicas y recomendaciones para el diseño de la lechada necesarias para la exitosa colocación de los tapones, (En el apéndice A se da una lista de las recomendaciones que se consideraron correctas).

Después de investigar varias de las fallas reportadas, se concluyó que, salvo algunas excepciones, se habían seguido las técnicas indicadas en el Apéndice A. Sin embargo, las fallas aún seguían ocurriendo. En un artículo anterior<sup>1</sup>, Beirute investigó el comportamiento de un tapón de cemento líquido, después de dejarlo solo en el pozo. Por medio de experimentos de laboratorio y un modelo matemático, demostró que las lechadas de cemento pesadas, colocadas arriba de lodos ligeros, forman interfaces inestables, las cuales, debido a las fuerzas gravitacionales adversas, pueden originar el flujo de los fluidos, contaminando el tapón, o haciendo que éste se mueva hacia abajo y, entonces, que ocasione la falla del trabajo del taponamiento. Sus observaciones, cuando estaba realizando los experimentos, concuerdan bastante bien con las descripciones de fallas de tapones de cemento reportadas en el campo. Como dichas observaciones se consideran muy importantes, se proporcionan en el Apéndice B.

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 ésta era el principal factor que contribuía a las fallas, particularmente cuando se colocaban tapones por el método de tapón 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, la intención de la investigación era descubrir las formas de controlar el problema.

## TRABAJO EXPERIMENTAL.

Los experimentos se realizaron en un pozo simulado construido de tubos de lucita transparente, de aproximadamente 18pg. (46cm) de largo y 1.75 pg. (4.4cm) de diámetro interior, como se muestra en la Fig. 1. Se hicieron algunas pruebas en tubos más largos (aproximadamente 3 pies (0.9m. de largo). Para simular la tubería de perforación (T.P.) se usó tubería de cobre, de 0.5 pg (1.3cm).

El lodo de perforación y las lechadas de cemento que se usaron en los experimentos, se mezclaron en la forma más parecida posible 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 (1078 kg/m<sup>3</sup>), en los experimentos. Este tipo de lodo es el que se usa con frecuencia. Se escogió debido a que proporcionaba la mayor diferencia de densidades entre la lechada y el lodo de perforación. Esta diferencia se tiene en la mayoría de las situaciones en las que se colocan tapones de cemento. En la Tabla 1 se proporciona una lista de los fluidos utilizados en los experimentos.

Los experimentos iniciales se realizaron para simular lo más realmente 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 mayor que la del lodo en el pozo. En la Fig. 2 se muestra un esquema que es típico de las publicaciones de compañías de servicio que usan tubería franca para la colocación de cemento. Esta figura presenta condiciones ideales: la tubería centrada en el agujero; los fluidos regresando por el espacio anular; una colocación uniforme del cemento y del colchón 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 colchón, arrojó resultados completamente diferentes a los que se muestran en la Fig. 2.

La Fig. 3 muestra un esquema más realista de lo que se observó en el laboratorio y que se cree ocurre en las aplicaciones de campo. Esta figura muestra: la tubería hacia un lado del pozo; una gran cantidad 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 de la Ref. 1, notó que la estabilidad de la interfase, entre la lechada de cemento y el lodo, era fundamental para el éxito del trabajo de taponamiento. También destacó que, aun en 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, podrían 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 realizados en este estudio 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 producción simulada. Se observó que la agitación creada por la lechada de cemento, al ser desplazada a través de la tubería de perforación franca simulada era, con frecuencia, suficiente para iniciar el flujo, aun antes de que se terminara de colocar completamente el tapón (ver Fig. 3). En otras palabras, la tendencia de los fluidos a fluir, cuando se colocan tapones, era un factor de control con mayor importancia que la que se le había dado originalmente en la Ref. 1.

Así, el problema no era sólo 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 ideas: una sobre el uso de una columna muy viscosa de bentonita, con el fin de crear un apoyo para la lechada, y la otra relacionada con el uso de una herramienta desviadora al final de la T.P., para cambiar la dirección de flujo de los fluidos: de vertical y hacia abajo, a horizontal y hacia arriba.

Cuando se usó la columna de bentonita adelante de la lechada, el procedimiento de colocación fue como se muestra en la Fig. 4. Primero, la columna de bentonita se colocó abajo del punto donde se colocaría el tapón. Luego, se jaló la T.P., hasta la parte superior de la columna de bentonita (que sería el punto donde se localizaría 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 poca densidad, sólo si se tenían cuidados extremos al colocar la columna de bentonita y la lechada de cemento.

Las lechadas de cemento de mayor densidad, que podían utilizarse para obtener un tapón regular, eran de 11.8 lb/gal. Todas las lechadas con densidades mayores a ésta se diluían en el lodo y se canalizaban hacia el fondo del cilindro de prueba (Fig. 3). Para obtener un tapón estable con tubería franca, la bentonita y la lechada debían bombearse lentamente y colocarse uniformemente a través del área del cilindro, moviendo la tubería alrededor de la sección transversal del cilindro, mientras se estaba bombeando.

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

Por otra parte, la columna de bentonita con frecuencia, se canalizaba hacia arriba, a través del lodo, y no tenía contacto con todo el cilindro. En esos casos, a medida que se colo

caba 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 la columna de bentonita, desplazando parte de ella, junto con el lodo de perforación, hacia arriba del espacio anular.

En una segunda serie de experimentos se utilizó una herramienta desviadora al final de la tubería, para colocar la columna espaciadora de bentonita y la lechada de cemento. La Fig. 5 es un esquema del diseño que se sugiere para la construcción de la herramienta desviadora. Esta se diseñó con el propósito de cambiar el patrón de los fluidos bombeados mecánicamente, de movimiento vertical hacia el pozo a uno lateral y hacia arriba por el espacio anular. Los resultados de estos experimentos, mostraron un marcado aumento en la estabilidad y calidad del tapón de cemento. La columna espaciadora 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 y la columna de bentonita, se pudieron colocar buenos tapones de cemento de 15.8 lb/gal y tapones regulares de 17.5 lb/gal en lodo de 9.0 lb/gal.

En la última serie de experimentos se utilizó la herramienta desviadora, pero no la columna espaciadora. Los resultados de tales experimentos verificaron la importancia de la herramienta desviadora 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 y más ligeras. Los intentos con lechada de 14.8 lb/gal fueron originalmente estables, pero al poco tiempo ésta se canalizaba lentamente hacia el fondo del cilindro, de la misma forma como lo reportó Beirutel. Lo mismo ocurrió con lechadas de cemento de mayor densidad a la de 14.8 lb/gal.

Los resultados de estos experimentos indican que el uso de la herramienta desviadora y de una columna espaciadora de bentonita, podría incrementar enormemente las posibilidades de obtener buenos tapones de cemento a las profundidades deseadas. La Fig. 7 muestra la forma correcta en que se recomienda usar la herramienta desviadora para colocar la columna de bentonita y la lechada de cemento. Como se indicó antes, la columna 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 subirá hasta justo encima de la columna de bentonita para colocar la lechada de cemento. Debe usarse el método de tapón balanceado por espaciamiento.

Es conveniente que el cemento quede, en el interior de la

T.P., sobre el nivel calculado para el fluido espaciador que quedará en el espacio anular.

#### COLUMNA DE BENTONITA

La columna de bentonita puede prepararse en el campo, adicionando bentonita a una porción de fluido de perforación existente, para hacerlo más consistente y darle mayor gelatinosidad. La columna de bentonita debe mezclarse lo más consistente que sea posible, pero debe permanecer bombeable. La cantidad máxima de bentonita que puede tolerar un lodo bajo en sólidos no dispersos, promedio, es de 25 a 30 lb/bl (71 a 86 kg/m<sup>3</sup>); es decir si el lodo contiene 15 lb/bl (43 kg/m<sup>3</sup>) pueden adicionársele de 10 a 15 lb/bl (29 a 43 kg/m<sup>3</sup>) al preparar el colchón o columna. En los experimentos se adicionaron 15 lb/bl (43 kg/m<sup>3</sup>) de bentonita para preparar un colchón con una viscosidad plástica de 61 y un punto de cedencia de 125, como se muestra en la Tabla 1. 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

La herramienta desviadora fuerza el flujo de fluidos hacia la pared del pozo. Esto permite una colocación más uniforme del colchón espaciador 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 mayor calidad.

#### CEMENTOS DISPERSOS.

Una de las recomendaciones originales de Beirute<sup>1</sup> fue reducir el uso de dispersantes en las lechadas 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.

Se piensa también que si se requiere un tapón con una alta resistencia, se debe mantener el uso de dispersantes al mínimo para poder lograr la estabilidad del tapón.

#### COMPATIBILIDAD LODO/CEMENTO

Otra observación importante fue la reacción entre el lo-



do y el cemento, cuando se mezclaban, mientras se colocaba el cemento. Como se esperaba, las mezclas de lodo y cemento tendían a gelificarse o espesarse al establecer contacto. En aplicaciones reales de campo, la gelificación podría contribuir a la estabilidad del tapón de cemento, particularmente si la mezcla se extiende a través del área del pozo. Esta incompatibilidad podría explicar por qué, en algunos casos, se colocan exitosamente, al primer intento, tapones de alta densidad en lodos de perforación de baja densidad.

#### CEMENTOS TIXOTROPICOS.

En la Ref. 1 también se recomendaba el uso de cementos tixotrópicos, que pudieran gelificarse rápidamente, que fueran viscosos y que tuvieran puntos de cedencia altos, para incrementar la estabilidad del tapón de cemento.

Obviamente, la alteración de las propiedades reológicas de la lechada es otro aspecto que puede contribuir a la estabilidad del tapón. Sin embargo, se piensa ahora que el incremento de la reología de la lechada de cemento no es tan efectivo, en el mejoramiento de la estabilidad del tapón de cemento, como lo es el uso de la herramienta desviadora y la columna espaciadora de bentonita.

#### APLICACIONES DE CAMPO.

Las aplicaciones de campo del procedimiento de colocación mejorada, con el uso de la herramienta desviadora y de la columna de bentonita, han sido bastante exitosas. La cantidad de fallas de los tapones ha disminuido considerablemente, en todas las áreas en las que se ha aplicado la técnica expuesta. Ahora es común obtener buenos tapones de cemento en el primer intento. Es posible construir una herramienta desviadora simplificada, tapando el extremo inferior de la tubería de producción o de perforación y luego perforar de 6 a 8 agujeros de 0.75 a 1 pg. 2 a 2.5 cm a un lado del tubo.

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

De los muchos éxitos que se han reportado, se seleccionaron los siguientes para ilustrar la aplicación del método. En la tabla 2 se enlistan los parámetros utilizados en cada caso de los que a continuación se discuten:

##### Caso de Campo 1.

En la operación se utilizaron tanto la herramienta desviadora como la columna de bentonita. El volumen del colchón fue de 10 bl (1.6 m<sup>3</sup>). El tapón se colocó por el método de tapón balanceado y se usó agua como espaciador. La tubería de perforación no se movió durante la operación. Después de 24 horas se tocó el tapón y luego se usó exitosamente para desviar el pozo.

El cemento se perforó a 6 min/pie (20 min/m) aplicando 2500 lb (11,340 Kg) de peso sobre la barrena y 60 rpm.

#### Caso de Campo 2.

La columna de bentonita se preparó usando un total de 25 lb/bls (718 kg/m<sup>3</sup>) de bentonita y 24 bl (3.8 m<sup>3</sup>) de lodo de bajo contenido de sólidos no dispersos. Se usó la herramienta desviadora en la operación. Se usaron aproximadamente 40 bl (6.4 m<sup>3</sup>) de un espaciador con una densidad de 14.7 lb/gal (1761 kg/m<sup>3</sup>) adelante de la lechada. La operación se desarrolló usando el método del tapón balanceado. La tubería de perforación no se movió durante el trabajo. El tiempo de fraguado fue de 24 horas. El tapón se tocó a 14860 pies (4529m) con 10 000 lb (4536 kg) de peso sobre la barrena. De 14860 a 15,050 pies (4529 a 4587m), se perforó el cemento ya fraguado, con 10000 lb (4536 kg) de peso y 55 rpm., a velocidades que variaban desde 1 a 4.5 min/pie (3 a 15 min/m). El tapón se usó con éxito para desviar el pozo por medio de un motor de fondo y una barrena, para desviación, de diamantes.

#### Caso del Campo 3.

No se usó la columna de bentonita en esta operación, también, se alteró la herramienta desviadora ya que se abrió un agujero de 0.75 pg. (2 cm) casi en el extremo de la herramienta (prácticamente como una tubería franca). Se usaron 10bl (1.6 m<sup>2</sup>) de agua adelante de la lechada y 1 bl (0.16 m<sup>3</sup>) atrás de la misma. Se usó el método de tapón balanceado en este trabajo. Se le imprimió un movimiento recíprocante o alterno a la tubería de perforación. Después de esperar 20.5 horas a que fraguara el cemento, se perforaron secciones de cemento a 11015 pies (3357m). Se perforó cemento sólido a 2.5 min/pie (8 min/m) desde 11265 a 11300 pies (3436 m a 3444m) con 20000 lb (9072 Kg) de peso sobre la barrena y 60 rpm. Se encontró cemento blando de 11300 a 113999 pies (3444 a 3474m) (parte superior del pescado).

Por supuesto, esta operación no tuvo éxito. Sin embargo, se incluye aquí, para ilustrar los problemas asociados al método convencional (tubería franca) de colocación de tapones. Se colocó un segundo tapón de cemento usando el método mejorado y se incluye a continuación como el caso 4.

#### Caso de Campo 4.

Tampoco se usó la columna de bentonita en este caso, pero se cerró el agujero en el fondo de la herramienta desviadora. Se bombearon 20 bl (3.2 m<sup>3</sup>) de agua adelante de la lechada y 5.8 bl (0.9m<sup>3</sup>) atrás. Se empleó otra vez el método de tapón balanceado. El tiempo de fraguado fue de 27.5 horas. Se encontraron porciones de cemento a 11,260 pies (3432 m), pero el cemento fraguado se tocó a 11295 pies (3443m). Se perforó el cemento desde esta profundidad hasta 11,326 ft (3443 m a 3452m). Este tapón tuvo éxito, así como también la desviación del pozo.





bastante inestable, y por lo tanto, esta inestabilidad es un factor determinante del trabajo de taponamiento.

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 densidad entre el lodo y el cemento. Esta conclusión se basa en los resultados que se obtuvieron de un modelo, sin escalar, de un pozo.

3. De los experimentos realizados, se encontró que el uso del colchón de lodo con la adición de bentonita (colchón o columna de bentonita) por sí mismo, sin la herramienta desviadora, no fue generalmente efectivo. En esta forma, el incremento en la estabilidad del tapón de cemento, durante y después de la colocación del cemento, fue suficiente para permitir una diferencia de densidad máxima del cemento sobre el lodo de sólo 2.8 lb/gal (335 kg/m<sup>3</sup>).

4. La colocación de la columna de bentonita y del tapón de cemento, por medio de la herramienta desviadora al final de la tubería de perforación, incrementó la estabilidad del tapón durante y después de su colocación, permitiendo una máxima diferencia de densidad, de cemento sobre lodo, de 6.8 lb/gal (315 kg/m<sup>3</sup>). Bajo condiciones óptimas, fue posible obtener un tapón apropiado con una diferencia de densidad de hasta 8.5 lb/gal (1019 kg/m<sup>3</sup>).

5. La colocación del cemento por medio de la herramienta desviadora, sin el uso de la columna de bentonita, dio como resultado la obtención de un buen tapón de cemento para una diferencia de densidad máxima, entre el cemento y el lodo, de 4.8 lb/gal (575 kg/m<sup>3</sup>).

6. Las lechadas de cemento con dispersantes (adelgazadores) parecen más susceptibles a la dilución y a la inestabilidad.

#### RECOMENDACIONES.-

Para colocar con éxito tapones de cemento se recomienda seguir los procedimientos indicados en el Apéndice A. Además, el uso de la herramienta desviadora y de la columna de bentonita para la colocación del tapón, debe considerarse como elemento esencial para la obtención de buenos tapones al primer intento. Finalmente también se consideran como ingredientes básicos para el éxito, las prácticas de un buen control de calidad, similares a las explicadas por Smith<sup>2</sup>, antes y durante la operación.

#### REFERENCIAS.

1. Beirute, R.M. "Flow Behavior of an Unset Cement Plug in Place". SPE 7589, 1978.
2. Smith, R.C.: "Checklist Aids Successful Primary Cementing". Oil and Gas. J. Nov. 1982.

## APENDICE A

### Técnicas y recomendaciones para colocar tapones de cemento.

#### Antes de colocar el cemento:

1. Determine con precisión la temperatura de circulación del pozo a la profundidad donde se va a colocar el tapón.
2. Calibre el intervalo: determine con precisión el volumen del agujero para calcular el volumen de lechada.
3. Seleccione el lugar donde se colocará el tapón, de la información obtenida de los registros y de la curva de velocidad de perforación.
4. Obtenga muestras del lodo, mézclelo con agua del lugar, y realice pruebas de compatibilidad.
5. Circule lentamente el lodo en el pozo, para obtener propiedades uniformes del lodo y para reducir la posibilidad de romper el esfuerzo gel del lodo que se encuentra abajo del punto de circulación. Las propiedades deseables en el lodo son: una viscosidad (de embudo) de 45 a 80 segundos, una viscosidad plástica de 12 a 20, un punto cedente de 1 a 5, y una pérdida de fluido que sea tan baja como práctica.
6. Asegúrese que el pozo esté completamente estático; es decir, que no haya filtración de gas, flujo de fluidos o pérdida de circulación.

#### Diseño del Espaciador.

1. Use el fluido espaciador adelante y atrás del cemento para mejorar el desplazamiento y reducir la contaminación.
2. El volumen del espaciador debe ser tal que tenga una altura en el espacio anular de 500 a 800 pies (152 a 244m) dependiendo de las condiciones del pozo y de la compatibilidad del lodo y el cemento. Iguale la altura del fluido espaciador que va atrás del cemento, a la del que se encuentra en el espacio anular en el momento en que todo el cemento ha salido de la tubería de perforación.
3. El tipo de espaciador debe ser compatible con el cemento y con el lodo de perforación. No debe haber una gelatinosidad excesiva cuando se mezcle con cualquiera de los dos.

Para lodos base agua, de baja densidad, se recomienda un fluido lavador. A éstos no se les puede densificar; pero, por otro lado, pueden tener baja pérdida de fluido y son excelentes para agujeros perforados con aire o gas (para reducir las presiones de tratamiento). Se puede también usar agua.

Para lodos base agua, de densidades altas, se recomienda un espaciador. Estos pueden densificarse con siderita, hematita, barita, y otros materiales densificantes; también pueden tener baja pérdida de fluido.

Los lodos base aceite requieren de un espaciador capaz de desplazar este tipo de lodos. Generalmente contienen surfactantes. Se recomienda un surfactante mojante de agua para incrementar la adhesión del cemento con la formación.

4. El fluido espaciador debe tener una densidad de 0.5 a 1 lb/gal mayor que la del lodo. Si es posible, mantenga la densidad y la viscosidad del espaciador en el rango formado entre la del lodo y la de la lechada.
5. Coloque los espaciadores y lavadores; bombee a condiciones de flujo turbulento si es posible; las fluctuaciones en el bombeo deben reducirse en número y duración.

#### LA LECHADA DE CEMENTO.

1. Use cemento clase A, C, H o G. Donde sea posible, use lechadas de cemento viscosas con altos puntos de cedencia y cementos tixotrópicos que se gelifiquen rápido. Minimice el uso de adelgazadores en la lechada. Para temperaturas arriba de los 230°F, use material fino, sílice o harina de sílice.
2. Por lo general, las densidades de la lechada deben variar de 15.6 a 17.5 lb/gal. La densidad de la lechada debe ser siempre más alta que la del espaciador.
3. El tiempo de bombeo no debe ser mayor al tiempo de la operación, más media hora.
4. La longitud del tapón en el pozo debe ser de 300 a 600 pies, dependiendo de los requerimientos del tapón. (como sugerencia, en formaciones duras, use un tapón de mayor longitud que para formaciones suaves). En pozos con agujeros agrandados use de un 25 a 50% más de cemento.
5. Mezcle el cemento: si se necesita un mezclado uniforme de cemento, use una bomba que permita el mejor control de la densidad del cemento. Se recomienda, cuando sea posible, bombear la lechada a un tanque de almacenamiento



antes de que se bombee al agujero.

#### COLOCACION:

1. Use el método balanceado o el de dos tapones. Si se usa este último no corte el tapón de abajo.
2. Bombee el cemento a gastos bajos (flujo tapón) si es posible.
3. Gire la tubería de perforación mientras se desplaza el espaciador y la lechada de cemento; no le imprima un movimiento recíprocante. Después de colocar el tapón, evite las perturbaciones; saque la T.P. lentamente; quite las conexiones con cuidado.
4. Utilice en la parte inferior de la tubería, una de diámetro pequeño (de junta lisa). Use centradores en la parte más baja de la tubería para centrarla. Use raspadores rotatorios para limpiar el pozo, si no se lava.

#### TIEMPO DE ESPERA:

1. Deje pasar de 12 a 24 horas. Por cada hora de tiempo de espesamiento de la mezcla deje pasar 4 o más horas. El tiempo de espera para reanudar las operaciones puede reducirse al mínimo ajustando el tiempo de espesamiento al de la colocación del tapón, más media hora.

## APENDICE B.

### Observaciones Experimentales de la Ref. 1.

Lo siguiente es un resumen de lo más importante que se observó durante el desarrollo de los estudios experimentales de la Ref. 1.

1. Frecuentemente, cuando la interfase más baja que se forma entre los líquidos pesados y ligeros se comportaba de manera inestable, el flujo empezaba casi inmediatamente después de que los fluidos se dejaban solos. Este flujo inestable siempre acontece en forma rápida, provocando que los fluidos se mezclen en forma considerable.
2. Por otro lado, las interfaces estables fluían muy lentamente, con poca o ninguna mezcla de los fluidos.
3. En algunos experimentos que presentaban poco o nulo movimiento, se podía iniciar el flujo vibrando la tubería. Una vez que se había inducido el movimiento, el tapón continuaba fluyendo hacia el fondo del recipiente.
4. Algunas veces, aun en flujo estable, parte de la fase pesada se separaba del cuerpo principal de fluido, y fluía hacia el fondo. Otras veces, estas partes eran lo suficientemente largas como para fluir un momento, para luego alojarse en algún lugar de abajo, originando con ello que se produjera un tapón que contenía porciones de fase ligera atrapada atrás de la fase pesada.
5. Con frecuencia, todo el tapón de fase pesada se "resbala" hacia abajo de la tubería, con la fase ligera naturalmente fluyendo hacia arriba por la zona anular. Otras veces el proceso de flujo parecía ocurrir en la parte de abajo del tapón, quedando la interfase superior visualmente inmóvil.
6. Sólo en algunas ocasiones se observó aire en el sistema, debido a las dificultades que se tenían para sellar el instrumento o dispositivo de prueba. Si este gas fluía hacia la interfase más baja, la presencia de esta tercera fase alteraba el sistema lo suficiente como para provocar el flujo, aun cuando los fluidos hubieran estado originalmente estáticos. Se observó que aun pequeñas cantidades de aire podían provocar este problema.
7. Se realizaron pruebas con sistemas reales de cemento y lodo. Sin embargo el proceso de flujo fue muy difícil de observar, debido a la opacidad de los fluidos. De lo que se pudo observar, estos fluidos se comportaban de manera similar al lodo con barita y a dispersiones con polímeros, utilizados para preparar los fluidos usados en los experimentos.

T A B L A No. 1: PROPIEDADES REOLOGICAS DE LOS FLUIDOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS

FLUIDO	M A T E R I A L	DENSIDAD lbm/gal	DISPERSANTE DE CEMENTO	ESFUERZO GEL A 3 RPM		LECTURA DEL VISCOSIMETRO						PC	CONSISTENCIA A 20 MIN Bc(Bearden)	
				10 seg	10 min	600	300	200	100	6	3			VP
1	Lodo BCSND*	9.0		2	12	33	20	--	--	--	--	13	7	--
2	Colchón 1, 10 lb/b1	9.1		25	60	105	77	--	--	--	--	28	49	--
3	Colchón 2, 15 lb/b1	9.1		80	122	247	186	--	--	--	--	61	25	--
4	Colchón 3, 18 lb/b1	9.2		150	ME**	345	265	--	--	--	--	80	185	--
5	Clase G, 30% de H2O	17.5	1.25			201	101	65	31	1	1	100	1	5
6	Clase G, 44% de H2O	15.8	0			115	74	62	49	18	11	41	33	6
7	Cemento G, aereado	13.8	0			166	103	84	64	20	11	63	40	7
8	Cemento G, aereado	11.8	0			207	135	205	75	18	11	72	63	9
9	Clase G, 30% de H2O	17.5	0.75			230	119	85	47	5	4	111	8	8
10	Clase G, 44% de H2O	15.8	0	13		124	83	71	55	19	12	41	42	
11	Clase G, 38% de H2O	16.4	0	15		217	162	130	100	29	19	55	107	
12	Cemento G, aereado	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.



PARAMETROS DE LOS CASOS DE CAMPO

C A S O S D E C A M P O

1 2 3 4 5

Localización del Campo

Alaska Wyoming Alaska Alaska Alaska

Alaska

Parte Sup. del Tapón (ft)

10,445

Parte Inf. del Tapón (ft)

10,534

Inclinación del Pozo con respecto a la vertical (promedio) en grados

10.25

Diámetro del Pozo (pulg)

8.5\*\*

Diámetro de la T.P. (pulg)

4.5

Lodo (BCSNI) \*

4.5

Densidad (lbm/gal)

9.5

Viscosidad Plástica (VP)

12

Punto Cedente (PC)

14

Esfuerzo Gel a 10 minutos

12

Tiempo de Bombeo (min)

240

Mezclado

DO\*\*

Lechada

G puro  
a 15.8 lb/gal

Clase G

+ 35% de polvo sílice  
+ 0.75% dispersante  
+ 1.2% retardador

Clase G

+ Disp. Líquido  
+ Ret. Líquido  
+ 3.44 gal/seco H<sub>2</sub>O

Clase G

+ Disp. Líquido  
+ Ret. Líquido  
+ 3.44 gal/seco H<sub>2</sub>O

Clase G

+ Disp. Líquido  
+ Ret. Líquido  
+ 3.44 gal/seco H<sub>2</sub>O

+ 5.1 gal/seco H<sub>2</sub>O  
a 16.7 lb/gal

+ 17.5 lb/gal

+ 17.5 lb/gal

+ 17.5 lb/ε

\*Bajo contenido en sólidos no dispersos.

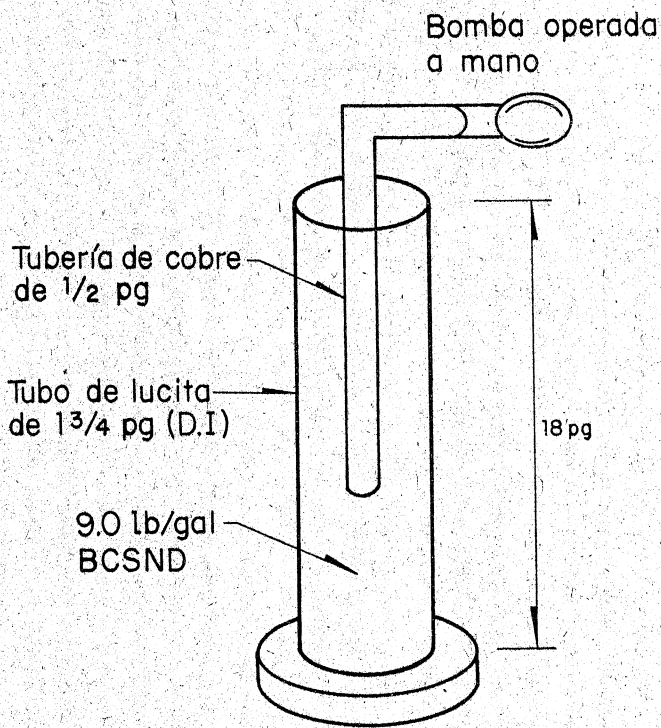


Fig 1. Aparato de prueba

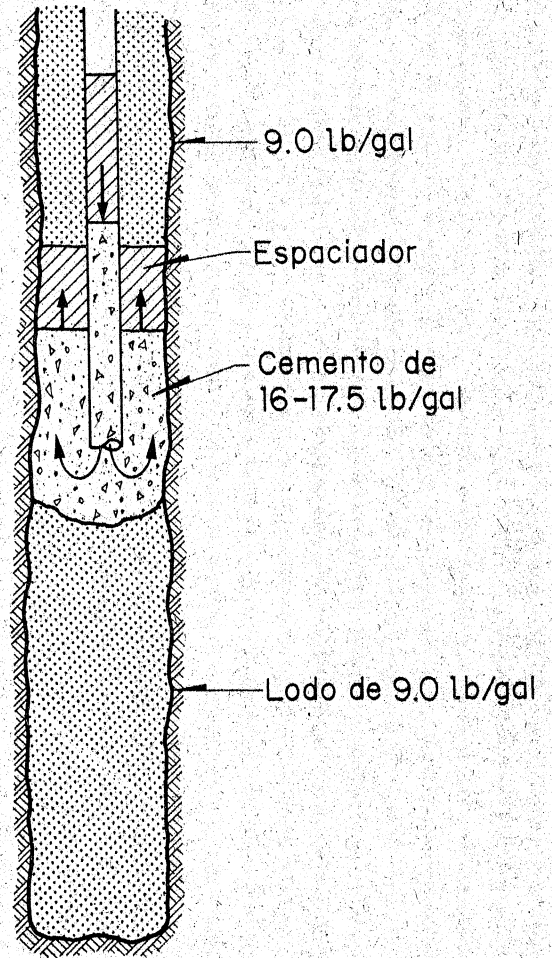


Fig 2. Caso ideal

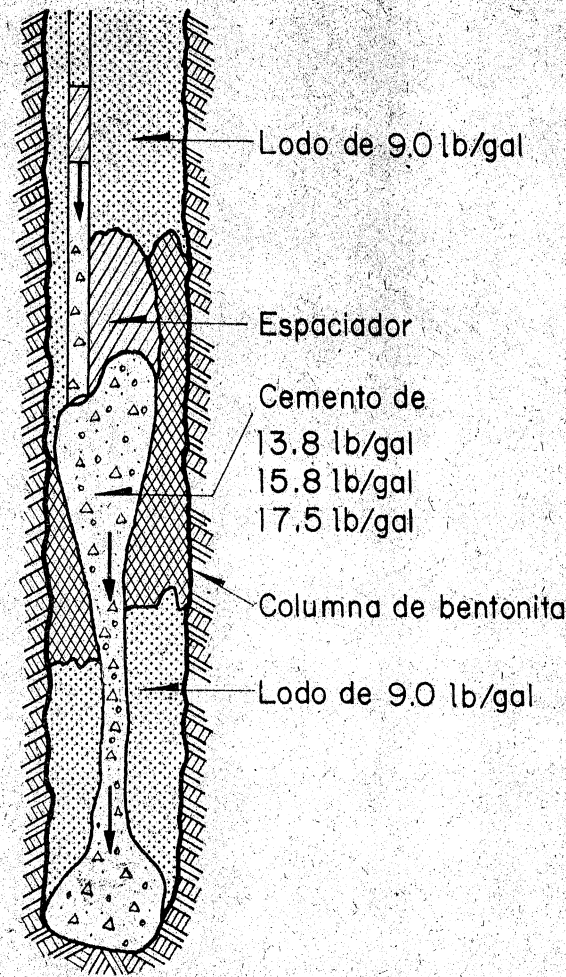


Fig 3 . Resultado experimental de una interface inestable

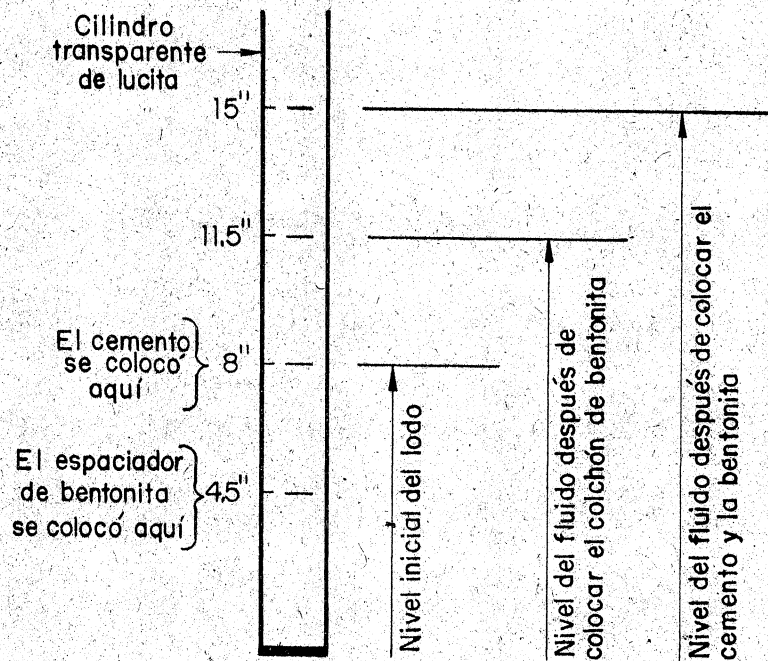


Fig 4 . Procedimiento de colocación del tapón.



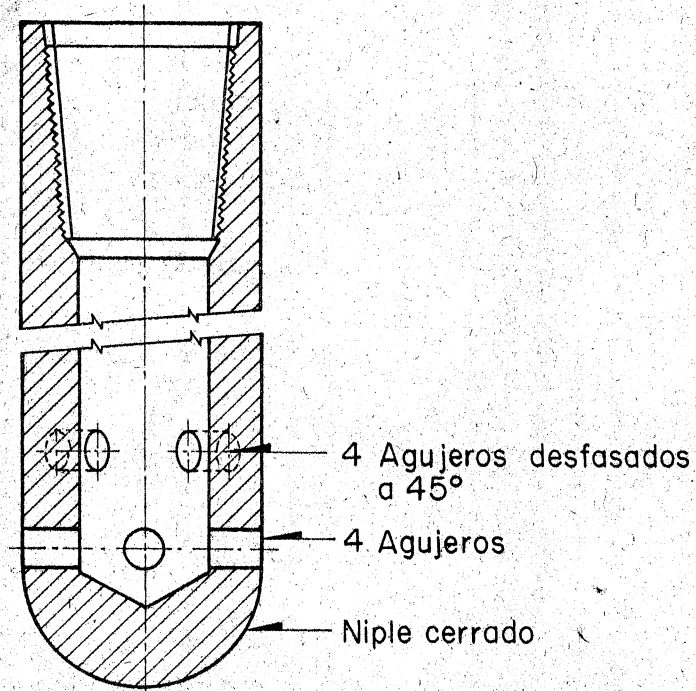
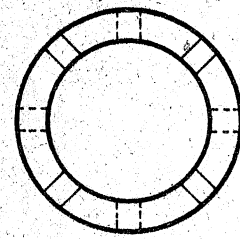


Fig 5. Herramienta desviadora

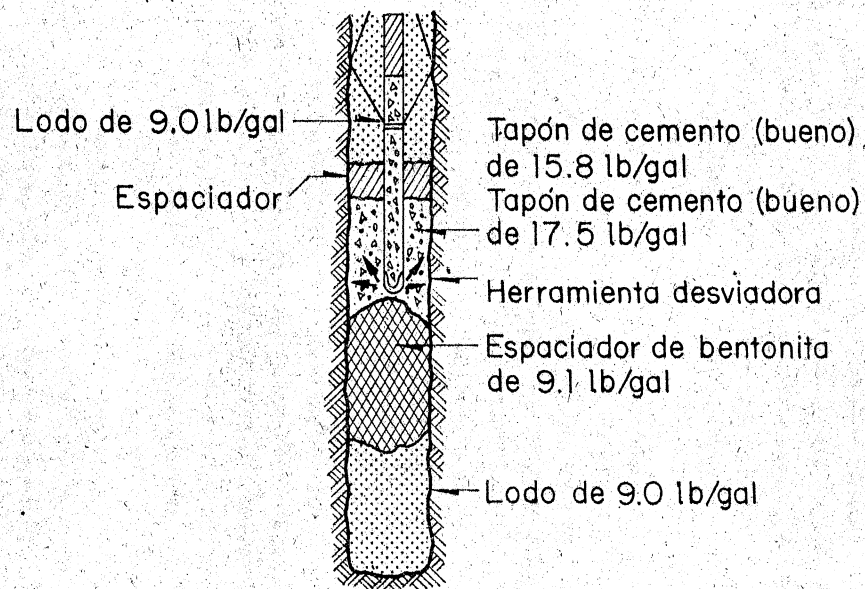


Fig 6. Resultados experimentales

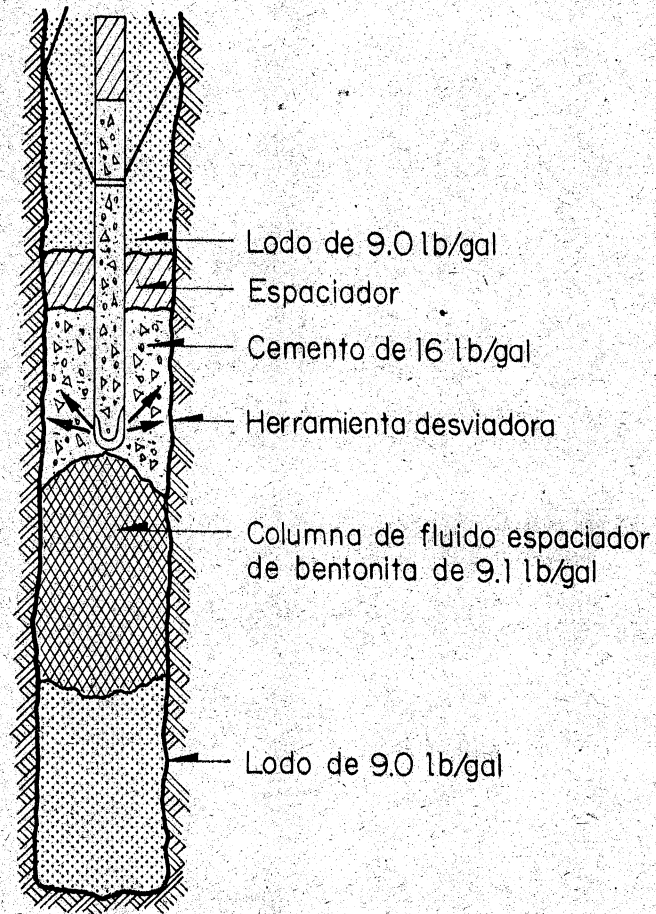


Fig 7. Técnica recomendada

## LA CEMENTACION: LLENANDO EL VACIO ENTRE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y LAS OPERACIONES DE CAMPO.

Edwin S. Arnold, SPE Phillips Petroleum Co.

Artículo traducido de la revista J.P.T. de diciembre de 1982 por Manuel Bousiéquez L. y Francisco Garaicochea P.

### RESUMEN:

En los estudios básicos sobre el desplazamiento de lodo se ha empleado lo que se considera una simulación realista de las condiciones del pozo; pero la aplicación de la tecnología en el campo se dificulta, debido al efecto de tubo en U que se tiene en un pozo real. Existe más probabilidad de cometer errores en el campo, porque el trabajo depende de mucha gente que quizá no entiende los fundamentos del proceso.

### INTRODUCCION:

Un trabajo efectivo de cementación primaria es el primer paso y el vital para lograr una buena terminación del pozo. El trabajo de cementación primaria es único, puesto que ofrece la mejor oportunidad para desplazar de manera efectiva el lodo del espacio anular, con una lechada de cemento. Los trabajos de cementación, en la actualidad, tienen que resistir presiones de formación mayores a las que se tenían hace una generación y quizá se requieran para el aislamiento de varias zonas potenciales productoras.

Desde hace mucho la cementación se ha considerado más un arte que una ciencia, aunque la literatura sobre la aplicación de principios científicos, para superar el nivel de arte, se remonta a más de 50 años. Se ha investigado mucho para resolver problemas específicos y para desarrollar cementos mejorados, aditivos y productos que satisfagan una amplia variedad de necesidades. Tales mejoras son, por lo general, tangibles y se divulgan por toda la industria a través de la publicidad y de los vendedores. En la discusión que sigue se supone la selección de un cemento adecuado y se dedica hacia otros aspectos del trabajo.



Son tres los problemas principales que provocan el vacío que existe entre la investigación de laboratorio y las operaciones de campo: (1) una falla general de conocimiento entre el personal de campo en lo que se refiere a los principios básicos que se han establecido a partir de la investigación; (2) la imposibilidad de ver el proceso de desplazamiento del lodo, desde el fondo del pozo; y (3) la necesidad de superar las deficiencias que se presentan en la ejecución de los trabajos de cementación.

El propósito de este artículo no es resolver todos los problemas involucrados, sino esclarecerlos. Se espera disminuir o eliminar dichos problemas mediante mayor investigación, análisis, capacitación, equipo mejorado y mayor divulgación de la tecnología disponible a todos aquellos que tienen que ver con la planeación y ejecución de las operaciones de cementación.

#### FALTA DE UN CONOCIMIENTO BASICO.

La investigación de los principios del proceso de cementación ha continuado a través de los años y ha alcanzado mayores niveles de realización. Aun así es obvio que muchos ingenieros en el campo, que trabajan para compañías de servicio en las que se realiza una investigación continua, no están enterados de la importancia del trabajo o de las conclusiones principales obtenidas de dichas investigaciones. Hay otros que son nuevos en la industria y que todavía no han tenido experiencia en las operaciones de cementación. Finalmente existen ingenieros en puestos administrativos, así como gente sin capacitación técnica, que, por sus muchas obligaciones, no se han actualizado en lo que se refiere a la cementación. Este grupo puede tomar decisiones en base a los conocimientos de cementación que aprendieron con anterioridad. Estas situaciones contribuyen a dificultar la aplicación de la tecnología actual a las operaciones de campo.

Para quienes no hayan seguido los avances de la tecnología de la cementación, se recomiendan, a manera de antecedentes, dos resúmenes excelentes sobre la cementación de pozos de aceite y gas, uno escrito por Smith<sup>1</sup> en 1976 y el otro por Suman y Ellis<sup>2</sup> en 1977. Ambos trabajos presentan una extensa bibliografía. Cuando se seleccionó el título de este artículo, se pensó que era original. Sin embargo, se encontró posteriormente, esta frase en el prefacio del editor, de la serie de Suman y Ellis<sup>2</sup>: "Desafortunadamente, una gran cantidad de investigación importante y de desarrollo técnico, no se han interpretado y aplicado directamente a la fase operacional de manera íntegra y concisa. El objetivo de los autores de esta nueva serie exclusiva es llenar el vacío que existe entre la investigación y las operaciones de campo". Han pasado 5 años y se han publicado investigaciones adicionales excelentes, pero por las observaciones que he hecho en lo personal, el vacío aún necesita llenarse.

O'brien<sup>3</sup> escribió sobre los problemas en las operaciones de campo desde un punto de vista personal y estableció: "Con todo el esfuerzo de "ingeniería" dedicado a las operaciones de terminación y producción, aún existe tanto misterio en esta fase como en cualquier otra". También observó: "Aunque todavía existe mucho de arte diseminado en la ciencia que aplicamos, estamos tratando con una operación de ingeniería. La ingeniería y la "lógica ingenieril" deben aplicarse en el nivel de la operación".

#### PLANEANDO CON LA TECNOLOGIA DISPONIBLE.

No es necesario investigar en la literatura sobre el tema, desde el principio. Algunos de los artículos más recientes son el resultado de muchos años de investigación de varias personas. Haut y Crook<sup>4,5</sup> han seguido y reafinado parte de los trabajos de McLean et al. <sup>6</sup>, Clark y Carter<sup>7</sup> y otros. Las rigurosas pruebas realizadas por ellos, sin mover la tubería, en un espacio anular de 5 x 6 1/2 pg, con permeabilidad, dieron como resultado las siguientes conclusiones sobre el desplazamiento del lodo. Estas conclusiones deberían guiar, actualmente, gran parte de la planeación y ejecución en el campo.

1. Nunca se obtuvo un desplazamiento completo del lodo en los lugares donde existía permeabilidad. El lodo que perdió su fluidez, debido a la filtración, nunca fue desplazado.
2. La más pequeña descentralización de la tubería, en un espacio anular estrecho, provocaba que se dejara sin desplazar un canal de lodo.
3. Las altas velocidades de circulación de la lechada de cemento en el espacio anular, dieron como resultado un incremento en el desplazamiento del lodo, aun cuando no se tuviera flujo turbulento.
4. El desplazamiento también se mejoró incrementando la movilidad de lodo, mediante: a) la reducción de la pérdida por filtración a la formación y b) la reducción del esfuerzo gel a 10 minutos (gel 10).
5. Bombear un cemento con alto punto de cedencia, a bajas velocidades no fue efectivo para el desplazamiento de lodo.
6. A bajas velocidades del cemento, el desplazamiento no se afectó apreciablemente por el volumen de fluidos bombeados a gastos bajos. Una vez que el cemento establecía una trayectoria de flujo, continuaba siguiendo dicha trayectoria con poca o ninguna desviación.
7. Incrementar la diferencia de densidad entre el lodo y el cemento, de cero a 3 lb/gal, no mejoraba el desplazamiento total. El lodo, que había perdido su movilidad, tenía una densidad mucho mayor que el cemento, de manera que no existía ninguna fuerza de empuje en la zona del problema del lodo.



8. El uso de un fluido espaciador de baja viscosidad y densidad, entre la lechada de cemento, puede mejorar la movilidad del fluido de perforación y mejorar posteriormente su movilidad mediante la erosión del enjarre del lodo.

Además, Manry et al<sup>6</sup>, Clark y Carter<sup>7</sup>, y otros, han concluido, a partir de su trabajo, que es necesario el movimiento de la tubería, ya sea éste reciprocante (hacia arriba y abajo), por rotación, o ambos, si es que existe cualquier excentricidad de la T.R. en el pozo.

Aún cuando la tubería de revestimiento esté equipada con una gran cantidad de centradores, es poco probable que se tenga un agujero vertical a través de la zona que va a ser cementada y que la tubería de revestimiento esté perfectamente concéntrica. Por lo tanto, debe planearse el movimiento de la tubería como método usual. Sin embargo, debe hacerse todo el esfuerzo para mejorar el proceso de desplazamiento del cemento en el caso en que surjan circunstancias que impidan el movimiento de la tubería. Esta no es una época de economías falsas. Si se consideran el costo y las pocas probabilidades de éxito de un trabajo de cementación forzada y se comparan con la realización de un trabajo cuidadoso de cementación primaria, no se debe dudar al tomar la decisión.

Debe usarse un lodo con poca pérdida de agua y bajo esfuerzo gel, antes de perforar cualesquier zona potencial de interés, para incrementar la eficiencia del desplazamiento. Debe planearse un fluido espaciador efectivo, y el desplazamiento del lodo debe ser a un gasto tan alto como sea posible. Podría pensarse que con el uso de una tecnología bien documentada, se garantizaría un trabajo de cementación de calidad. Desafortunadamente, el vacío aún existe.

#### EL PROCESO DE DESPLAZAMIENTO DEL LODO - VISTO DESDE EL FONDO DEL POZO.

Cuando se discuten las velocidades anulares de desplazamiento del lodo en la literatura, normalmente se piensa en el gasto para bombear el fluido desplazante que se encuentra sobre el tapón del cemento. Ya sea que al personal de campo, se le proporcionen por escrito los procedimientos a seguir para la cementación, especificando los gastos exactos de desplazamiento o un gasto máximo o mínimo, los resultados obtenidos, por lo general, no son los que se esperaban.

Por muchos años, en la investigación de laboratorio, referente al proceso de desplazamiento del lodo, se ha utilizado generalmente un aparato con volumen anular uniforme en una columna vertical de altura limitada. Los cambios en la velocidad son directamente proporcionales al gasto de bombeo, ya que siempre está lleno el sistema. Por lo general, durante la realización de cada prueba el gasto se mantiene constante.



Con dicho trabajo de investigación, se han establecido principios válidos de desplazamiento que necesitaban entenderse; pero sólo una relativamente pequeña cantidad de la información que se obtiene de la investigación y las pruebas, se ha dedicado a la forma de aplicación de dichos principios en el campo.

El personal de campo ha observado, por años, que cuando se bombea el cemento hacia la T.R. y cuando éste tiene una densidad mayor que la del lodo, cae con mayor rapidez que con la que se bombea. Cuando ya se había bombeado todo el cemento y se quitaban todas las conexiones para colocar el tapón de cementación (el método tradicional), obviamente se producía un vacío en la parte superior de la T.R., originado por la caída del cemento. Ha sido obvio, también, que cuando se bombea el fluido de desplazamiento, la única presión de bombeo que se indica, es la de la caída de presión en la línea superficial, hasta el momento en que el lodo alcanza al cemento y se llena la T.R. hasta la superficie. La presión de la bomba entonces aumentará y empezará así el desplazamiento controlado. Lo que pasa con el cemento, desde que se bombea hasta el momento en que el lodo se pone en contacto con él, sólo ha sido mera especulación.

Si se anota el volumen de desplazamiento empleado hasta que ocurre el contacto, se puede calcular fácilmente la posición del tapón de desplazamiento. Entonces se establecería el volumen de cemento que todavía está en la T.R., así como el volumen de cemento en el espacio anular (suponiendo una densidad constante como ya se ha especificado). A menos que se presente una pérdida de circulación, el registro de calibración y el volumen de cemento en el espacio anular, establecerían la profundidad máxima del cemento en el espacio anular. Esta sería la posición del nivel de cemento si se ha realizado, hasta ese punto, un desplazamiento completo del lodo. Por supuesto, dependiendo de la eficiencia real de desplazamiento obtenido, el cemento que se bombeó primero, estará más arriba en el espacio anular. El vacío entre la investigación de laboratorio y las operaciones de campo, se refiere a este período en el que el cemento se desliza hacia abajo sin ningún control directo. Esto se convierte en un problema confuso, especialmente cuando el cemento pasa por las zonas de mayor interés a velocidades desconocidas. ¿Se tiene la suerte de que el desplazamiento anular inicial se realice a una velocidad descontrolada pero alta, o el cemento disminuye su velocidad de desplazamiento hasta alcanzar un equilibrio (o se detiene completamente) justo en el momento inapropiado?. Otras preguntas que han quedado sin respuestas satisfactorias son:

1. ¿Se presenta cualquiera de estas posibilidades en pozos calibrados o en pozos agrandados?.
2. Si el flujo se detiene sin desearlo, ¿Qué tanta resistencia deberá vencerse para reiniciarlo, debido a las propiedades reológicas del cemento y del lodo a las temperaturas de la formación?.

3. ¿Qué tan crítico es el factor tiempo en la pregunta 2 ?.
4. ¿Las propiedades reológicas empiezan a cambiar antes de que se detenga por completo el flujo?.

El desconocimiento de las velocidades que se presentan durante gran parte de un trabajo de cementación cobra más importancia por la conclusión de Haut y Crook<sup>4</sup> referente a que la eficiencia de desplazamiento no se afectó apreciablemente por la cantidad de fluidos bombeados a bajos gastos. Brice y Holmes<sup>8</sup> concluyeron que el incremento en el tiempo de contacto era efectivo en flujo turbulento y recomendaban 10 minutos; aunque, en un pozo, se obtuvieron buenos resultados con 8 minutos. Sería muy difícil realizar dicha práctica en varias zonas de interés o en lugares donde la pérdida de circulación es un problema.

Parker et al.<sup>9</sup> reconocieron que el flujo descontrolado (o efecto de tubo en U) es un problema al intentar el desplazamiento en flujo tapón.

#### MEDICIONES DE LA VELOCIDAD EN EL CAMPO.

Saussus<sup>10</sup> realizó pruebas en varios pozos desviados, en Francia, utilizando el sistema de observación Multitud<sup>MR</sup> para medir y registrar continuamente los gastos de flujo, las densidades relativas del fluido y las temperaturas del lodo y del cemento, a medida que se les bombeaba por el interior de la T.R., hacia el espacio anular. Sus mediciones indicaron que se obtenían buenos resultados con flujo tapón. Las gráficas registradas ilustraron los cambios en los gastos a medida que cambiaban las velocidades de la bomba, se bombeaba el cemento hacia el interior de la T.R. y el desplazamiento progresaba. No se reportaron valores de resistencia al esfuerzo cortante, pero este trabajo es un buen paso en el área de investigación de campo. Ilustra lo que puede ocurrir durante el tiempo en que se pierde el control.

En la Fig. 1, se ha aproximado y graficado la información obtenida del ejemplo 1 de Saussus<sup>10</sup>. Puesto que un gasto de retorno mayor que el gasto de entrada requeriría el mismo gasto de retorno al abandonar el fondo de la T.R., tanto el gasto de entrada como el de salida pueden convertirse a velocidades en la T.R. para establecer una comparación. La gráfica de las velocidades de bombeo y las velocidades al abandonar la T.R. nos permiten conocer lo que ocurre a bajas velocidades en el interior de la T.R. de 7 pg. en un agujero nominal de 8.5 pg. Puede verse que la velocidad de retorno está bastante relacionada con la de bombeo, pero también que es errática. La Fig. 2 es una gráfica de los mismos datos y presenta la velocidad diferencial desde el principio de la cementación hasta el momento en que se presenta el contacto. Por ejemplo, durante el mezclado del cemento para una velocidad de bombeo de 3.33 pies/seg corresponde una velocidad de retorno de 4.67 pies/seg. Esto indica que en ese momento el cemento dentro de la T.R. estaba cayendo a una velocidad mayor de 1.34 pie/seg, que con la que se estaba

bombeando el cemento. Se presentaron mayores diferencias, tanto positivas como negativas, cuando se paraba la bomba. En la Fig. 2 también se puede ver que la velocidad diferencial fue positiva cuando se bombeaba cemento y negativa durante el desplazamiento, hasta que el fluido desplazante se ponía en contacto con el cemento.

#### POSIBLES AFINACIONES EN EL REGISTRO Y CONTROL AUTOMATICOS.

Un uso más amplio del procedimiento de medición mencionado, bajo condiciones variadas, podría mejorar el análisis que se hace de los trabajos de cementación y servir como un factor de experiencia para ayudar a planear los trabajos de cementación. Sin embargo, una afinación adicional de procedimiento ofrecería una mejor oportunidad para el control de las velocidades dentro del pozo en el campo. Sassus<sup>10</sup> recomendaba que se incorporara un totalizador (integrador) dentro del sistema. Esto proporcionaría una lectura instantánea del volumen desalojado en la T.R. desde el principio de la cementación hasta que se realizará el contacto entre el fluido desplazante y el cemento. Sin embargo, con la tecnología actual, a partir de los registros de velocidad, hasta los pilotos automáticos, sería posible el uso de un control automático, computarizado, del bombeo del cemento a la velocidad necesaria. Además de un totalizador o integrador, podrían incluirse en el sistema automatizado, unidades para registrar la capacidad y longitud de la T.R., las capacidades en el espacio anular y la longitud de cada sección, para proporcionar lecturas instantáneas de las velocidades anulares deseables vs. velocidad real, los barriles necesarios para el llenado, el momento en el que el cemento llega a la zapata, y la altura teórica que alcanzará el cemento en el espacio anular. Se podría observar en una pantalla la velocidad programada para cada sección, y la bomba o las bombas, podrían ajustarse de acuerdo a esto o podría automatizarse el estrangulamiento.

Todas estas ideas pueden descartarse por ser muy revolucionarias, muy costosas o muy sofisticadas y delicadas para confiarse al personal de campo. Por otro lado ¿Nos podemos dar el lujo de continuar cementando pozos costosos sin saber qué es lo que ocurre en el fondo de los mismos? ¿Es éste un sistema más sofisticado que una operación de registros de pozos?.

#### REDUCCION DEL TIEMPO SIN BOMBLEAR

De las Figs. 1 y 2 se infiere que el incremento de la velocidad de bombeo del cemento, en el período descontrolado, incrementaría la velocidad anular, cuando se desean altas velocidades anulares. Esto reduciría la velocidad diferencial y produciría una altura mayor del cemento en la T.R. Suponiendo que se tiene un bache de cemento mezclado, normalmente se disminuye la velocidad de bombeo casi al terminar de bombear el bache, hasta que se bombea la última parte de la lechada. Entonces se suspende el bombeo, se quitan las conexiones del piso, se limpian la bomba y las líneas, se libera el tapón y se reconecta la línea



antes de que se bombee el fluido desplazante. Dichas operaciones rara vez están bien coordinadas y pueden durar de 3 a 7 minutos. Durante este tiempo, se pierden parte de los beneficios obtenidos por los altos gastos con los que se bombeó el cemento. El cemento se deslizará cuesta abajo y quizá se aproxime o alcance un equilibrio estático.

Si se pudiera reducir este tiempo sin bombear a unos 15 o 20 segundos, el cemento estaría más arriba cuando empezará el desplazamiento, y el cemento que estuviera empezando a subir por el espacio anular tendría oportunidad de alcanzar una mayor velocidad. Con una válvula extra de desviación en el piso y con una manguera conectada al fondo, la bomba podría conectarse inmediatamente al agua, cuando entrara aire a la succión. Al mismo tiempo, con una bocina se podría indicar a la gente que se encuentra en el múltiple del piso, que abran la válvula de desviación inmediatamente. A la vez, se libera el tapón de cementación se da vuelta a las otras dos válvulas del múltiple, y se indica a la unidad de cementación de que esto ya ha sido ejecutado. Se podría usar al mismo tiempo una válvula en el interior de la línea, una línea de desviación y una válvula desde la descarga de la bomba, hasta la línea de succión del cemento, para lavar la última sección de dicha línea. Con un trabajo de conjunto, esto podría realizarse en 10 a 20 segundos, que debe ser adecuado para lavar la bomba y la mayor parte de la línea. La unidad de cementación puede conectarse entonces a un tanque de desplazamiento lleno con 10 bl, y hacerle señas al piso para cerrar la válvula de desviación. En la figura 3 se ilustra el sistema de conexión del piso. Si el fluido desplazante es agua no hay problema; si se va a usar lodo, normalmente no importaría diluirlo con 1 a 3 bl de agua. Con la reducción de este tiempo, el lodo y el cemento estarán en movimiento al empezar el desplazamiento.

#### SELECCION DEL VOLUMEN DE CEMENTO.

Si se ve un pozo desde el fondo, un cálculo simple puede indicar cómo se afectará la eficiencia de desplazamiento del lodo, al cambiar el volumen de cemento. Cuando se calcula el volumen de cemento necesario, a partir de un registro de calibración, vale la pena comparar el volumen total contra el correspondiente a un pozo con sección uniforme. En una ocasión, el volumen total de cemento en el espacio anular, a partir del registro, fue 22% menor, necesitándose la integración manual del registro de calibración.

A través de los años, se han usado varios factores de seguridad para calcular los volúmenes de cemento. Si se dispone de los volúmenes calibrados, el único uso del factor de seguridad es compensar, por si se presenta, una pérdida de circulación. De hecho, el cemento agregado que se emplea puede contribuir a generar una pérdida de circulación. El hecho de encontrar la parte superior del cemento más alta de lo que se esperaba no es como para sentirse orgulloso. Simplemente significa que el des-

plazamiento del lodo fue menos eficiente y que el cemento se desvió dejando mayor cantidad de lodo.

Un ejemplo es el pozo B, un pozo típico ubicado en el con dado canadiense OK. Existen varias zonas potencialmente produc toras, siendo las dos del fondo donde generalmente se terminan los pozos. La T.R. de 5 1/2" se cementó a 10,630 pies, con 1045 sacos (193 bl) de cemento clase H. La zona de interés más alta estaba a 8372 pies y la parte superior del cemento se en contró a 6850 pies, la cual está arriba de la sección calibra da. Por lo tanto, no pudo calcularse la eficiencia del despla zamiento. En la Fig. 4a se muestra la posición del cemento en la T.R., la parte superior teórica del cemento, y los 20 bl de flui do lavado en el espacio anular si hubiera ocurrido un equilibrio estático (suponiendo un desplazamiento de lodo del 100%). La parte superior del cemento en el espacio anular a 9,410 pies, con más de 72% de lechada aún en el interior de la T.R., está arriba de las 2 zonas de interés principales del fondo. Esto significa que si se ha alcanzado o se ha aproximado a un equili brio estático, el cemento se habría desacelerado a medida que pasaba por las 2 zonas del fondo. Por experiencia, un despla zamiento del 100% no ocurriría bajo tales circunstancias, y la parte superior del cemento estaría arriba de la tercera zona de interés en el momento del equilibrio estático. El contacto se presentó al introducir 130 bl de desplazamiento, alcanzando el cemento una altura teórica de 8989 pies. Esto significa que se había presentado un equilibrio estático y que se había necesi tado 130 bl de desplazamiento para mover casi 28 bl de cemento que se encontraban afuera de la T.R.

En las normas de diseño con frecuencia se requiere que el cemento alcance alturas de 200 pies a 700 pies por lo regu lar arriba de la zona de interés. En la Fig. 4a la parte supe rior del cemento estaba en realidad a 1522 pies arriba de la zo na. En la Fig. 4b se ilustra la diferencia si se hubieran usado 200 pies sin el factor de seguridad. El volumen de 134 bl en el espacio anular requería de 715 sacos de cemento. En pozos simi lares, donde se presentaban las cimas del cemento dentro del agujero calibrado, se había calculado el desplazamiento del lo do un poco mayor a 70%. Con los 20 pies planeados de cemento arriba de la zona más alta, y con una eficiencia de desplazamien to del 86%, se colocaría el cemento en la parte superior de la sección calibrada, 522 pies arriba de la zona más alta. Con un equilibrio estático teórico, en el diseño alterno, se tendría cemento sólo 25 pies arriba de la zapata de la T.R. Si el cemen to se hubiera bombeado lo suficientemente rápido y si se hubie ra iniciado el desplazamiento con prontitud, no se hubiera in troducido cemento en el espacio anular hasta que el despla zamiento desarrollara una carga hidrostática adicional en el interior de la T.R. El cemento que se bombea al principio se beneficiaría con algo de la velocidad descontrolada a medida que pasa por las zonas de interés más bajas. Habría algún decre miento en la velocidad a medida que el cemento subiera por el es pacio anular, pero no sería nada comparado con la que se tiene al presentarse el equilibrio estático durante el cierre. Con un



cambio rápido de conexiones para poder desplazar y con gastos de bombeo mayores, para reducir el tiempo que se tarda para establecer el contacto del fluido desplazante con el cemento, puede acortarse el período en el que se tiene una diferencial de velocidad negativa (Fig. 2) y puede incrementarse la velocidad real del cemento durante dichos períodos. En general, si la columna hidrostática total de cemento en el interior de la T.R. es menor que la columna hidrostática del lodo en el espacio anular, se presentaría un equilibrio estático con todo el cemento aún dentro de la T.R. Obviamente, el diámetro de la tubería determinaría si esto es posible.

#### MEJOR EJECUCION DE LOS TRABAJOS DE CEMENTACION

En el laboratorio se realizan las pruebas bajo condiciones controladas. El investigador por lo general tiene un control efectivo sobre todas las partes del aparato empleado y puede hacer ajustes según sea necesario. Si durante una prueba falla un componente, éste puede reemplazarse y puede repetirse la prueba.

En la mayoría de los casos, sólo hay una oportunidad en la operación de campo. Hay muchos componentes necesarios para lograr un trabajo satisfactorio, y la operación adecuada de cada uno debe lograrse a través de otras personas empleadas por el contratista de perforación, la compañía de servicio, las compañías especializadas y los contratistas independientes. Debido a esto, existe mucha probabilidad de equivocarse, y una buena práctica es que se reúnan todos los involucrados antes de realizar el trabajo, de modo que cada uno sepa cómo se planea realizar el trabajo, lo que se espera de él, y los detalles de los tiempos programados. Esto debe ser elemental, pero existe la tendencia, entre algunos de los nuevos supervisores de perforación, que quizá no entiendan los puntos fundamentales, de confiar en el personal de la compañía de servicio y esperar lo mejor. Howard<sup>11</sup> puso énfasis en esto cuando dijo: "Aunque en la industria petrolera se trate con compañías de servicio de campos petroleros con experiencia y reputación, aún es necesario que la compañía petrolera ejerza un control adecuado sobre el trabajo". A pesar de no ser un factor directo en el éxito de un trabajo, la compañía de servicio debe obtener información con buenos registros de presión, tiempos, densidades, gastos y volúmenes, incluyendo registros con notas adecuadas que expliquen donde ocurrieron las diversas fases de la operación. Esta información es valiosa para verificar detalles de los trabajos terminados y para mejorar los trabajos posteriores. Dichas gráficas y registros son rutinarios en algunas compañías de servicio; en otras deben solicitarse, y algunas aparentemente no pueden proporcionarlas.

#### PROBLEMAS ESPECIFICOS EN LAS CEMENTACIONES.

Se observaron 3 trabajos de cementación, en pozos de desarrollo similares, en el Condado Canadiense de OK, sin haber



participado en su supervisión. Las especificaciones para el lodo y el cemento fueron las mismas para los 3 pozos, aunque se emplearon diferentes compañías de servicio. Se tomaron muestras, para analizarlas, del cemento de la unidad de cementación y del lodo de la última circulación.

#### FACTORES DE LA CEMENTACION PRIMARIA.

Existen muchos factores que contribuyen para lograr un trabajo satisfactorio. Varios autores han publicado listas para guiar al operador. Se presupone un plan de cementación perfecto. Luego, se enumeran las actividades de mayor interés (y los puntos positivos asignados para cada actividad para los 3 pozos) como las que se indican en la Tabla 1.

#### DIFERENCIAS.

Aunque no se esperaba un trabajo perfecto, el grado de deficiencia en el desarrollo del mismo fue una sorpresa. En la Tabla 2 se resumen las propiedades del lodo y en la Fig. 5 se ilustra el efecto del tiempo y las temperaturas en el esfuerzo gel de los 3 lodos. Hubo muchas diferencias entre los lodos y todos tenían altos esfuerzos gel. El gran efecto de la temperatura sobre el esfuerzo gel, aún a 150 °F, confirma el hecho de que este esfuerzo es un factor considerable que dificulta la movilidad del lodo.

#### INSPECCION Y PRUEBA DEL EQUIPO.

Los resultados demostraron que se necesita prestar mayor atención al equipo para evitar problemas. En el pozo A, el densímetro no funcionaba correctamente y no se disponía de una balanza presurizada para medir la densidad del lodo. Se tuvieron que hacer comprobaciones al azar, confiando en una balanza de lodos convencional. El manómetro aparentemente estaba parcialmente obstruido y se leía menos de la mitad de la presión real. El manómetro no registró ninguna presión hasta que se tuvo un desplazamiento positivo. La válvula de desviación se instaló fuera del múltiple del tapón para facilitar el cambio rápido para realizar el desplazamiento (ver Fig. 3). El múltiple se instaló casi 15 pies arriba del piso, y cuando llegó el momento de liberar el tapón, la persona que se encontraba en la tarima no pudo abrir la válvula superior del múltiple. Obviamente esta válvula no se había probado antes de instalarla en el equipo.

En el pozo B se utilizó un registrador de presión para obtener información. Cuando se bombeo el tapón, la presión manométrica en el camión de la unidad de cementación indicaba 3000 lb/pg<sup>2</sup> mientras que el registrador marcaba 2000 lb/pg<sup>2</sup>.

En el pozo C, se dejó casi una junta completa de la T.R., de rango 3, arriba del piso de perforación, con el propósito de cementar correctamente sobre el fondo. Esta no fue una bue-

na medida. Una persona de la compañía de servicio fue elevada por una línea del malacate para soltar el tapón. Las asas del elevador se habían atorado con la manivela del liberador del tapón de cemento y éste no pudo ser liberado. Fue necesario colocar cuñas en la tubería y utilizar la línea de seguridad del cementador como línea del malacate para girar la manivela.

#### CONTROL DE CALIDAD DE LA LECHADA DE CEMENTO.

No hubo manera de probar el cemento en el campo, y si no se hubieran realizado las pruebas del laboratorio, no se habría indicado la existencia de un posible problema. En la Tabla 3 se resumen las pruebas que se le hicieron a los cementos dentro de un rango de densidades. Los tres cementos se diseñaron para preparar lechadas de 16.6 lb/gal, pero con la muestra del pozo C no se pudo alcanzar dicho valor. Las pruebas mostraron que esta muestra correspondía a un cemento ligero, completamente diferente, el cual contenía gilsonita y ceniza. Durante los primeros 30 segundos el densímetro registraba una densidad inicial promedio de 14.3 lb/gal, obtenida con un mezclador por recirculación y después la densidad aumentó a 16 lb/gal, indicando que debieron haber quedado en la unidad de cementación, de un trabajo anterior, aproximadamente 13 pie<sup>3</sup> de cemento de densidad menor. No hubo consecuencias en el resultado final de este trabajo, pero este mismo error podría tener resultados desastrosos si se tuviera una lechada de cemento de fraguado más rápido y ésta se bombeara primero al cementar un pozo profundo.

Aunque Howard<sup>11</sup> hizo notar que se debe probar el cemento que se entrega en el pozo, es difícil para el operador realizar dichas pruebas en un pozo de desarrollo. En el ejemplo citado, la compañía de servicio estaba ocupada con varios pozos, y el cemento se entregó justo antes de empezar el trabajo. La práctica establece que es necesario que exista una mejor supervisión y capacitación del personal de la compañía de servicio. En un pozo con problemas, deben estar presentes un ingeniero o un técnico para observar la dosificación del cemento, el mezclado y la introducción del mismo. Deben tomarse muestras y probarse en el laboratorio, por lo menos para determinar su densidad, su filtrado, y su tiempo de espesamiento, con la misma agua que se utilizará en la cementación.

#### BUENA EJECUCION Y TRABAJO DE EQUIPO.

En el pozo A, se ordenó una unidad de bombeo aparte para empezar el desplazamiento tan pronto como se hubiera terminado de mezclar el cemento. Hubo mucha confusión cuando llegó este momento ya que a la cuadrilla no se le había especificado su función y suponían que la unidad de cementación se había solicitado como sustituto para realizar el trabajo. Sin embargo, mientras más se tardaba en abrir la válvula del múltiple, más se tardaba en empezar el desplazamiento con la unidad de cementación.

Quando se terminó el mezclado del cemento en el pozo C, la persona que se encargaría de introducir el tapón tenía que caminar desde la unidad de cementación y subir hasta el piso de perforación para poder ser elevado al cabezal de cementación, como ya se ha descrito. Con una mejor planeación y un mejor trabajo de equipo, en el tiempo empleado para liberar el tapón, se podría haber ahorrado otros 30 a 40 segundos si se hubiera tenido una persona lista para actuar al momento de recibir una señal.

#### CONTROL DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA DE ACUERDO A LAS ESPECIFICACIONES.

Uno de los problemas más difíciles de resolver en el campo, es tener una densidad de lechada consistente. Las lechadas de cemento se diseñan para que tengan propiedades definidas de tiempo de bombeo, tiempo de espesamiento, filtrado, agua libre, ciertas propiedades reológicas y un volumen específico, todas las cuales varían con la densidad.

El equipo para el mezclado del bache da la seguridad de que se obtendrá una lechada con densidad constante. Puede ser necesario retardar ligeramente el cemento debido al tiempo extra en el manejo de la lechada.

El desarrollo de la balanza de lodo presurizada para determinar la densidad del cemento ha ayudado a establecer una referencia precisa, eliminando el efecto de aire atrapado. Sin embargo, es muy lenta para ser efectiva en el control de la densidad cuando se mezcla el cemento dentro de la línea. Si el mezclado se realiza dentro de la línea, se debe utilizar un registrador de densidades y comprobar estas densidades con una balanza de lodo presurizada.

Los pozos A, B y C se cementaron mezclando el cemento en el interior de la línea y bombeándolo hacia el fondo. Se especificó el uso de balanzas de lodo presurizadas con registros de densidad. En el pozo A, la falla del densímetro y la falta de una balanza de lodo presurizada impidieron que se tuviera un control en la densidad, y se anotaron densidades de 14.4 lb/gal a 16.6 lb/gal. Los pozos B y C tenían registradores de densidad y sistemas de mezclado por recirculación nuevos, los cuales se decía que eran un avance para mantener una densidad uniforme. El pozo B fue una decepción debido a que la gráfica a veces era bastante irregular. Las correcciones hechas por los operadores no eran fáciles, y había una tendencia a estar corrigiendo continuamente. Nunca se mandó una copia de la gráfica registrada, y la compañía que proporcionó el servicio no pudo encontrar el original cuando se le pidió. Sin embargo, en la Fig. 6, donde se presentan los primeros 8 minutos de esta gráfica, se puede ver que los resultados no fueron los desea-



dos. Las notas tomadas presentan una variación de -38.6 a +3.6% o de 10.2 a 17.0 lb/gal. En una ocasión, la densidad de repente bajó de 17.0 a 13.0 lb/gal, al introducirse una gran cantidad de aire con el cemento. El problema con el aire se presentó varias veces, tanto en el pozo B como en el C.

El pozo C tenía la mejor consistencia en la densidad de los tres pozos, pero el control no fue como se hubiera deseado. La variación fue de -8.4 a 4.2% o de 15.2 a 17.3 lb/gal. El promedio es aceptable, pero bajo otras circunstancias baches de cemento de 17.3 lb/gal podrían provocar dificultades en el trabajo. En las Figs. 7 y 8 se muestra el efecto que tienen las variaciones de la densidad en las muestras de cemento analizadas de los pozos A y B. El cambio drástico en el agua libre, a la densidad menor, indica que la formación de bolsas de agua en el cemento podrían originar grandes variaciones en la densidad durante el mezclado.

#### MEZCLADO DEL CEMENTO AL GASTO DESEADO.

Los problemas principales que se tienen con el mezclado dentro de la línea son las alternancias entre las detenciones y arranques de la bomba, el taponamiento de los propulsores, y el aire excesivo. El bombeo de la lechada a partir de un mezclador de banda sería una operación más fácil que el mezclado dentro de la línea. No se hizo el intento de maximizar el gasto de bombeo del cemento. Los gastos promedios medidos fueron de 4.30, 4.15, y 4.41 bl/min para los pozos A, B y C, respectivamente.

#### REALIZACION RAPIDA DEL CAMBIO PARA DESPLAZAR.

En los trabajos que se observaron en el campo se empleó una unidad de bombeo extra, para bombear el fluido desplazante más pronto; pero ésto fue contraproducente en los pozos A y C, ya que se requirieron 8 1/2 y 6 3/4 minutos respectivamente, debido a otras demoras. Sin embargo, en el pozo B se efectuó el cambio en 1 1/2 minutos sin ningún entrenamiento o instrucción especial.

#### COMO SE EVITO LA SUSPENSION DEL BOMBEO

En el pozo A no hubo suspensión. En el pozo B se tuvo un minuto, mientras se mezclaba el cemento, debido a una parte de cemento que se quedó en el tubo. En el pozo C se tuvieron 9 minutos de suspensión que se emplearon para desechar 8 bl de agua después de que se presentó el contacto con el cemento. El tiempo perdido se empleó para conectarse al sistema del lodo y para empezar a bombear lodo en vez de agua. Varias personas habían observado, una hora o dos antes de que empezara el trabajo, que el tanque estaba lleno de agua (una cantidad mayor a la adecuada). Aparentemente el equipo había estado usando agua para la limpieza durante el período de circula

ción y ésta no se había desechado. Se observó una falta de coordinación, comunicación y verificación.

#### MANTENIMIENTO DEL GASTO DE DESPLAZAMIENTO PLANEADO.

Los gastos de bombeo máximos, antes de que se estableciera el contacto entre el fluido desplazante y el cemento, fueron de 6.5, 6.5 y 7.4 bl/min en los pozos A, B y C respectivamente. Los gastos promedios fueron un poco menores al disminuir el bombeo, después del contacto mencionado y antes de bombear el tapón. No hubo intentos conscientes para obtener mayores gastos. En un desplazamiento directo, el máximo gasto que se había obtenido produciría velocidades de 3 pies/seg en un agujero de 8-1/2 pg. y de 4 pies/seg en un agujero de 7-7/8pg; o sea un rango de velocidades relativamente bajo.

#### MOVIMIENTO DE LA TUBERIA.

Se equiparon las 3 sartas de T.R. con centradores y raspadores tipo cable y se planeó su movimiento recíprocante. Se realizó el movimiento recíprocante durante la circulación final por la T.R.; pero los encargados de perforación estaban bastante desconfiados para realizar dichos movimientos al principio del desplazamiento. En los pozos A y B se tuvieron cortos períodos de movimiento de tubería, los cuales se suspendieron al reportarse que se estaba ganando peso. La tubería nunca se movió en el pozo C después de la última circulación. Aparentemente los encargados de perforación tenían más temor a que se pegara la tubería, que a realizar un trabajo pobre de cementación. Es necesario que en el campo se entiendan los beneficios del movimiento de la tubería y las mejores formas de obtenerlos.

#### RESULTADOS.

La calidad de los tres trabajos de cementación observados deja mucho que desear. Es bastante extraño que ninguno de los tres se haya considerado defectuoso. Cada pozo tuvo tres tratamientos por fracturamiento y luego se terminaron como pozos con baja producción (25 a 35 bl/día) con altas relaciones gas-aceite. No se realizaron trabajos de cementación forzada en ellos y aparentemente los tratamientos por fracturamiento estaban contenidos en las zonas de interés.

Una revisión de los registros de adherencia del cemento muestra una adherencia irregular. No había zonas grandes en las que hubiera una adherencia continua, pero se tenía buena adherencia en muchas zonas de lutita impermeable y en secciones delgadas del agujero. Estos resultados refuerzan las conclusiones de Haut y Brook<sup>4</sup> en lo referente a la permeabilidad y la velocidad.



## EVALUACION DE LOS TRABAJOS DE CEMENTACION.

Aquellos que pueden recordar sus primeros intentos en la cementación en los años pasados quizá se pregunten por qué la mayor parte de esos trabajos no fueron un fracaso. Nunca ha existido un medio exacto para evaluar un trabajo de cementación. Algunos considerarían cualquier trabajo como un éxito que no requirió de un trabajo de cementación forzada en la terminación. Otros se niegan a creer en un registro de adherencia pobre del cemento, debido a que han visto otros registros pobres y aparentemente no hubo problemas. Algunas organizaciones conservan los registros detallados de cada trabajo de fracturamiento en sus archivos y nunca registran los detalles de un trabajo de cementación como en realidad sucedió. Un pozo puede ser refracturado, pero una recementación es mucho más difícil.

Para que un trabajo de cementación se considere un éxito incondicional, debe aislar efectivamente las zonas permeables atrás de la T.R. y proteger la T.R. durante la vida útil del pozo. En el momento de la cementación, el operador no sabe cual es la vida útil del pozo o exactamente a que presiones se someterá el cemento. Las presiones de fractura en los pozos A, B y C fueron mayores de 8000 lb/pg<sup>2</sup>, pero si aún estuviera líquida la columna de lodó arriba del cemento, la diferencia sería del orden de 4800 lb/pg<sup>2</sup>. Esta bien podría ser la presión más alta a la que se someterá el cemento, a menos de que los pozos se utilicen para un proyector futuro de recuperación inducida.

Muchas personas creen, con base en su experiencia, que no es recomendable utilizar los pozos existentes como inyectores en proyectos de recuperación mejorada. Existe algo de cierto en esto, pero quizá indica que se espera lo peor cuando se dispone de poca información. Cuando se tienen pozos perforados por otro operador, con información incompleta sobre como fueron cementados, es justificable que se tenga un punto de vista pesimista. Para que un trabajo de cementación falle, se deben conjugar varios factores. Debe existir una sección con poco cemento en un lugar sensitivo del pozo y después de un tiempo, con la presión suficiente, la corrosión u otros factores se presentan en dicho lugar. Si falta uno de estos factores quizá no ocurra ninguna falla.

Miles de pozos se han terminado indudablemente con trabajos de cementación mediocres. Dichos pozos que aún operan, por circunstancias fortuitas, no justifican que no se realicen intentos razonables para obtener un trabajo de cementación tan bueno como sea posible, en trabajos posteriores. Puesto que la tendencia general es hacia pozos más profundos, mayores presiones, en localizaciones marinas en áreas ambientales con mayores problemas, se debe continuar aunando a la tecnología, los medios de desarrollo para que se pueda aplicar más ampliamente, y planear cada trabajo como si fuera un reto. Entonces quizás de aquí a 20 o 30 años ya no se tenga miedo de utilizar



los pozos actuales para recuperación mejorada; si se conservan los detalles del trabajo de cementación primaria.

#### CONCLUSIONES.

1. La tecnología básica disponible en la actualidad es excelente, pero es necesario darle una difusión más amplia entre el personal de campo de la compañía de servicio, entre los operadores de campo, los ingenieros, los técnicos y los supervisores.
2. Para aplicar la tecnología básica a las operaciones de campo, debe visualizarse el proceso del desplazamiento del lodo desde el fondo del pozo.
3. Un trabajo adicional de desarrollo sobre el bombeo del cemento, controlado por computadora, junto con un instrumento de medición a la entrada y a la salida del pozo, proporcionaría el medio para obtener un desplazamiento más eficiente del lodo por el cemento.
4. Las pruebas de desplazamiento del lodo en el laboratorio deben realizarse a gastos variables. Deben realizarse pruebas con velocidades altas seguidas de un período inicial de baja velocidad, y los efectos de la aceleración y desaceleración del cemento, en dichos desplazamientos, deben investigarse.
5. Para lograr una buena ejecución y un buen trabajo de equipo en una cementación, deben de efectuarse las reuniones antes de realizar la operación.
6. Puesto que no hay un medio efectivo para mantener una densidad constante del cemento, cuando la mezcla se realiza directamente en la línea, debe realizarse el mezclado por baches (recirculación), para proporcionar una densidad más uniforme.
7. El cemento y el fluido desplazante deben bombearse lo más rápidamente posible, con un período de 15 a 20 segundos para realizar el cambio entre ellos, a menos que la pérdida de circulación sea un problema.
8. Las compañías de servicio y los operadores deben establecer un método satisfactorio para garantizar que el cemento bombeado cumple con las especificaciones del cemento solicitado.

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

1. Smith, D.K.: Cementing, Monograph Series, SPE, Dallas (1976) 4.
2. Suman, G.O. Jr., and Ellis, R.C.: World Oil's Cementing Handbook, Houston (1977).
3. Obrien, T.B.: "Incapable People, Unused Technology, Poor Performance," Drilling - DCW (Feb. 1977) 61-67.
4. Hout, R.C. and Crook, R.J.: "Primary Cementing: Optimizing for Maximum Displacement," World Oil (Nov. 1980) 105-16.
5. Haut, R.C. and Crook, R.J.: "Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids," J. Pet. Tech. (Aug. (1982) 1828-33.
6. McLean, R.H., Manry, C.H., and Whitaker, W.W.: "Displacement Mechanics in Primary Cementing," J. Pet. Tech. (Feb. 1967) 251-60.
7. Clark, C.R. and Carter, L.G.: "Mud Displacement with Cement Slurries," J. Pet. Tech. (July 1973) 775-83.
8. Brice, J.W. Jr. and Holmes, B.C.: "Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques," J. Pet. Tech. (May 1964) 503-08.
9. Parker, P.N. et al.: "An Evaluation of a Primary Cementing Technique Using Low Displacement Rates," paper SPE 1234 presented at the 1965 SPE Annual Fall Meeting, Denver, Oct. 3-6.
10. Sassus, G.: "Use of New Monitoring System Yields Better Cement Jobs," World Oil (June 1980) 215-20.
11. Howard, G.C.: "Primary Cementing - The Key to Well Completion," SPE Distinguished Lecturer Series, 1965-66.

T A B L A 1

RANGO DEL FACTOR DE CEMENTACION PRIMARIA

PUNTUACION	ACTIVIDAD
0	1. Tener un programa para el pozo, que proporcione bajo esfuerzo gel y lodo con baja pérdida de fluido, mientras se perfora las posibles zonas de interés.
3	2. Colocar correctamente y en los lugares apropiados los accesorios auxiliares de la T.R., tales como el equipo flotador, centradores, raspadores, etc.
0	3. Tener inspeccionado y probado el equipo
2	4. Cumplir con las especificaciones del cemento
1	5. Realizar una buena ejecución y un buen trabajo de equipo.
1/2	6. Mantener la densidad de la lechada cercana a la especificada.
1 1/2	7. Mezclar el cemento al gasto deseado
1/2	8. Realizar el cambio, para desplazar, rápidamente.
2	9. Evitar cualesquier suspensión en el bombeo.
1	10. Desplazar al mayor gasto posible
3	11. Mantener la circulación
0	12. Proporcionar un movimiento efectivo de la tubería.

14 1/2 de  
36 posibles



PROPIEDADES DE LAS MUESTRAS DE LODO DE LA ULTIMA CIRCULACION

TABLA 2.

Densidad lb/gal	POZO A 9.1		POZO B 9.0		POZO C 9.0	
	Viscosidad Plástica (cp)	Punto de Cedencia (lb/100 pie <sup>2</sup> )	Viscosidad Plástica (cp)	Punto de Cedencia (lb/100 pie <sup>2</sup> )	Viscosidad Plástica (cp)	Punto de Cedencia (lb/100 pie <sup>2</sup> )
Ultima Prueba de Campo	18	10	20	12	15	13
Agitado y Probado en el Laboratorio	28	17	11	10	13	8
Agitado, Inicial	9	12	8	8	6	6
A 150 °F	10	10	6	16	5	6
Reposado toda la noche a 176 °F, probado a la temperatura del cuarto	20	12	7	12	7	5
Esfuerzo Gel lb/100 pies <sup>2</sup>	Inicial	Después de 10 min.	Inicial	Después de 10 min.	Inicial	Después de 10 min.
Ultima Prueba de Campo	6	20	5	25	6	25
Agitado y Probado en el Laboratorio	5	33	6	29	4	19
Agitado, Inicial	4	30	10	31	4	21
A 150 °F	7	72	26	100	17	68
30 minutos a 150 °F	--	100	--	140	--	94
Reposado toda la noche a 176 °F Probado a temperatura del cuarto	4	31	7	28	4	16

T A B L A 2 (continuación)

POZO A POZO B POZO C

Pérdida de Filtrado  
ml/30 minutos.

Ultima Prueba de campo

9.0 6.4 8.8

Agitado, Inicial

8.0 13.0 12.0

Reposado toda la noche a 176°F  
analizado a la temperatura del cuarto

8.0 14.0 11.6

% de Sólidos

8 8 4

% de Aceite

0 1 3

TABLA 3.

## RESULTADO DE PRUEBAS HECHAS SOBRE 5 GALONES DE MUESTRAS SECAS

## Características del Cemento:

Las tres lechadas se prepararon bajo las mismas especificaciones (Cemento Clase H, 0.6% de aditivo para el filtrado, 0.5% de reductor de fricción, 10% de sal, 0.2% de antiespumante, Hojuelas de 0.25 lb/gal, 35% de agua y la lechada de 16.6 lb/gal).

	Densidad Calculada	(lb/gal) Medida	Agua Libre (cm <sup>3</sup> )	Viscosidad Plástica (cp)	Punto de Cedencia (lb <sub>f</sub> /100pies <sup>2</sup> )	Indice de Comportamiento de flujo (n')	Indice de Consistencia (K')
POZO A	17.0	17.4	1.5	*	*	---	---
	16.6	16.9	2.2	91	86	0.5981	0.0453
	16.3	16.45	3.2	71	42	0.7030	0.0150
	15.0	15.2	4.1	31	5	0.8956	0.0041
	14.0	13.7	56.0	17	0**	0.9994	0.00036
POZO B	17.0	16.9	0.8	*	*	---	---
	16.6	16.55	1.4	*	*	---	---
	16.3	16.2	2.3	36	51	0.4993	0.0412
	15.1	15.15	3.8	24	8	0.8069	0.0022
	14.0	13.9	45.5	10	4	0.7772	0.0012
POZO C	17.0	15.3 +)	0.3	87	21	0.8519	0.0057
	16.6	15.05+	0.4	50	14	0.8324	0.0038
	16.3	14.8 +	0.8	36	2	0.9610	0.0010

\* No fue posible medirla; fuera de la escala de viscosímetro a una o más velocidades

\*\* Indica asentamiento

+ La muestra se obtuvo de una mezcla previa en la unidad de cementación y contenía Gilsonita y Ceniza



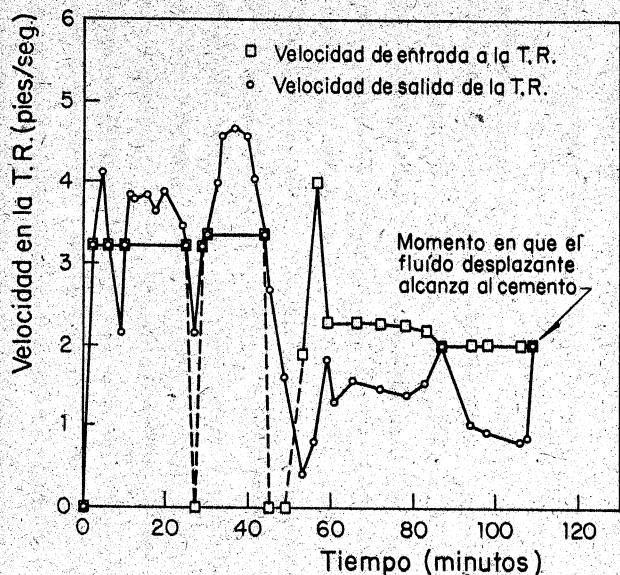


Fig 1. Perfil de cementación y desplazamiento de una T.R. de 7 pg en un agujero de 8 1/2 pg la longitud de la T.R. es 10426 pies y la desviación en la zapata es de 20°

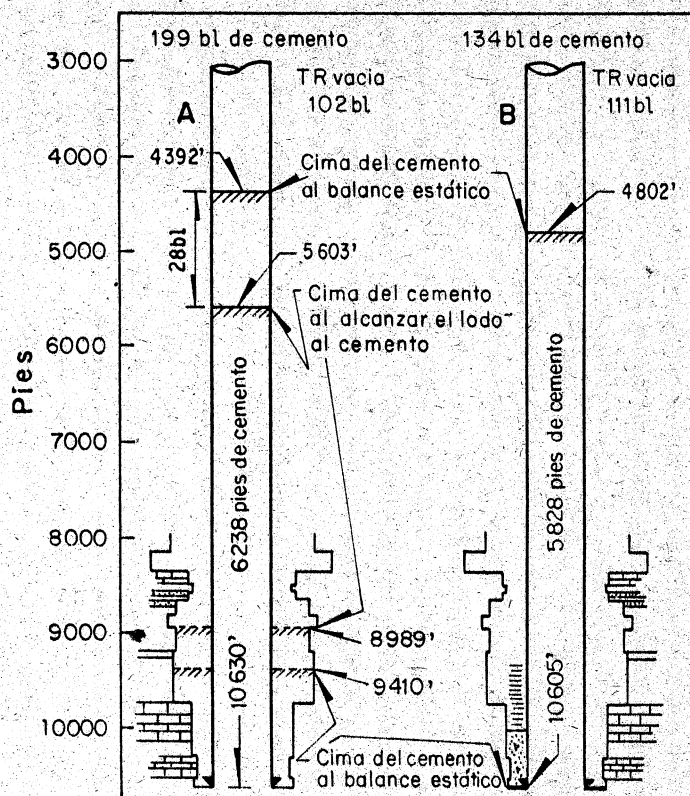


Fig 4. Efecto de los volúmenes de cemento alternos en el pozo B (T.R. de 5 1/2 pg. en agujero de 7 1/8 pg.

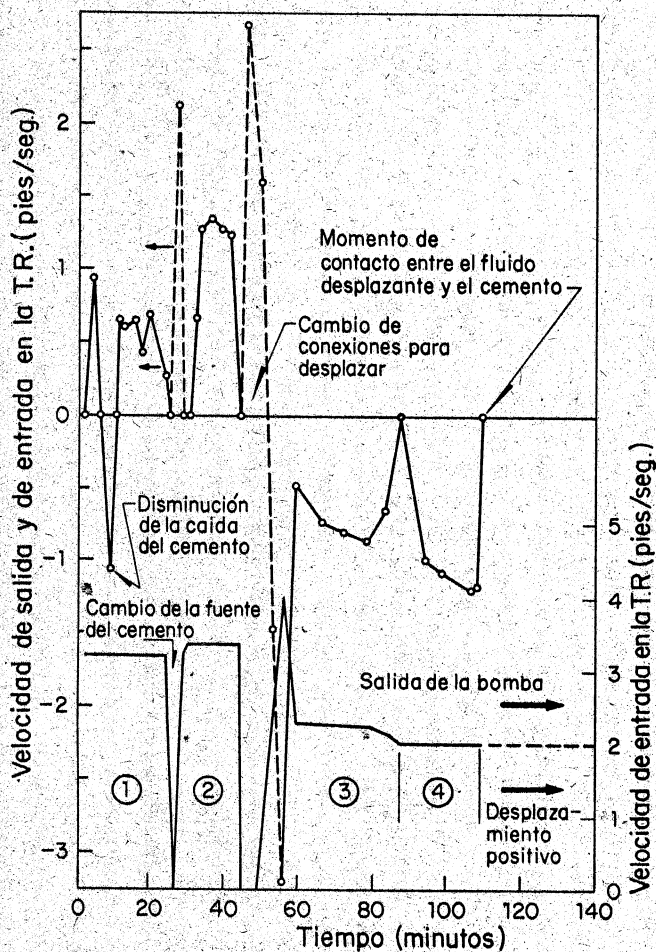


Fig 2. Perfil de la velocidad diferencial en una T.R. de 7 pg en agujero de 8 1/2 pg La longitud de la T.R. es de 10426 pies y la desviación en la zapata es de 20°

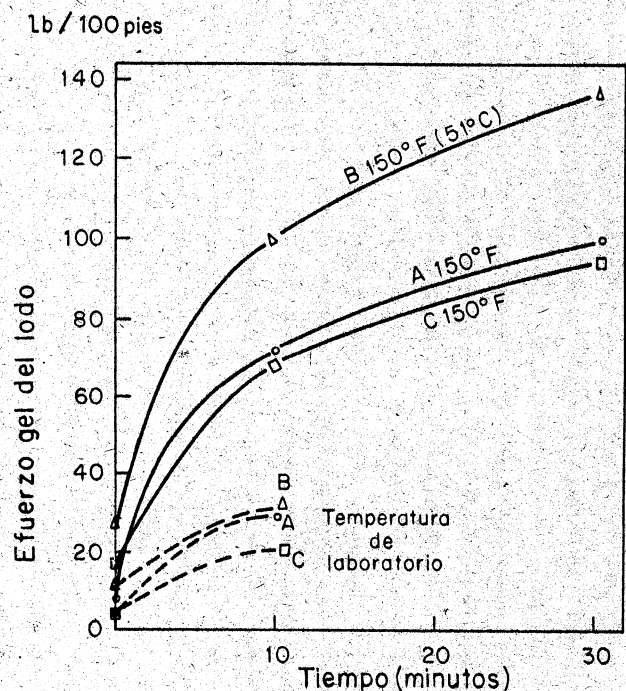


Fig 5. Efecto del tiempo y la temperatura sobre el esfuerzo gel del lodo en los pozos A, B y C.



Fig 3. Juego de válvulas de cementación en el Pozo A. Válvula macho (flecha superior) y válvula de desviación (flecha inferior).

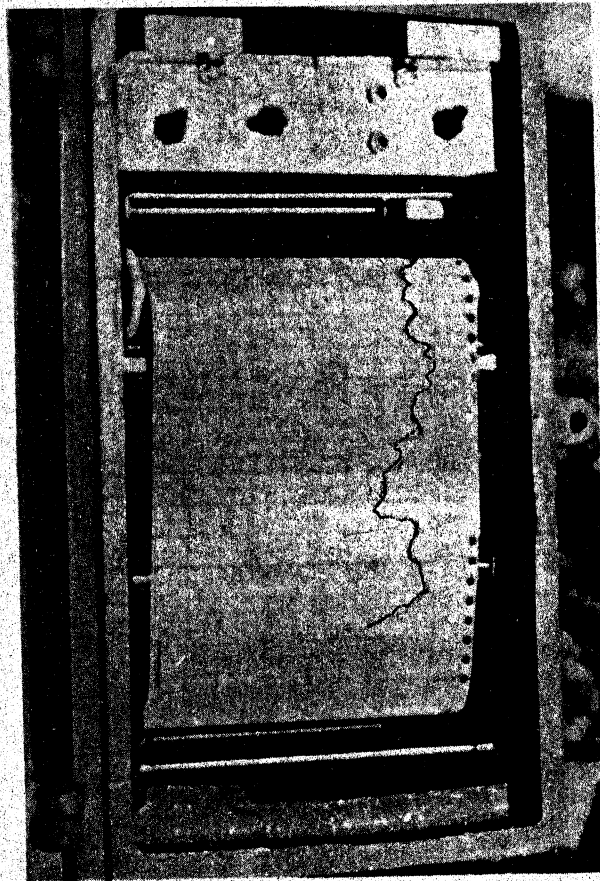


Fig 6. Registrador de densidades en el Pozo A (escala horizontal de 8 a 18 lb/gal).



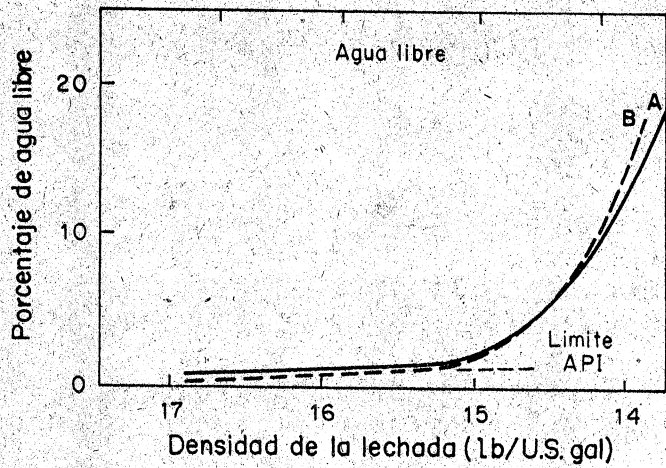


Fig 7. Efecto de la densidad de la lechada sobre el agua libre, pozos Ay B.

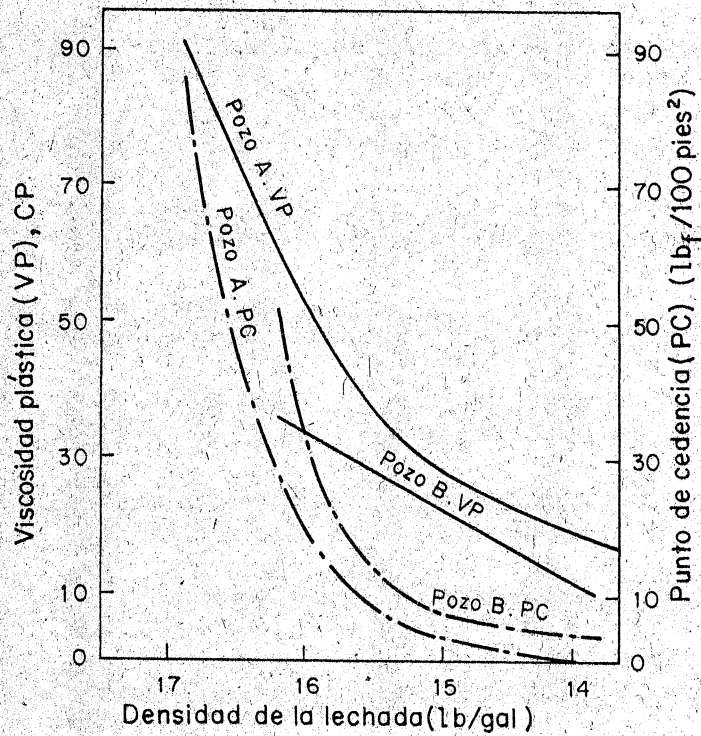


Fig 8. Efecto de la densidad sobre las propiedades reológicas de la lechada de cemento en los pozos Ay B.

## DESPLAZAMIENTO DEL LODO DURANTE LAS OPERACIONES DE CEMENTACION: ESTADO DEL ARTE.

C.W. Sauer, Conoco Inc.

Artículo SPE 14197\*, presentado en la 60ava Conferencia Anual de la SPE, en Las Vegas Nevada, en Sep. 1985. Traducido por Tomás Becerra Arteaga y Francisco Garaicochea P.

### RESUMEN

La sustitución de los fluidos de perforación con cemento, para sostener y proteger a la tubería de revestimiento, así como para sellar hidráulicamente las presiones de la formación, ha sido por 75 años el deseo del personal operativo y es un tema que comprende los mecanismos, bien definidos, del desplazamiento del lodo. La seguridad del personal y el medio ambiente, el éxito de un programa de exploración, la validación de los cálculos de ingeniería de yacimientos, y un buen control de la colocación de los tratamientos de estimulación, dependen de la tubería de revestimiento cementada en el pozo. Sin embargo, existen todavía diseños deficientes de colocación del cemento en la operación.

Este artículo es un resumen de los trabajos anteriores y actuales realizados sobre el tema de desplazamiento del lodo durante la cementación.

Se discuten temas tales como: el centrado y el movimiento de la tubería; la velocidad de introducción de la tubería; el acondicionamiento del fluido de perforación; la geometría del pozo; el diseño del fluido espaciador; los gastos de flujo; la densidad equivalente de circulación; el control de las operaciones; la evaluación posterior de la cementación; y cómo cada uno de estos temas es aplicable al proceso de desplazamiento del lodo. Este artículo incluye una guía de desplazamiento del lodo, para utilizarse antes y durante la operación de cementación. Aunque la mayoría de lo que aquí se discute ha sido presentado en artículos anteriores, aquí se reúnen todos los puntos importantes, dentro de un análisis, para ser utilizados por los opera

\* Publicado también en la revista J.P.T. de Sep. de 1987.

dores y el personal de ingeniería involucrado en las operaciones de cementación.

## INTRODUCCION.

La cementación de un pozo productor de aceite, de gas o inyector, puede ser una de las tareas más difíciles encontradas durante la perforación o terminación del pozo, si se realiza correctamente. Desafortunadamente, al menos una operación de cementación se realiza en cada pozo perforado y, a menudo, la cementación se considera como una rutina, y puede realizarse sin tener el diseño de ingeniería requerido.

Como pocas veces se requiere demostrar la calidad del trabajo de cementación, y aún cuando esto sucede las herramientas y métodos de evaluación pueden ser poco confiables, muchos de los errores de colocación del cemento nunca se descubren. Si las pruebas de producción posterior son suficientes para mostrar la comunicación con zonas diferentes a las deseadas, se puede creer que es imposible obtener una buena cementación.

Se puede obtener una buena cementación realizando un esfuerzo considerable por todos los interesados: el responsable de la perforación, el ingeniero de perforación, el contratista, y las compañías de servicio involucradas. La planeación debe realizarse, días, semanas, o, algunas veces, meses antes de la perforación. Para reemplazar apropiadamente el lodo utilizado para perforar el pozo, y formar un sello hidráulico, los esfuerzos tendrán que realizarse durante la perforación, la toma de registros, la introducción de la tubería de revestimiento, la circulación del pozo, el mezclado del cemento, el desplazamiento, el bombeo del tapón y el bache de espera del fraguado del cemento.

No se debe creer que el trabajo de cementación será correcto, independiente de lo que se realice o haya ocurrido durante la perforación hasta la profundidad total. Se deberán considerar la geometría del agujero, la viscosidad del lodo, la velocidad de introducción de la tubería de revestimiento, el centrado de la tubería de revestimiento, el tipo de lodo, la compatibilidad del lodo y el cemento, los regímenes de flujo para el desplazamiento, y muchos aspectos más de la operación. Ningún aditivo, técnica, o magia, hará que la operación de cementación sea un éxito. Se deberá realizar un análisis de todos los parámetros de las ecuaciones involucradas en la cementación, para garantizar el éxito en la operación de cementación. Considerando lo anterior, este artículo investigará el estado del arte del desplazamiento del lodo durante una operación de cementación. Aunque los lodos base aceite se utilizan con regular frecuencia en algunas partes del mundo, la mayor cantidad de trabajo reportado, acerca del desplazamiento del lodo, se ha realizado con lodos base agua. Todavía se cree que la mayoría de las aplicaciones son independientes del tipo de lodo en el agujero. Para afinar algunos puntos importantes, tales como cuál surfactante hará a un fluido espaciador compatible con un lodo determinado, se debe



rán realizar algunas pruebas en el laboratorio y el campo, para asegurar una operación satisfactoria.

### Discusión.

El tema de desplazamiento del lodo durante una operación de cementación, está a menudo rodeado por considerables diferencias de opinión, las cuales conducen a muy interesantes discusiones sobre el asunto. Esta a menudo tiene que ver con varias razones como: 1) cuándo la persona encargada de la perforación aprendió sobre la cementación; 2) qué métodos de evaluación del trabajo de cementación se usan y han sido utilizados; 3) qué grado de experiencia tienen los representantes de la compañía local de servicio. Debe recordarse, en primer lugar, que el objetivo del porqué existe el pozo es: "Vender el aceite al más alto margen de beneficio posible". Cualquier cosa que pueda hacerse durante la perforación y la terminación del pozo, para incrementar este margen de utilidad, deberá realizarse. Por ejemplo, si se economiza fluido espaciador, para ahorrar unos cuantos miles de dólares durante la perforación, y posteriormente se gastan decenas de miles de dólares en cementaciones forzadas durante la terminación, el objetivo no se ha logrado.

Lo que se requiere entonces, para lograr mejor este objetivo, es un trabajo completo de ingeniería, tal que la dirección pueda confiar en el plan integral para efectuar una buena cementación. Teniendo presente este compromiso, algunas de las técnicas no probadas de cementación pueden descartarse, y utilizarse sólo aquéllas con una buena base de ingeniería.

Bob Smith, en un artículo de noviembre de 1984, indica:<sup>1</sup>

"La operación total de cementación es una cadena con tres eslabones: 1) criterio de cementación; 2) conocimiento; y 3) control de calidad. Aunque éstos se encuentran separados, y son distintos eslabones, son interdependientes. El adagio de mezclarlo, bombearlo e inyectarlo, es arcaico. La actitud negativa ("Es imposible obtener un buen trabajo de cementación primaria, ¿porqué intentarlo?") es un presagio de auto-satisfacción. La actitud positiva deberá contener un verdadero compromiso para realizar una operación satisfactoria e involucrará dedicación de la gente, tiempo y dinero."

La figura 1 demuestra como trabaja esta pirámide para lograr una buena cementación. Dos ejemplos muy buenos de este criterio, que se utilizan en el campo, se pueden encontrar en un artículo de Harton, 1983, y en un artículo de Johnson, de 1982, donde se revisan los procedimientos de ingeniería de las operaciones totales de cementación.<sup>2,3</sup>

### Desplazamiento del lodo.

En 1911 se expidió una patente, a A.A. Perkins, por la co-

locación de cemento en un pozo productor de aceite, utilizando el método de dos taponés<sup>4</sup>. Ese método de colocación del cemento es todavía uno de los utilizados actualmente en la mayoría de las cementaciones de tuberías de revestimiento. En los años 40 se dio considerable atención a la obtención de mejores trabajos de cementación. Durante los años 40 se investigaron diversos factores, como: los fluidos limpiadores acuosos, adelante del cemento; el movimiento de la tubería durante el desplazamiento; la medición del diámetro del agujero; el buen centrado de la tubería de revestimiento; el acondicionamiento del lodo antes de la cementación; el desplazamiento de los fluidos en régimen de flujo turbulento; y el uso de un tapón de fondo. La mayoría de estas prácticas se aceptan actualmente como válidas, pero no siempre se realizan.

En los años 60 se re-investigaron estas mismas técnicas, con dos notables mejoras. La primera fue presentada por Brice y Holmes en 1964. Ellos realizaron estudios de desplazamiento de lodo con lechadas de cemento en régimen de flujo turbulento, utilizando características apropiadas para evitar la pérdida de fluido (tablas 1, 2 y figura 2). Este trabajo dio origen a la ampliamente aceptada práctica del bombeo de una "lechada raspadora" adelante del cemento, a lo largo de la zona de interés, para un determinado tiempo de contacto. Sus estudios concluyeron que los tiempos de contacto mayores de 10 minutos, proporcionaron los mejores trabajos de cementación. Una "lechada raspadora" se puede definir como una lechada de cemento altamente dispersa y de baja densidad, la cual posee valores bajos de pérdida de fluido, y se bombea adelante del cemento, esperando que éste proporcione, a la tubería de revestimiento, apoyo y un sello hidráulico.

La segunda parte importante del trabajo, se realizó por Carter y Evans en 1964; y mostró que las características de adherencia del cemento, dependen del tipo de superficie a la cual el cemento se adhiere. El mejor sello hidráulico se obtuvo en tuberías cubiertas con resinas revestidas de arena, y la peor adherencia se presentó cuando la tubería permaneció con un recubrimiento de aceite (mojada de aceite)

En los años 70 los investigadores empezaron a buscar cómo obtener trabajos de cementación apropiados en pozos desviados. Se investigaron factores como: la necesidad de incrementar la colocación de centradores sobre la tubería de revestimiento; el asentamiento de sólidos en el costado inferior del pozo; el movimiento de la tubería en un agujero desviado o en forma de S; y cómo afecta cada uno de ellos al proceso de desplazamiento del lodo.

Finalmente, en los años 80, los investigadores iniciaron la combinación de toda la información anterior en un intento por llenar el eslabón perdido. La solución fue un fluido espaciador, compatible con el sistema del lodo y el cemento, capaz

de desplazarse en turbulencia a un razonable gasto de bombeo, con alta densidad, sin permitir el asentamiento de sólidos, con bajos valores de pérdida de fluido, y que permite dejar mojada por agua a la tubería de revestimiento y la formación.

Habiendo considerado todos los trabajos anteriormente mencionados, se ha adoptado el siguiente criterio, acerca del desplazamiento del lodo y los fluidos espaciadores: Separar el lodo y el cemento con un fluido compatible con cada uno, que permita dejar mojada por agua la tubería de revestimiento. Este fluido deberá tener una densidad mayor que la del lodo, pero menor que la del cemento, sin permitir un excesivo asentamiento de sólidos, y podrá ser bombeado en régimen de flujo turbulento, sin crear excesivas caídas de presión por fricción. Sin embargo, la selección del fluido espaciador, es solamente una parte de la operación total de cementación. Todas las fases de la operación se deben considerar, y serán discutidas con algún detalle en lo que resta de este artículo. Se puede encontrar un resumen de estas consideraciones en una guía, en el apéndice 1.

#### Geometría del agujero.

La geometría del agujero por cementar es muy importante desde el punto de vista del desplazamiento del lodo, así como del bombeo del volumen correcto de cemento. Deberá considerarse la tendencia del agujero a ser de un diámetro, comúnmente llamado diámetro uniforme, y la tendencia del agujero a ser de forma ovalada, mas que redonda. Ambas condiciones pueden conducir a un deficiente desplazamiento del lodo, resultando en un trabajo de cementación menos eficiente. Si el agujero tiene variaciones en el diámetro, llamados derrumbes, la velocidad anular, a lo largo de esa sección, será menor que en las partes donde el diámetro del agujero es uniforme. Si esta velocidad anular es lo suficientemente baja, el lodo y los recortes permanecerán en estado gel en las zonas derrumbadas, y, en consecuencia, será muy difícil la remoción del lodo por el cemento. Haut y Crooken, en una publicación de 1979, le llamaron a esto el factor de movilidad del lodo, MMF, y lo calcularon así:

$$\text{MMF} = \frac{1}{V_f (G_{10} \text{ min})}$$

$V_f$  = Volumen filtrado

$G_{10} \text{ min}$  = Esfuerzo gel a los 10 minutos.

Ellos concluyeron que mientras menor sea el MMF, menor será el porcentaje de remoción del lodo del pozo. En esencia, esto quiere decir que el lodo de mayor viscosidad es el más difícil de ser desplazado del pozo.

La segunda parte importante de la geometría del agujero es



considerar si el agujero es redondo. Si el volumen de cemento se subestima, la cima del cemento puede estar más abajo de lo que se requiere; en el caso de una tubería corta, puede resultar en una costosa operación de reparación. Se puede también concluir, incorrectamente, que el fluido espaciador no realizó apropiadamente su trabajo de remoción del lodo. Para evitar estos problemas generalmente se mide el diámetro del agujero, para determinar el volumen de cemento a bombear.

Existen actualmente tres tipos de registros calibradores de agujero: de 2, 3 y 4 brazos. Las figuras 3, 4 y 5 ilustran las ventajas y desventajas de cada uno.

El registro calibrador de agujero de 2 brazos se dispone en varios registros radioactivos y eléctricos. Como se ilustra, las partes observadas del agujero proporcionarán un volumen mayor que cuando el volumen es calculado como la amplitud de dos brazos iguales al diámetro de un círculo.

El registro calibrador de agujero de 3 brazos, puede calcular en agujeros ovalados lo contrario del registro de 2 brazos, y proporcionar un volumen mucho menor que el de las condiciones reales.

El registro calibrador de agujero de 4 brazos, proporcionará la más precisa representación de la geometría real del agujero. Este registro se puede obtener con diferentes tipos de registros. También será de ayuda si se introduce con un integrador, para un fácil cálculo de los volúmenes de cemento y del tamaño del diámetro promedio del agujero, para utilizarse en los cálculos de la velocidad de desplazamiento. Cualquier esfuerzo en la perforación del pozo, que proporcione un agujero más uniforme deberá de realizarse. Esto puede incluir: perforación controlada, menor tiempo del agujero expuesto al lodo, mejor control de los sólidos en el lodo, una mejor determinación de la presión de poro, un mejor control del contenido de calcio en el lodo. Si al final estas medidas resultan en una mayor uniformidad del agujero y en una mejor remoción del lodo durante la operación de cementación, bien puede valer la pena el esfuerzo realizado, en términos de menos operaciones de reparación costosas y un mejor control del perfil del agujero.

#### Acondicionamiento de la tubería de revestimiento.

Antes de que la tubería de revestimiento sea transportada al pozo, se deberá realizar una minuciosa inspección y acondicionamiento de la superficie de la tubería de revestimiento. Además de la acostumbrada revisión del espesor de la pared, inspección de los coples y diámetro de trabajo, deberá realizarse un acondicionamiento de la superficie exterior de la tubería de revestimiento.

En 1964 un estudio de Carter y Evans, reportó una marcada

diferencia en la capacidad de adherencia del cemento, a la superficie de la tubería de revestimiento, dependiendo del tipo de acondicionamiento que la superficie había experimentado. La tabla 3 muestra un resumen de estos resultados.

Como puede observarse de sus experimentos, la superficie que proporciona las mejores características de adherencia es la revestida con arena adherida a la superficie con resina. Si se selecciona este método de acondicionamiento de la tubería de revestimiento, deberán realizarse varias operaciones: 1) Deberá removerse adecuadamente el recubrimiento, y dar un baño de arena inyectada a presión con aire, antes de colocar el recubrimiento de resina; 2) el recubrimiento de resina no deberá ser demasiado grueso; 3) el recubrimiento de arena deberá ser de arena angular, y no ser demasiado; 4) si se utiliza una resina epóxica, el límite de temperatura estática de fondo, que puede soportar la resina, es de unos 230°F; 5) Se deberán realizar pruebas para asegurar que el surfactante utilizado en el fluido espaciador, deje mojada por agua a la resina de la superficie de la tubería de revestimiento y sin que se dañe químicamente el recubrimiento; 6) deberá tenerse mucho cuidado en la colocación de los contradores, para garantizar que en ningún momento, durante la introducción de la tubería de revestimiento, los contradores se colapsen completamente y la tubería de revestimiento raspe contra la pared del agujero.

Generalmente esto es difícil de realizarse en una operación común. La segunda mejor alternativa, que generalmente se selecciona, es someter a la tubería de revestimiento a la acción de un chorro de arena con aire a presión, para proporcionarle una superficie rugosa. Esto no quiere decir que el recubrimiento de resina no sea un mejor proceso, solamente que requiere mayor control de calidad y planeación.

De cualquiera de los dos métodos que sean utilizados, la pregunta permanece; ¿Qué tramo de la superficie de la tubería de revestimiento será acondicionarse desde la zapata de la tubería de revestimiento? Para contestar esta pregunta deberán considerarse tanto la zona por aislar como la tubería de revestimiento que requiere apoyo.

Cuando se considera la zona por aislar, generalmente de 200 a 500 pies es suficiente. Cuando se considera el apoyo de la tubería de revestimiento se puede utilizar la siguiente fórmula para calcular la altura de la columna de cemento adherida, requerida para soportar la tubería de revestimiento.

$$S_t = \frac{C_L C_w}{9.69 d_o h c}$$

$S_t$  = Resistencia a la tensión del cemento, lb/pg<sup>2</sup>  
 $C_L$  = Longitud de la tubería de revestimiento, pies  
 $C_w$  = Peso de la tubería de revestimiento, lb/pie  
 $d_o$  = Diámetro exterior de la tubería de revestimiento, pg  
 $h_c$  = Altura de la columna de cemento, pies

Como se puede observar de la ecuación anterior, un factor importante, del cual rara vez se realizan pruebas, es la resistencia a la tensión de cemento. Utilizando valores mínimos para el valor de resistencia a la tensión del cemento, y un factor de seguridad de uno a dos, se ha encontrado que 500 pies del pozo rodeado de cemento se requieren generalmente para tener un buen apoyo de la tubería de revestimiento.

Centrado de la tubería de revestimiento.

Varios autores han reconocido y discutido los beneficios que tiene el centrado de la tubería de revestimiento con respecto a la eficiente remoción de lodo durante la cementación. La industria parece confiar en varios modelos matemáticos para la predicción de presiones, densidades equivalentes de circulación, fuerzas de arrastre durante el movimiento recíprocante de la tubería de revestimiento, etc. Estos métodos están basados en la suposición de tuberías de revestimiento centradas. Mientras que estos métodos de cálculo son aceptados, la colocación de centradores es a menudo minimizada, generalmente debido a experiencias anteriores con centradores que han sido destruidos y ha fallado la introducción de la tubería de revestimiento.

Solamente un autor, Graham,<sup>31</sup> ha desarrollado un modelo para la remoción efectiva del lodo en tuberías de revestimiento no centradas. Un problema con este método es que para efectuar una completa remoción del lodo, se debe bombear un gran volumen de cemento, mayor que cuando la tubería de revestimiento está centrada. Debido a la incertidumbre relacionada con el método de Graham, se prefiere utilizar el número justo de centradores para un centrado mínimo de 67%. Los beneficios del buen centrado de la tubería de revestimiento, se analizan en un artículo de Taplitz y Hassebroek, en 1964. Ellos encontraron que: "Los resultados de la primera prueba fueron altamente satisfactorios. La tubería se estaba introduciendo en el pozo con mayor facilidad que la usual, y después de asentar la tubería, la cima del cemento se encontró abajo del punto de llenado calculado, a partir del registro calibrador del diámetro. De 1000 a 2000 pies arriba de este nivel, se había experimentado en los pozos anteriores. Es más, el pozo estaba produciendo sin requerir una cementación forzada, un comportamiento extremadamente raro para el campo bajo observación".

Lo que se requiere es un buen método para calcular el número



ro y la colocación de los centradores. Si se selecciona un centrador aprobado por el A.P.I., las especificaciones mínimas de diseño están disponibles, y pueden encontrarse en la especificación 10D del A.P.I.. De principal importancia es que para poder satisfacer las especificaciones A.P.I., el centrador deberá poseer una fuerza restauradora capaz de obtener un centrado del 67%.

Cálculo del centrado:

$$\% \text{ Centrado} = 100 (W_n / (R_h - R_p))$$

$W_n$  = Distancia mínima entre el diámetro exterior de la tubería y el diámetro interior del pozo, pg.

$R_h$  = Radio del pozo, pg.

$R_p$  = Radio de la tubería, pg.

Actualmente existen varios métodos para calcular la colocación de centradores. El más fácil, pero menos preciso, es el siguiente:

Espaciamiento mínimo entre centradores para un centrado del

$$67\% = \frac{\text{(Fuerza restaurante) (lb/pie)}}{\text{(Seno del ángulo del pozo x peso de tubería, lb/pie)}}$$

Desafortunadamente la ecuación anterior está limitada en cierto grado, como lo reconoció Myers y Sutko en 1968, donde en sus cálculos se consideran los efectos de pata de perro, el cambio de ángulo del agujero, y qué tanta tensión está actuando sobre el centrador. Ellos calcularon el espaciamiento mínimo entre centradores como una función de la carga lateral ejercida sobre el centrador, contra la fuerza mínima restauradora que posee el centrador. Esto está expresado como:<sup>28</sup>

Tensión,  $T_{i-1}$  = Peso de la tubería de revestimiento, en libras/pie, por pies de tubería de revestimiento abajo del centrador.

Componente vertical = Peso de la tubería de revestimiento, en libras/pie por pie de tubería de revestimiento, entre el centrador X Seno del ángulo de desviación del pozo en el centrador.

Componentes de la tensión =  $2( (T_{i-1} + \text{Peso de tubería de revestimiento/pie entre los centradores X Coseno del ángulo de desviación del pozo}) \times \text{Seno } 1/2 \text{ del cambio en el ángulo entre los centradores})$ .

Carga lateral, lb. = Componente vertical + Componente a la tensión.

A las ecuaciones anteriores comúnmente se les conoce como "un modelo bidimensional", el cual ha sido extendido por diferentes investigadores para incluir los efectos de flotación, radio de curvatura o cambio en la dirección del pozo. Un autor, Lee, ha publicado un algoritmo para resolver este modelo de colocación tridimensional. Otro autor, Goodwin, ha diseñado un método para el cálculo del pandeo entre centradores. Estos últimos métodos se han considerado con cierta reserva y su aceptación en el campo ha sido limitada.

En todos los casos, un medio mecánico del centrado de la tubería de revestimiento ayudará en el proceso de desplazamiento del lodo. Se debe recordar que si la tubería está en contacto con la pared del pozo, es imposible colocar el cemento entre la tubería de revestimiento y la pared.

Todo esfuerzo dirigido a obtener un buen desplazamiento del lodo, será anulado debido a la inadecuada colocación de los centradores, y se reflejará en la evaluación final del trabajo de cementación.

Velocidad de introducción de la tubería.

Otro problema que puede afectar el éxito o fracaso de la operación de cementación, es la pérdida de circulación, debido al fracturamiento de la formación, durante la introducción de la tubería de revestimiento. Esto es comúnmente llamado presión de surgencia y puede ser realmente importante si no se toma en cuenta durante el descenso de la tubería de revestimiento dentro del agujero. Otra vez; no se mejora el proceso de desplazamiento del lodo, si no se puede obtener una completa circulación antes y durante la cementación del pozo. La velocidad de introducción de la tubería, particularmente la velocidad de descenso, deberá calcularse antes de iniciar la operación de introducción de la tubería de revestimiento. Después de calcular la velocidad apropiada de descenso, la cuadrilla de piso y el perforador deberán controlarla, para garantizar que no se exceda esta velocidad. Un problema que a menudo se presenta, es que la cuadrilla de piso calcula la velocidad en base al tiempo total que ellos emplean para introducir la tubería de revestimiento. Esta auto-evaluación conduce a velocidades de descenso muy rápidas. La solución a este problema, es dar a conocer a la cuadrilla de piso la ventaja que tendrán al descender lentamente la tubería, y que esto será tomado en consideración cuando su trabajo sea evaluado.

Dos autores han proporcionado modelos matemáticos y gráficas para calcular las presiones de surgencia durante la introducción de la tubería de revestimiento. Estos modelos se utilizan cuando el fluido en el pozo se encuentra en un régimen de flujo laminar, y esto debe ser considerado cuando se efectúen los cálculos. 32, 33

Estas fórmulas se pueden utilizar para obtener una velocidad máxima de introducción de la tubería de revestimiento. Comparando la presión de surgencia resultante con los gradientes de presión de fractura y, manteniéndose abajo de éstos, deberá proporcionar al pozo la capacidad de establecer circulación con la tubería de revestimiento en el fondo.

Circulación y movimiento de la tubería antes de la cementación.

Casi todos los autores que han escrito acerca de la cementación de pozos, han reconocido los beneficios de la circulación en el pozo antes de la cementación, y el movimiento de la tubería. Desafortunadamente no existe un procedimiento o guía para cada caso. Se sabe que la mayoría de los lodos son de bajo esfuerzo de corte, y forman geles con sólidos en suspensión cuando permanecen en reposo. También se sabe que es más fácil desplazar un fluido de baja viscosidad que uno de alta viscosidad. La circulación y el movimiento de la tubería ayudará a romper los geles y reducir la viscosidad del lodo. También el movimiento de la tubería puede desviar el flujo hacia dentro de los derrumbes, donde de otra manera no podría llegar.

La pregunta permanece: ¿Cuánto tiempo deberá circularse el lodo en el pozo antes de que se inicie la cementación?. Existen dos reglas prácticas para responder esta pregunta:

- 1) Circular del fondo hacia arriba para asegurar que no existe flujo de gas, lo cual puede afectar la calidad del cemento o, el peor caso, descargar el espacio anular.
- 2) Circular, al menos, un volumen de tubería de revestimiento, para garantizar que no se ha dejado nada en la tubería de revestimiento, que taponará los flotadores cuando pase a través de éstos.

Las dos anteriores son buenas reglas prácticas, pero no dicen que tanto tiempo circular antes de la cementación. El criterio más adecuado a las necesidades, es uno propuesto por Smith en un artículo de 1982, el cual recomienda la circulación del pozo hasta que el 95% del volumen del agujero obtenido con el registro calibrador se haya circulado.<sup>22</sup>

El análisis de la decisión se basa en el hecho de que el cemento no remplazará el enjarre si éste no es móvil. Los principales pasos tomados para este proceso, incluyen:

- 1) Después de perforar hasta la profundidad total, y circular todos los recortes del pozo, introducir de preferencia el registro calibrador de 4 brazos.
- 2) Realizar la prueba de eficiencia de bombeo del lodo, introduciendo un volumen conocido de lodo.



- 3) Introducir al pozo la tubería corta o la tubería de revestimiento con centradores, e iniciar la circulación y el movimiento de la tubería. Dejar caer la canica de carburo, arena, etc. y registrar las emboladas hasta que la canica llegue al vibrador. Circular al gasto más alto que sea posible, sin el riesgo de sobrepasar los gradientes de fractura con un exceso de las pérdidas de presión por fricción.
- 4) Si se utiliza el método de arrojar la canica de carburo, verificar con la unidad de toma de registros del lodo si se puede registrar acetileno con el cromatógrafo de gas.
- 5) Correlacionar las emboladas cuantificadas con el volumen del agujero obtenido del registro calibrador de agujero, y continuar el movimiento de la tubería, la circulación, y el acondicionamiento del lodo, hasta que el 95% o más del volumen del agujero se halla circulado.

Cuando se utiliza este procedimiento, generalmente se ha encontrado que se experimentan tiempos de circulación "mayores de lo normal". Un problema asociado es la erosión que resulta en los accesorios de la tubería de revestimiento, principalmente en los flotadores. Stringfellow publicó en un artículo de enero de 1985, que había encontrado que las válvulas globo, las válvulas de charnela y las válvulas de retención, mal diseñadas, fallaban bajo una presión diferencial, después que se extendían los tiempos de circulación con lodos con alto contenido de sólidos. Estas pruebas condujeron a un nuevo diseño de válvulas.

Si fallan las válvulas del equipo de flotación, habrá que mantener la presión interior en la tubería de revestimiento, para prevenir que el cemento forme un vaso comunicante. Esta presión interna, cuando se libera, provoca la formación de un micro espacio anular y puede conducir a una evaluación incorrecta de la cementación. Por esta razón donde esté planeado prolongar la circulación previa a la cementación, sólo deberán utilizarse válvulas de flotación que hayan sido sometidas a la prueba dinámica.

Como se estableció anteriormente, se ha reconocido que el movimiento de la tubería beneficia la remoción del lodo durante la cementación. Otra vez las preguntas son: ¿qué tanto? ¿qué tan rápido?. La primera decisión que debe tomarse es si la tubería será girada, movida en forma recíprocante, o con ambos movimientos. Desde el punto de vista operativo, el movimiento giratorio es mucho más difícil, debido a la necesidad de las uniones giratorias, el cabezal de rotación y centradores adecuados. En método usual de movimiento de la tubería, es el recíprocante. Mientras la tubería no se mueva a una velocidad a la que el pozo sea inducido o fracturado, este tipo de movimiento parece proporcionar un mejor desplazamiento del lodo, que sin movimiento. Si no se considera como una opción el movimiento recíprocante, como pudiera ser el caso de una tubería corta, entonces el movimiento

giratorio puede considerarse. Existen colgadores de rotación para tuberías cortas, que utilizan cajas de sellados de chumacera para la rotación. También existen colgadores que giran en cojinetes no sellados de baleros, pero generalmente la vida de rotación es más corta, debido a la erosión de sólidos en los cojinetes. La ventaja que tienen las herramientas de rotación es que la tubería corta puede quedar colgada, la herramienta de introducción y asentamiento se libera y la tubería corta puede continuar girando. Una vez que el cemento esté en el lugar, todo lo que se requiere es un esfuerzo de tensión para recuperar las herramientas introducidas.

#### Diseño del fluido espaciador.

Cuando se selecciona un fluido espaciador, para efectuar un eficiente desplazamiento del lodo, deberán tomarse en consideración los siguientes criterios:

- a) Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo.
- b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento.
- c) Características de mojabilidad del fluido espaciador.
- d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión.
- e) Tiempo de contacto.
- f) Dónde colocar los tapones limpiadores en relación con el lodo, fluido espaciador, y el cemento.

#### Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo.

Como se discutió anteriormente, se sabe que algún tipo de fluido espaciador deberá ser colocado entre el lodo y el cemento, para prevenir la rigidez de estos fluidos cuando son incompatibles. Con lodos base agua que se han tratado poco, o no han sido tratados químicamente, un pequeño volumen de agua fresca se ha bombeado como fluido espaciador entre el lodo y el cemento y se han registrado resultados satisfactorios. Los investigadores han encontrado que cuando los lodos son tratados, la incompatibilidad hace muy difícil el proceso de remoción del lodo, y ha conducido al desarrollo de fluidos espaciadores compatibles con el lodo y con el cemento.

Uno de los pasos intermedios a lo largo de estos 45 años de procesos de desarrollo fue la "lechada raspadora". En los años 40 se conocía que con altos gastos de bombeo y usando agua como fluido espaciador, se obtenía una mejor remoción del lodo. Fue hasta los años 60 que se reconoció que un fluido en régimen de flujo turbulento, aproximadamente en contacto 10 minutos con el punto de interés, podría también proporcionar una mejor remoción del lodo. También se concluyó que este fluido, en régimen de flujo turbulento, debe poseer características de baja pérdida de fluido para ser capaz de conservar las propiedades reológicas a lo largo del desplazamiento.

Posteriormente, en los años 70 y 80, 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 desplazarse en régimen de flujo turbulento a razonables gastos de bombeo, y aún mantener la suspensión de sólidos requerida para obtener una densidad mayor que la del lodo. Estos fluidos espaciadores generalmente son polímeros en soluciones acuosas capaces de mantener los sólidos en suspensión.

El criterio más importante en la selección de un fluido espaciador es que el fluido seleccionado pueda desplazarse en turbulencia a gastos de bombeo razonables para la geometría que presenta el pozo. Se sabe que un fluido newtoniano, como el agua, requiere el menor esfuerzo de corte y gasto de bombeo para obtener flujo turbulento bajo un conjunto de condiciones establecidas, y esto puede ser calculado mediante:

$$\text{Viscosidad, cp.} = \frac{300 (\text{lectura del disco})}{(\text{RPM})}$$

lectura del disco = lectura del disco del viscosímetro Fann  
 RPM = revoluciones por minuto del rotor del viscosímetro Fann

y el gasto crítico,  $Q_c$

$$Q_c, \text{ bl/min} = \frac{((cp)(D_h + D_p))}{(5.31 (lb/gal))}$$

cp = viscosidad del fluido espaciador, cp.  
 $D_h$  = diámetro del agujero, pg.  
 $D_p$  = diámetro exterior de la tubería, pg.  
 lb/gal = densidad del fluido espaciador, lb/gal.

Cuando la densidad del lodo es inferior o igual a 9 lb/gal, generalmente se utiliza agua como fluido espaciador. Frecuentemente se agregan 5 lb de sosa cáustica por barril de agua fresca o agua de mar, para elevar el pH. Se han obtenido resultados favorables cuando esta solución cáustica se bombea adelantante de la lechada de cemento a volúmenes equivalentes a un tiempo de contacto de 10 minutos. Este sencillo fluido espaciador puede mezclarse fácilmente en la presa, si ésta es del volumen suficiente.

Como la mayoría de los fluidos espaciadores de alta densidad, no son fluidos newtonianos, generalmente se utiliza el modo de ley de potencias para calcular los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción. Lo primero que se requiere es calcular el índice de comportamiento de flujo,  $n'$ , y posteriormente el índice de consistencia,  $K'$ .

Los valores de  $n'$  y  $K'$  son funciones del logaritmo de la velocidad de corte contra el logaritmo del esfuerzo de corte cuando se grafican para diferente velocidad de corte, la pendiente que se obtiene de la gráfica, proporciona el valor de  $n'$ , y la



intercepción con el eje Y provee el valor de K'. Si la gráfica no se construye, un procedimiento fácil es calcularlos por regresión lineal, a partir de los datos registrados en el viscosímetro Fann.

Lo anterior es el procedimiento más simple y probablemente lo suficiente preciso para la mayoría de las aplicaciones de campo.

Bannistery Bange<sup>21</sup> encontraron que ocurre un fenómeno en los fluidos con un alto contenido de sólidos, el cual es llamado "resbalamiento de pared". La sensibilidad del modelo de ley de potencia al "resbalamiento de pared", es una función de la cercanía del fluido en relación con la tubería o la pared del agujero.

Este coeficiente de "resbalamiento de pared", se puede determinar utilizando un viscosímetro Fann 35 y realizando pruebas similares con diferentes combinaciones de resortes de rotor.

Una vez que se han determinado los valores de n' y K' del fluido espaciador, deberá calcularse el gasto mínimo de bombeo con el que se obtendrá flujo turbulento. Se deberán hacer ciertas suposiciones, y establecer las presiones de fractura consideradas. Se recomienda que estos cálculos se realicen con datos de laboratorio y datos de campo, a partir de la mezcla real del fluido espaciador. El gasto crítico para obtener flujo turbulento puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Q_c = \left[ \frac{N_{Re} K' \left( \frac{96}{D_h - D_p} \right)^{n'}}{1.86 \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}} \left( \frac{D_n^2 - D_p^2}{17.157} \right)$$

$Q_c$  = Gasto para obtener flujo turbulento en el espacio anular, bl/min.

$N_{Re}$  = Número de Reynolds, adimensional

$K'$  = Índice de consistencia  $\frac{\text{lb-seg}}{\text{pie}^2}$

$n'$  = Índice de comportamiento de flujo, adimensional

$D_p$  = Diámetro del agujero, pg.

$D_n$  = Diámetro de la tubería, pg

$\rho$  = Densidad del fluido, lb/gal

Como se estableció, la ecuación estándar de la ley de potencias y los métodos para la determinación de n' y K', serán sufcientes para la mayoría de las aplicaciones; el fluido espaciador deberá seleccionarse con el siguiente criterio: deberán de ser considerados para evaluaciones posteriores los fluidos espaciadores que satisfagan este criterio.

## Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento.

De segunda mayor importancia, para la selección del fluido espaciador, es saber si el fluido espaciador es o no compatible con el lodo y el cemento. Cuando se seleccione el tipo de espaciador requerido, se deberán considerar factores como: tratamiento químico del lodo; tipo de lodo, base aceite o agua; carga iónica del emulsificante y los aditivos químicos, para asegurar compatibilidad con el lodo y el cemento.

Como la tubería de revestimiento y la formación deberán estar mojadas 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, pudiera encontrarse un surfactante o una combinación de surfactantes que deje mojada por agua, para facilitar la compatibilidad del fluido espaciador con el lodo base aceite. Esto es lo ideal. Si no se puede realizar, se deberá bombear entre el lodo y el cemento un batch de fluido oleoso. Sería ideal que este fluido oleoso pudiera prepararse con la densidad del lodo; pero esto no es siempre posible debido a las bajas viscosidades de algunos de los aceites de baja toxicidad. Si se utiliza el método anterior, los siguientes pasos pueden ser una guía típica de bombeo:

- a) lodo
- b) 20 bl de fluido oleoso
- c) 50 bl de fluido espaciador
- d) primera parte de la lechada de cemento
- e) parte final de la lechada de cemento
- f) 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 bombearse un fluido compatible base aceite adelante del fluido espaciador.

## Densidad del fluido espaciador y contenido de sólidos en suspensión.

Cuando se diseña un fluido espaciador, deberá considerarse la densidad de éste. Lo que generalmente se hace es diseñar la densidad del fluido espaciador entre la densidad del lodo y la del cemento. Se acostumbra que el fluido espaciador sea de una densidad de 0.5 lb/gal mayor que la del lodo. Aunque los fluidos espaciadores de mayor densidad pueden no ser perjudiciales, ellos serán más costosos. Los fluidos espaciadores de mayor densidad también pueden crear mayores densidades de circulación durante la colocación del cemento.

El otro problema con los fluidos espaciadores de alta densidad, especialmente aquéllos con viscosidades lo suficientemente



bajas para desplazarse en turbulencia, es la tendencia al asentamiento de sólidos. A menos que se utilicen polímeros al formular el fluido espaciador, que rompan sus uniones con la temperatura, permitiendo así reducir la viscosidad del fluido espaciador durante la colocación del cemento, el asentamiento de sólidos en la superficie puede ser un problema. Lo que se requiere para mantener los sólidos en suspensión es un equipo de mezclado bien diseñado, de preferencia con un fondo cónico, y líneas de succión de bombeo, que permitan obtener velocidades lo suficientemente altas para mantener estos sólidos en suspensión.

Se requiere una verificación final de los agentes densificantes. Generalmente se utiliza barita para densificar el fluido espaciador. Frecuentemente las compañías de servicio diseñan sus mezclas usando la densidad relativa del mineral puro. Como el mineral puro nunca se tiene en el campo, se deberá verificar la densidad relativa de la barita disponible y 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, y deberán realizarse otras pruebas para re-calcular las densidades equivalentes de circulación, etc.

#### Tapones Limpiadores.

Una vez que se seleccionó el fluido espaciador, se realizaron las pruebas de compatibilidad, se determinó la cantidad del fluido espaciador, y si se bombea o no el fluido oleoso, permanece la pregunta de cómo separar los fluidos cuando se bombeen por la tubería de revestimiento. Como el desplazamiento de los fluidos está diseñado tomando en cuenta su densidad relativa, los fluidos más ligeros generalmente están al final de la cima del espacio anular, y los de mayor densidad en el fondo. Evidentemente que durante la colocación del cemento, sucede justamente lo contrario. Un método que ha sido y puede ser utilizado, es colocar tapones limpiadores de "fondo" entre el lodo y el fluido oleoso, entre el fluido oleoso y el fluido espaciador, y entre el fluido espaciador y el cemento.

Esto se puede realizar de la siguiente manera:

- a) Introducir el primer tapón
- b) Bombear 5 bl de fluido oleoso y soltar el tapón, bombear 5 bl mas y parar.
- c) Introducir del segundo tapón
- d) Bombear el resto del fluido oleoso y soltar el segundo tapón.
- e) Bombear 5 bl del fluido espaciador y parar
- f) Introducir el tercer tapón
- g) Bombear el resto del fluido espaciador y soltar el tercer tapón.
- h) Bombear 5 bl de cemento y parar
- i) Introducir el tapón superior



j). Bombear el resto del cemento, soltar el tapón superior y desplazar.

Antes de levantar el cabezal de cementación, deberá verificarse la amplitud del elevador y la longitud de las asas, para asegurar que la tapa del cabezal de cementación, se pueda desalojar con el cabezal sujeto al elevador.

Control de la operación y de los ritmos de flujo.

En las secciones anteriores se discutió el criterio para efectuar un buen desplazamiento del lodo, pero toda la planeación no será útil si la realización del plan es defectuosa. Durante una cementación típica, los fluidos espaciadores y la lechada de cemento se mezclan, densifican y desplazan con el gasto necesario para colocar el cemento antes de que fragüe. Se sabe, especialmente por quien alguna vez ha estado en las operaciones de cementación, que durante la operación el cemento de mayor densidad, trata de equilibrar en forma de U las presiones en el espacio anular. A este fenómeno generalmente se le conoce como fenómeno de vacío.

Estudios recientes<sup>38,39</sup> han proporcionado modelos matemáticos para la predicción de este fenómeno de la caída libre, y con casos de campo estudiados se ha confirmado su validez. Las conclusiones han incluido:

- a) Debido a la aceleración, se han observado gastos de desplazamiento superiores a los diseñados.
- b) El incremento de los gastos de desplazamiento ha conducido al incremento de las densidades equivalentes de circulación.
- c) Se han previsto y remediado los efectos de golpe de ariete ocasionados por las variaciones abruptas del flujo del fluido.

Los autores mencionados, han descrito los efectos de la caída libre, y han sugerido cambios en los gastos de bombeo para compensar el efecto de "tubo en U". Generalmente se requieren medidores precisos de entrada y salida del flujo del pozo, para un adecuado control de lo que está ocurriendo en el fondo del pozo. Para un adecuado control el fluido desalojado, se requerirá una modificación de la línea de descarga, para facilitar la instalación de un medidor de flujo.

Los medidores de flujo comúnmente utilizados incluyen, turbo medidores, medidores sónicos y medidores de micro-desplazamiento.

Las consecuencias de permitir la caída libre del cemento, puede incluir el rompimiento de la tubería de revestimiento, debido a la reducción de la presión del colapso, a partir de un esfuerzo a la tensión ejercido sobre la tubería de revestimiento. La reducción de la presión al colapso se puede calcular mediante:

$$P_{ca} = \left[ \sqrt{1 - (0.75(S_a + P_i)/Y_p)^2} - 0.5 (S_a + P_i/Y_p) \right] P_{co}$$

$P_{ca}$  = Mínima presión al colapso bajo un esfuerzo de tensión axial, lb/pg<sup>2</sup>.

$P_{co}$  = Mínima presión al colapso sin un esfuerzo de tensión axial, lb/pg<sup>2</sup>.

$S_a$  = Esfuerzo de tensión axial, lb/pg<sup>2</sup>

$P_i$  = Presión interna, lb/pg<sup>2</sup>

$Y_p$  = Mínimo esfuerzo a la deformación, lb/pg<sup>2</sup>

El segundo problema relacionado con la caída libre del cemento es la generación de altas densidades equivalentes de circulación, durante la colocación de la lechada, y, posiblemente, el fracturamiento de la formación. Se recomienda que se calcule la densidad equivalente de circulación antes de la cementación del pozo, y que se relacione con el gasto de desplazamiento a ser calculado. La densidad equivalente de circulación se puede calcular mediante:

$$E.C.D. = \frac{\left( \left( \frac{0.039 LP V^2 f}{D_h - D_p} \right) + P_h \right)}{0.052 \times T.V.D.}$$

L = Longitud de la columna de fluido, pie

P = Densidad de la columna de lodo, lb/gal

V = Velocidad, pie/seg

f = Factor de fricción, adimensional

$D_h$  = Diámetro del pozo, pg

$D_p$  = Diámetro de la tubería, pg

$P_h$  = presión hidrostática, lb/pg<sup>2</sup>

T.V.D. = Profundidad vertical efectiva

¿Qué se puede hacer para prevenir esta caída libre?. Los autores mencionados anteriormente, sugieren reducciones e incrementos del gasto a tiempos previamente calculados para minimizar los efectos. Una alternativa es regular el flujo del espacio anular, hasta ajustarlo al flujo en el interior de la tubería de revestimiento.

Esto requerirá medidores de flujo en el inicio y al final del sistema, y un estrangulador ajustable en la parte final. La presión en el acumulador tendrá que ser reducida para facilitar el movimiento de la tubería a través del preventor esférico (hydril) durante el desplazamiento. Si lo que se sugirió se realiza correctamente en el pozo, se puede controlar el proceso de desplazamiento del lodo, y si no es favorable la evaluación de la cementación, se pueden tomar las decisiones adecuadas de ingeniería para mejorar el resultado de la operación.

## CONCLUSIONES:

El proceso de desplazamiento del lodo, durante una operación de cementación, no solamente depende del empleo de un mejor fluido espaciador, un mayor gasto de bombeo, mayor número de centradores, mayor movimiento de la tubería, y lodo con bajas propiedades reológicas, es todo lo anterior y más. Cuando se diseña una operación de cementación deberán considerarse cada uno de los aspectos del proceso integral. No es un trabajo que una sola persona pueda controlar. Es un trabajo de equipo, que debe incluir al personal ejecutivo, a las operaciones de perforación, a los ingenieros de diseño de la perforación, al contratista del equipo, y al personal de servicio. No es un proceso que se inicia cuando la tubería está en el fondo. Debe iniciarse durante la perforación del pozo a cementar, donde deberán realizarse todos los esfuerzos para mejorar el proceso de desplazamiento del lodo. La otra parte del proceso que debe mejorarse, es el mantener buenos registros. La tecnología se está mejorando cada día y los ingenieros deberán actualizarse si se desea realizar el mejor trabajo posible. Solamente si se disponen de buenos registros, para evaluar lo que ocurre en un trabajo de cementación, se puede optimizar el diseño de desplazamiento del lodo, hasta ser el más eficiente, y realizándolo consistentemente se lograrán buenas cementaciones.

## APENDICE

### PROCEDIMIENTO PREVIO A LA CEMENTACION

- 1) Determinar los gastos de desplazamiento durante la cementación, para un fluido espaciador típico, en base al tipo de tubería a cementar, las capacidades de bombeo y mezclado, y las densidades equivalentes de circulación.
- 2) Seleccionar el fluido espaciador y probar la compatibilidad con el sistema del lodo. Si no es compatible, seleccionar otro fluido espaciador o utilizar un fluido prelavador base aceite.
- 3) Después de seleccionar el fluido espaciador, determinar la reología a condiciones de temperatura de circulación en el fondo del pozo y, si es posible, a la presión de fondo.
- 4) Utilizar la reología, para recalcular las densidades equivalentes de circulación durante la cementación, y seleccionar el gasto de desplazamiento y las capacidades de mezclado y bombeo.
- 5) Determinar el tipo de movimiento al que se someterá la tubería (giratorio o reciprocante) y sus velocidades.
- 6) Verificar el tamaño del cabezal de lanzamiento del tapón del cemento y comparar la amplitud y longitud del asiento, para asegurar que pueda lanzarse en el cabezal. Si es necesario, obte-



ner asientos especiales e instalarlos antes de la introducción de la tubería de revestimiento.

- 7) Calcular el peso de la tubería de revestimiento dentro del lodo y no superar, durante el movimiento recíprocante, el peso de arrastre que proporciona un factor de seguridad en el cuerpo o en la junta de 1 a 2, cualesquiera de éstos que sea menor.
- 8) Calcular los volúmenes de cemento y las velocidades anulares en base al registro calibrador del diámetro del agujero de 4 brazos.
- 9) Verificar la densidad de la barita, u otro tipo de material densificante, para ver si es la misma que se usó para calcular las tablas de mezclado de las compañías de servicio. A menudo las tablas de mezclado están calculadas con la densidad del agente densificante suponiendo al mineral puro, cuando en realidad los agentes densificantes generalmente no lo son. Esto ocasionará que se requiera mayor cantidad de agente densificante, y se deberá planear bajo esta consideración.

#### PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA INTRODUCCION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO, EL ACONDICIONAMIENTO DEL POZO Y EL USO DEL FLUIDO ESPACIADOR.

- 1) Cuantificar la longitud de tubería de revestimiento y perforar el pozo para que tenga el agujero lo mejor calibrado posible hasta la profundidad total, de tal manera que la tubería de revestimiento se pueda descender hasta una distancia de 5 pies del fondo. Si es posible proporcionar una área en el espacio anular mayor de  $10 \text{ pg}^2$ .
- 2) Acondicionar el lodo a valores reducidos de punto de cedencia y viscosidad plástica, antes de introducirla T.R. al fondo. Mantener reducido el contenido de sólidos, especialmente si el agujero tiene un alto ángulo de desviación.
- 3) Asegurar que por lo menos 500 pies de la tubería de revestimiento sobre la zapata hayan sido tratados con un chorro de arena con aire para proporcionarle una superficie rugosa; o bien las zonas de interés y un mínimo de 500 pies adicionales.
- 4) Asegurar el centrado de la T.R. con centradores aprobados por el A.P.I., utilizando como mínimo la guía de diseño de espaciado indicada en la especificación 10D del A.P.I.
- 5) Calcular las presiones de surgencia durante la introducción de la tubería, e introducirla a una velocidad lo suficientemente lenta para prevenir el fracturamiento de la formación.
- 6) Instalar sobre las conexiones la "rosca acme", para la rápida conexión de las roscas de la tubería de revestimiento sobre la junta superior, antes de que la tubería de revestimiento lle-

que al fondo. Instalar las líneas de circulación de superficie al conjunto de válvulas para facilitar el movimiento de la tubería.

- 7) Una vez que la tubería está en el fondo, iniciar la circulación a un gasto equivalente o mayor que la velocidad anular a través de la tubería lastrabarrena durante la perforación, si las densidades de circulación equivalentes lo permiten. Iniciar el movimiento continuo de la tubería de revestimiento, 15-30 pies, para el movimiento recíprocante, ó 6-10 rpm para el movimiento de rotación. No permitir que se supere el esfuerzo a la tensión y el torque previamente calculado.
- 8) Utilice el método de "arrojar la canica de carburo" para de terminar cuando se ha circulado el suficiente volumen de lodo. No iniciar la cementación hasta circular un mínimo de 95% del volumen del agujero comparado con el obtenido con registro calibrador de agujero de 4 brazos,
  - a) Circular el volumen de la tubería de revestimiento, hasta observar que no existe nada en la tubería de revestimiento, que pudiera t $\acute$ par los flotadores.
  - b) Circular del fondo a la superficie, hasta observar que no se presenta flujo de gas. Parar el flujo de gas antes de realizar la cementación.
  - c) Generalmente esto involucra grandes tiempos de circulación antes de la cementación. Deberán tomarse las precauciones necesarias para asegurar que el equipo de flotación seleccionado pueda resistir estos largos tiempos de circulación.
- 9) Durante la circulación del lodo, acondicionar sus propiedades de punto de cedencia y viscosidad plástica, si éstas han cambiado durante la toma de registros e introducción de la tubería de revestimiento.
- 10) Mezclar los componentes del fluido espaciador en el pozo, agitando y mezclando en las presas, de preferencia con fondo cónico,
  - a) Mezclar el fluido espaciador para que su densidad sea 0.5 lb/gal mayor que la densidad del lodo. Verificar la densidad con la balanza de lodos presurizada.
  - b) Utilizar el volumen suficiente de fluido espaciador para proporcionar un tiempo de contacto de 10 minutos a los gastos de desplazamiento diseñados, y un volumen mínimo de 500 pies en el espacio anular.
  - c) Debe estar presente personal de la compañía proveedora del fluido espaciador y de la compañía que proporciona el

mezclado del fluido espaciador.

- d) Verificar la reología del fluido espaciador, repetir el cálculo del gasto crítico para obtener flujo turbulento, y desplace con este gasto si no se crean excesivas densidades equivalentes de circulación.
- 11) De ser posible, bombear el fluido oleoso con una densidad igual a la del lodo introducido delante del fluido espaciador, si el fluido espaciador no es compatible con el lodo
- a) Bombear un volumen equivalente a  $1/3$  del fluido espaciador o un volumen equivalente a 250 pies del espacio anular.
- 12) Bombear:
- a) Lodo
  - b) Tapón de fondo
  - c) Fluido espaciador base aceite
  - d) Tapón de fondo
  - e) Fluido espaciador
  - f) Tapón de fondo
  - g) Cemento
  - h) Tapón final
- 13) Si es posible bombear a gastos que proporcionen a el fluido espaciador un flujo turbulento, bombear tan rápido como sea posible o en flujo laminar muy alto, si las densidades equivalentes de circulación muestran una posibilidad de fractura con flujo turbulento.
- a) Controlar la entrada de flujo contra la salida de flujo durante la cementación. Utilizar un estrangulador ajustable para mantener ambos valores iguales, tomando en consideración el efecto de tubo en U del cemento de mayor densidad contra el lodo de menor densidad. Reducir la presión del acumulador, para facilitar el movimiento de la tubería con el preventor cerrado. Ajustar los gastos de flujo si se mantiene la contrapresión y se corre el riesgo de fracturar la formación.



FIGURA 1. Pirámide de Smith para realizar con éxito un trabajo de cementación.

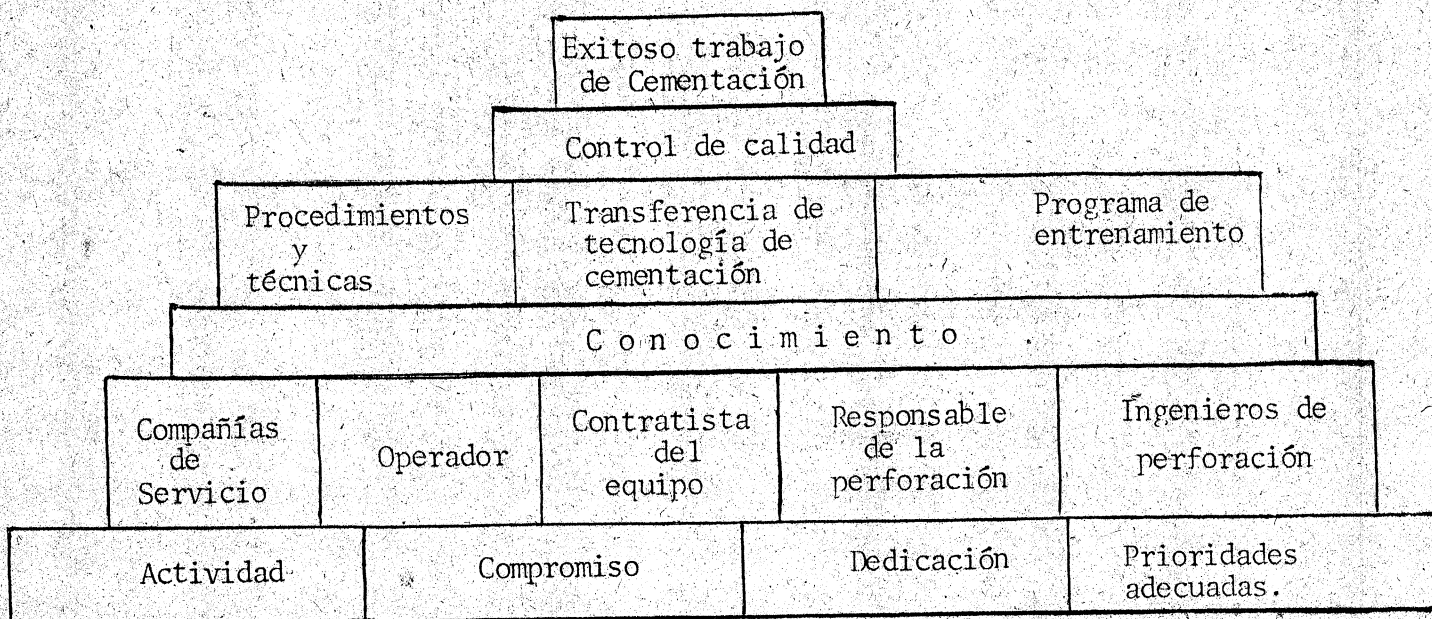


TABLA 1. POZOS DONDE NO SE OBTUVO FLUJO TURBULENTO  
TIEMPO DE CONTACTO = 0

TRAB.No.	GASTO REQUERIDO PARA OBTENER FLUJO TURBULENTO (BL/MIN.)		Gasto real de bombeo (bl/min)	Necesitó cementación forzada.
	Diseño previo de la operación. Datos de Laboratorio.	Basado en resultados de campo Reología		
5	8.6	24.9	16.0	NO
7	9.9	20.5	12.4	NO
9	9.1	28.2	12.9	SI
18	7.0	14.2	8.3	NO
22	5.8	22.3	10.0	SI
23	4.3	13.4	9.1	SI

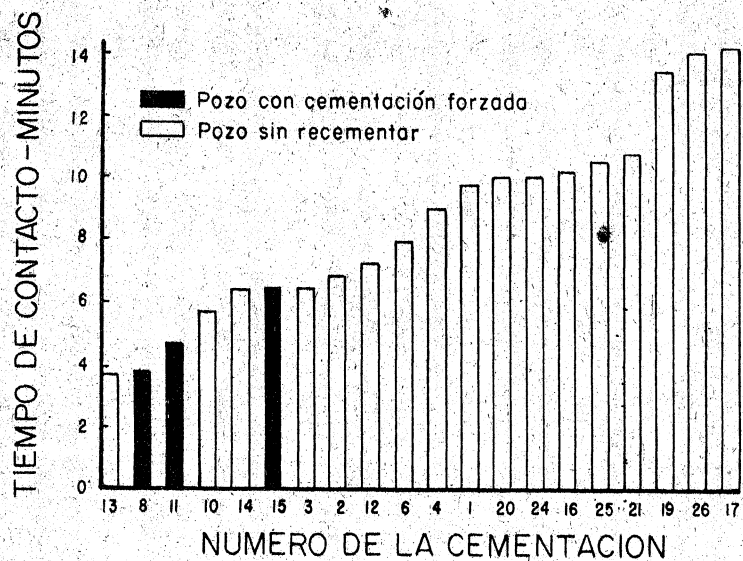


Fig 2 Tiempo de contacto en cementaciones en que se alcanzó flujo turbulento, según datos reológicos

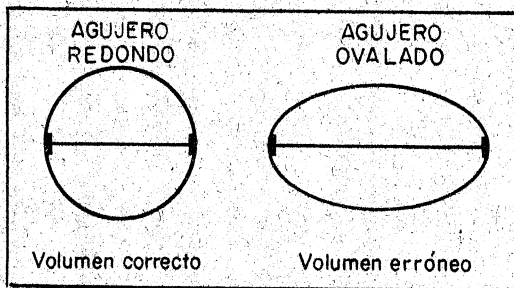


Fig 3 Calibrador de agujero de dos brazos

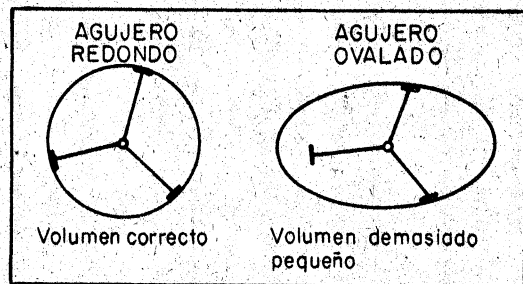


Fig 4 Calibrador de agujero de tres brazos

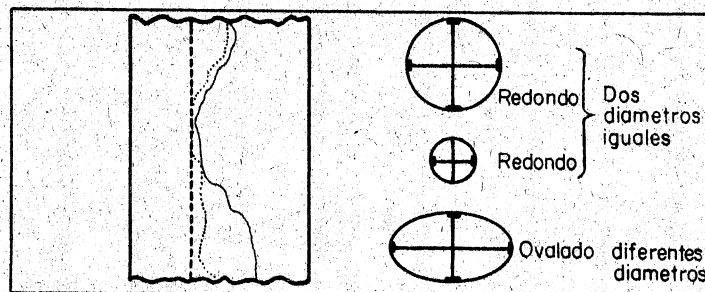


Fig 5 Calibrador de agujero de cuatro brazos (con dos lecturas registradas)

TABLA 2.

## DATOS DEL TIEMPO DE CONTACTO

TRAB. NO.	GASTOS REQUERIDOS PARA OBTENER FLU- JO TURBULENTO (BL/MIN.)					
	Diseño Pre- vio de la operación	Basado en resulta- dos de campo	Gasto real de bombeo (bl/min)	Volumen de leche da (pie <sup>3</sup> )	Tiempo de contacto (minutos)	Necesitó (cemen- tación for- zada.
	Datos de Laborato- rio.	Reología				
1	7.2	17.8	20.1	424	3.76	SI
11	8.8	12.5	19.0	511	4.80	SI
15	3.8	N.A.	17.1	630	6.57	SI
6	6.0	9.0	17.0	758	7.95	NO
4	6.0	14.8	15.0	755	8.97	NO
16	3.8	6.2	8.8	504	10.20	NO
25	6.0	7.0	12.4	733	10.50	NO



TABLA 3. PROPIEDADES DE ADHERENCIA PARA VARIOS TIPOS DE ACABADOS DE LA TUBERIA.

Cemento: API Clase A

Contenido de agua: 5.2 gal/saco

Temperatura de fraguado: 80°F

Tiempo de fraguado: 24 horas

Dimensión de la tubería: 2pg (diámetro exterior) dentro de una tubería de 4 pg.

Tipo de Acabado	Resistencia		
	Esfuerzo lb/pg <sup>2</sup>	Hidráulica lb/pg <sup>2</sup>	Gas lb/pg <sup>2</sup>
Tubería Nueva			
Nueva (con barniz)	74	200 a 250	15
Nueva (barniz removido químicamente)	104	300 a 400	70
Nueva (acondicionada - con aire a presión)	123	500 a 700	150
Usada (oxidada)	141	500 a 700	150
Nueva (acondicionada - con baño de arena con aire, y recubierta con resina y arena)	2,400	1,000 a 1,200	400+

## REFERENCIAS

1. Smith, R.C.: "Successful Primary Cementing Can be a Reality," J. Pet. Tech. (November 1984) 1851-1858.
2. Hartog, J. J., Davies, D.P., and Stewart, R. B.: "An Integrated Approach for Successful Primary Cementations," J. Pet. Tech. (September 1983), 1600-1610.
3. Johnson, K.: "Successful Liner Completions on the Murchison Platform," paper SPE presented at European Petroleum Conference, London, October 25-28, 1982.
4. Perkins, A.A. and Double, E. "Method of Cementing Oil Wells," U.S. Patent No. 1,011,484 (December 12, 1911), filed October 27, 1909.
5. Howard G.C., and Clark, J.B.: "Factors to be Considered in Obtaining Proper Cementing of Casing," Drill, and Prod. Prac., API (1948) 257-272.
6. Owsley, W.D.: "Improved Casing Cementing Practices in the United States," Oil and Gas Journal (December 15, 1949) 76.
7. Tenlitz, A.J., and Hassebroek, W.E.: "An Investigation of Oil Well Cementing," Drill and Prod. PRAC., API (1946) 76-101; Pet. Eng. Annual (1946) 444.
8. Jones, P. H., and Berdine, D.: "Oil-Well Cementing - Factors Influencing Bond Between Cement and Formation," Oil and Gas Journal (March 21, 1940) 71; Petroleum World (June 1940) 26; Drill and Prod. Prac., API (1940) 45-63.
9. Farris, R. F.: "A Practical Evaluation of Cements for Oil Wells," Drill and Prod. Prac., API (1941) 117-30.
10. Brice, J. W., Jr., and Holmes, R. C.: "Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques," J. Pet. Tech. (May 1964) 503-508.
11. Staale, K. A.: "Rheological Design of Cementing Operations," J. Pet. Tech. (March 1962) 323-328; Trans., AIME, 225.
12. Parker, P. N., Ladd, B.J., Ross, W. N., and Wahl, W. W.: "An Evaluation of a Primary Cementing Technique Using Low Displacement Rates," paper SPE 1234 presented at SPE-AIME 40th Annual Fall Meeting, Denver, Colorado, October 3-6, 1965.

13. McLean, P.H., Manry, C.W., and Whitaker, W. W.: "Displacement Mechanics in Primary Cementing," J. Pet. Tech. (February 1967) 251-260.
14. Gibbs, M.A.: "Delaware Basin Cementing Problems and Solutions," J. Pet. Tech. (October 1966) 1281-1285.
15. Carter, L.G., and Evans, G.W.: "A Study of Cement-Pipe Bonding," J. Pet. Tech. (February 1964) 157-160.
16. Hoch, R. S.: "Cementing Techniques Used for High Angle, S-Type Directional Wells," Oil and Gas Journal (June 22, 1970) 88-93.
17. Carter, L.G., and Slagle, K.A.: "A Study of Completion Practices to Minimize Gas Communication," J. Pet. Tech. (September 1972) 1170-1174.
18. Haut, R.C. and Crook, R. J.: "Primary Cementing: The Mud Displacement Process," paper 8253 presented in the 1979 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, September 23-26.
19. Carter, L.G., Cook, C., and Snelson, L: "Cementing Research in Directional Gas Well Completions," paper SPE 4313 presented in the 1973 SPE Annual European Meeting, London, April 2-3.
20. Haut, R. C. and Crook, R. J.: "Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids," J. Pet. Tech. (August 1982) 1828-34.
21. Bannister, C.E., and Benge, O.G.: "Pipe Flow Rheometry: Rheological Analysis of a Turbulent Flow System Used for Cement Placement," paper SPE 10216 presented at SPE-AIME 56th Annual Fall Technical Conference, San Antonio, Texas, October 5-7, 1981.
22. Smith, P. C.: "Check List Aids Successful Primary Cementing," Oil and Gas Journal (November 1, 1982) 72-75.
23. Arnold, E.S.: "Cementing: Bridging the Gap From Laboratory Results to Field Operations," J. Pet. Tech. (December 1982) 1843-2852.
24. Sauer, C.W., and Landrum, W.R.: "Cementing: A Systematic Approach," paper SPE 11981 presented at SPE-AIME 58th Annual Technical Conference, San Francisco, California, October 5-8 1983.



25. Keller, S. R., Crook, R. J., Haut, R.C., and Kulakofsky, D. S.: "Problems Associated with Deviated-Wellbore Cementing," paper SPE 11979 presented at SPE-AIME 58th Annual Technical Conference, San Francisco, California, October 5-8, 1983.
26. Dowell-Schlumberger, "Cementing Technology", London, Nova Publications, 1984 (Chapter 11, pages 3-5).
27. Bearden W.C., and Lane R. D.: "Engineered Cementing Operations to Eliminate WOC," Drill and Prod. Prac., API - (1961) 17.
28. Myers, G. M., and Sutko, A. A.: "The Development and Application of a Method for Calculating the Forces on Casing Centralizers," Preprint Paper No. 851-42-H. Spring Meeting of the Mid-Continent District, Amarillo, Texas, April 3-5, 1968, Division of Production API, Dallas, Texas.
29. API Spec. 10D, Second Edition: "API Specification for Casing Centralizers," American Petroleum Institute, Dallas, Texas, February 1983.
30. Lee, H. K., Smith, R.C., and Tighe R. E.: "Optimum Spacing for Casing Centralizers," paper SPE 13043.
31. Graham, H. L: "Rheology-balanced Cementing Imposes Primary Success," Oil and Gas Journal (December 18, 1972) 53-60.
32. Burkhardt, J. A.: "Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement," J. Pet. Tech. (June 1961) 595-605. Trans., AIME, 222.
33. Goldsmith, R. G.: "Graph Spots Excessive Pressure Surges on Rig," Oil and Gas Journal (March 5, 1973) 67-72.
34. Stringfellow, B: "Tests Find Hammering Fluid Cutting, Erosion Cause Float Shoe Failures," Oil and Gas Journal (January 21, 1985) 66-72.
35. Cowthran, J. L.: "Technology Used To Improve Drilling Performance and Primary Cementing Success in Katy Field," Paper SPE 10956 presented at SPE-AIME 57th Annual Fall Technical Conference, New Orleans, Louisiana, September 26-29, 1982.
36. Landrum, W.P., and Turner, R. D.: "Rotating Liners During-Cementing in the Grand Isle and West Delta Area," paper SPE 11420 presented at IADC/SPE 1983 Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, February 20-23, 1983.

37. Metzner, A. B., and Reed, J. C.: A.I.ch.E. Journal, Volume 1 (1955) 434.
38. Beirute, R. M: "The Phenomenon of Free Fall During Primary Cementing," paper SPE 13045 presented at SPE-AIME 59th Annual Technical Conference, Houston, Texas, September 16-19, 1984.
39. Whlmeier, M., and Lam, S.: "Mathematical Algorithm Aids Analysis of "U-tubing" during Slurry Placement," Oil and Gas Journal (January 7, 1985) 80-86.
40. Pryde, J. K: "Potential Collapse Problems When Cementing Deep Casing Strings with Large Cement Volumes," Conoco Drilling Engineering Bulletin 157 (July 1983).
41. Boyd, P.A., Whitfill, D.L., Carter, T.S., and Allamon, J. P." "New Base Oil Used in Low-Toxicity Oil Muds," J. Pet. Tech. (January 1985) 137-142.
42. Goodwin, Joe: "Centralizer placement in deviated holes" Drilling. (April 1985) 54-57.

# UNA TECNICA PROBADA PARA LA CEMENTACION DE TUBERIAS CORTAS EN LA CUENCA GREATER GREEN RIVER, WYOMING.

Kent. A. Sauvageau. SPE, Amoco Production, Co.

Artículo traducido de la Revista J.P.T. de agosto de 1984, por Tomás Becerra Arteaga y Francisco Garaicochea P.

## RESUMEN.

Una técnica mejorada de cementación ha sido iniciada en el área Wamsutter en la cuenca Greater Green River de Wyoming. La técnica se aplica a ocho problemas relacionados con la cementación de una tubería corta: espacio libre restringido; acondicionamiento del fluido de perforación; movimiento de la tubería; uso de centradores y raspadores; fluidos espaciadores y limpiadores; diseño de la lechada de cemento; gastos de desplazamiento; y uso de empacadores en la parte superior de la tubería corta (liner) al realizar la cementación.

Antes de que esta técnica de cementación se iniciara, sólo el 21% de las tuberías cortas que se cementaron durante 1980, se pudieron clasificar como satisfactorias. Desde la iniciación de esta técnica, se ha logrado un 100% de éxito en la cementación de tuberías cortas. La técnica, iniciada en octubre de 1980, se ha aplicado en 14 pozos, y todos se terminaron sin necesidad de realizar una reparación por cementaciones forzadas.

## INTRODUCCION.

En la parte comúnmente llamada "sweetspot", en el área Wamsutter (Fig. 1), la formación Mesaverde tiene una presión de fondo que requiere densidades del fluido de perforación mayores de 11 lb/gal. Comúnmente la capa superior, la formación Lewis, no resistirá densidades de fluido de perforación que excedan 10 lb/gal. En consecuencia, la presión hidrostática requerida para controlar y estabilizar la pared del pozo, romperá la parte superior de la formación Lewis. Esto causaría pérdida de cir



culación, la cual puede ocasionar que se pegue la tubería, posibles flujos de agua e irrupciones de gas.

La colocación de tuberías de revestimiento de 7 pg, hasta la parte inferior de la formación Mesaverde y la introducción de una tubería corta de 4 1/2 pg., a través de la sección productora, ha reducido muchos de los anteriores problemas de perforación en el área. No obstante, ahí han existido problemas relacionados con la introducción y cementación de estas tuberías cortas, siendo el mayor las deficientes cementaciones primarias. Durante 1976-1980, se realizaron 59 trabajos de cementación de tuberías cortas. En este período, se llevaron a cabo seis modificaciones para mejorar la cementación primaria de las tuberías cortas. Sin embargo, los cambios realizados en algunos casos, realmente disminuyeron el número de operaciones satisfactorias de cementación de tuberías cortas.

Debido a la deficiente realización de los trabajos de cementación de tuberías cortas en 1980. Las variables que se estudiaron incluyen: (1) restricción del espacio libre; (2) acondicionamiento del lodo de perforación; (3) movimiento de la tubería; (4) centradores y raspadores; (5) fluidos espaciadores y limpiadores; (6) diseño de la lechada de cemento; (7) gastos de desplazamiento; y (8) uso de empacadores en las cementaciones a presión. El procedimiento de cementación actualmente utilizado en Wamsutter fue derivado de una minuciosa revisión de estas ocho variables.

#### RESTRICCIÓN DEL ESPACIO LIBRE.

Al inicio de 1980, se cambió el programa de tubería de revestimiento en Wamsutter. Este cambio fue el resultado de la ruptura de una tubería corta durante una estimulación por fractura. La tubería corta de 4 1/2 pg. y la tubería de revestimiento intermedia de 7 pg. fueron sobrediseñadas, modificando su peso nominal de 11.6 a 13.5 lb/pie y de 26 a 29 lb/pie respectivamente. El incremento en la resistencia de la tubería de revestimiento de 7 pg disminuyó su diámetro de trabajo de 6.151 hasta 6.059 pg. Esto requirió que el tamaño de la barrera fuera reducido de 6 1/8 a 6 pg., lo cual causó una reducción en la capacidad anular, entre la tubería corta y la pared del agujero, del 8.8% (Fig. 2). Comparando los trabajos de cementación de tuberías cortas anteriores a 1980, en agujeros de 6 1/8 pg., con los trabajos de cementación de tuberías cortas de los primeros ocho meses de 1980, en agujero de 6 pg, se descubrió una gran diferencia en el porcentaje de trabajos realizados satisfactoriamente, 100% contra 21%. La única diferencia en el procedimiento fue el cambio en la capacidad anular. No se concluye que éste es el único factor que contribuye a tener pobres trabajos de cementación, pero la diferencia en el porcentaje de éxito presenta un fuerte argumento: la reducción del volumen anular en el área Wamsutter es desfavorable para una satisfactoria cementación de las tuberías cortas.

## ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE PERFORACION.

Un acondicionamiento especial del fluido de perforación, después de que el pozo ha sido perforado, es una práctica común en el área Wamsutter. Anteriormente la circulación del lodo en el pozo se mantenía después de que la tubería corta estaba en el fondo, para asegurar estar libre de problemas de circulación durante la cementación y para remover cualquier exceso de gas formado en el agujero.

Las propiedades del fluido de perforación que pueden conducir a pobres trabajos de cementación son: altos esfuerzos gel, alta viscosidad, alta densidad, y el excesivo contenido de aditivos químicos. Una revisión de las propiedades del fluido de perforación, en el momento en que se introdujeron las tuberías cortas, se llevó a cabo en los pozos perforados en la primera mitad de 1980. Esta revisión indicó que aquellas propiedades del fluido de perforación estaban generalmente sobre un alto margen y podrían ser desfavorables para una cementación satisfactoria. En la técnica de cementación actualmente utilizada, después de que se ha alcanzado la profundidad total, el fluido de perforación es acondicionado y dispersado con un dispersante orgánico, para obtener estas propiedades del fluido de perforación: viscosidad: 38 a 45 seg/embudo; viscosidad plástica: 10 a 15 cp; punto cedente: 4 a 8 lb/100 pies<sup>2</sup>; esfuerzo gel: 2 a 8 lb/100 pies<sup>2</sup>. Estas propiedades tienden a incrementar el éxito de la remoción del lodo que se desplaza desde la parte baja de la tubería corta durante la cementación, lo cual es benéfico para obtener una buena acción primaria.

## MOVIMIENTO DE LA TUBERIA

El movimiento vertical y/o de rotación, durante la cementación, mejora en gran medida la posibilidad de un buen trabajo de cementación. La tecnología está disponible para mover una tubería corta durante la cementación.

Generalmente se prefiere la rotación al movimiento vertical, ya que el oleaje y el rozamiento no llega a ser un factor importante, y la tubería de perforación no está unida a la tubería corta. Sin embargo esto no se ha practicado en el área Wamsutter, debido al riesgo de combinación de problemas mecánicos con el equipo superficial y el del fondo del pozo. El movimiento de la tubería antes de descolgarla es una práctica común, utilizando una carrera de 20 pies mientras se circula y acondiciona el fluido de perforación. Esto altera los patrones de flujo en el pozo y, en combinación con los raspadores, incrementa la eficiencia de remoción de cualquier película de lodo y enjarre formado en el espacio anular.

## CENTRADORES Y RASPADORES.

El uso de centradores y raspadores es muy importante en

la cementación primaria. Como los pozos nunca han sido perforados perfectamente en línea recta, la tubería de revestimiento tiene una tendencia a hacer contacto con un lado de la pared del pozo. Cuando esta situación ocurre, el patrón de flujo del fluido de perforación, alrededor de la tubería, es idéntico al flujo en el espacio anular de sección excéntrica (Fig. 3). Este tipo de flujo restringe el desplazamiento del fluido de perforación por el cemento y da por resultado un pobre trabajo de cementación. En Wamsutter la desviación de los pozos raramente excede de 3 grados y se ha encontrado que para este rango de desviación, la tubería de revestimiento deberá llevar centradores al menos cada 120 pies (Fig. 4) La tubería corta lleva centradores en cada tercer conexión, y los raspadores se colocan en cada junta. Los centradores aseguran una adecuada remoción del fluido de perforación alrededor de la tubería corta, manteniendo uniforme el centrado de la tubería (Fig. 5). Los raspadores se utilizan para ayudar a remover el enjarre, instalando tres o cuatro raspadores en cada lingada. Para utilizar eficientemente los raspadores, la tubería corta se deberá mover verticalmente. Esto se lleva a cabo durante la circulación y el acondicionamiento del fluido de perforación, antes de que la tubería corta esté colgada.

#### FLUIDOS ESPACIADORES Y LIMPIADORES.

Existen tres tipos básicos de fluidos limpiadores: agua, cemento lavador, y sustancias químicas. Cada fluido limpiador tiene su aplicación en determinadas áreas y el mejor generalmente se determina por experiencia. En Wamsutter se utiliza una combinación de 20 barriles de agua fresca y 20 barriles de cemento lavador. El agua se bombea en flujo turbulento, seguida por el cemento lavador de una densidad de 12.5 lb/gal, también en flujo turbulento. El cemento lavador, de baja densidad, es un excelente fluido limpiador. Es posible obtener flujo turbulento y sus partículas sólidas desgastan la película de lodo y el enjarre. El volumen de fluido limpiador utilizado y el gas to al cual es bombeado, está diseñado para un tiempo de contacto de 10 minutos, con flujo turbulento, lo cual es un mínimo recomendable para remover el fluido de perforación.

#### DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO.

El mayor problema con los pozos productores de gas, con presiones anormales, de la zona múltiple, en el área Wamsutter, es la incapacidad de la columna de cemento para transmitir completamente la carga hidrostática a las formaciones, debido a la deshidratación y la formación de puentes anulares. Si la presión hidrostática es menor que la presión de la formación, el gas empezará a fluir dentro del pozo. Algunas propiedades del cemento que reducen este flujo de gas son: la densidad del cemento, el control de pérdida de flujo y del tiempo de fraguado. Estos tres factores fueron considerados en el diseño de la le-



chada para la cementación de tuberías cortas.

Antes de octubre de 1980 se utilizó en el área Wamsutter una lechada de cemento con densidad de 15.8 lb/gal. El cemento que se utiliza actualmente tiene una densidad entre 16.8 y 17 lb/gal. La densidad del fluido de perforación varía entre 11 y 11.3 lb/gal. Esto es una diferencial de densidad de cerca de 6 lb/gal. Si el cemento se bombea en flujo tipo tapón y la tubería corta está centrada, el desplazamiento del fluido de perforación deberá ser el máximo (Fig. 6). La lechada de 15.8 lb/gal tiene una densidad adecuada para fines hidrostáticos. Sin embargo la deshidratación a través de ciertos intervalos, que causa la formación de puentes anulares, antes de que frague completamente el cemento, puede ser el mayor problema que contribuye a la pobre adherencia. El cemento más denso se emplea para obtener un cemento más resistente en corto tiempo. También disminuye la cantidad de agua libre en el cemento, para permitir un mejor control de la pérdida de fluido. Esto reduce los problemas de deshidratación y de formación de puentes anulares.

La pérdida de fluido influye en la deshidratación de la lechada y en la formación de puentes anulares, lo cual puede ocasionar migración de gas. La pérdida de fluido se mantiene tan baja como lo permite la práctica, para prevenir la deshidratación de cemento en las formaciones permeables. Si una formación permeable está encima de una formación con gas la presión y existe una diferencial de presión positiva hacia la zona permeable, se formará un enjarre de cemento. Sin un adecuado control de pérdida de fluido en el cemento, el proceso de deshidratación continuará y permitirá que las partículas de cemento formen un puente adyacente a la zona permeable. Una vez formado el puente, éste empieza a soportar la presión hidrostática arriba de él. Al mismo tiempo que se forma este puente, otro enjarre de cemento puede estar formándose sobre la formación permeable presionada que está abajo del puente. Si el fluido se pierde por este intervalo, en combinación con el efecto de puenteo en la parte superior del agujero, la presión hidrostática se reduce. Esto ocasiona una diferencial de presión positiva desde la zona presionada hacia la pared del pozo, causando el flujo de gas hacia el interior del pozo y posteriores reducciones de la presión hidrostática de la columna de cemento. Una vez iniciado este proceso, la estructura del cemento se hace porosa y permeable y pierde su capacidad para crear un sello hidráulico, lo que ocasiona una cementación deficiente. Para prevenir la formación de puentes en el espacio anular y posteriores migraciones de gas, la pérdida de fluido deberá mantenerse tan baja como sea posible. En la técnica de cementación de tubería corta, que se utiliza actualmente, la pérdida de fluido del cemento promedio entre 40 y 100 cm<sup>3</sup>/30 min. Otra característica del diseño de esta lechada de cemento, es la reducción del agente retardador de fraguado. La sobre-retardación hace que se combinen los

problemas de formación de puentes anulares y de deshidratación. El cemento permanece fluido por un prolongado tiempo, permitiendo mayor oportunidad para que el gas entre al pozo. El tiempo de fraguado promedio es de 3.5 a 4 horas para lechadas de densidad de 16.8 a 17 lb/gal. Este tiempo por lo general es suficiente para mezclar, bombear y desalojar por circulación inversa cualquier exceso de cemento. El diseño básico de las lechadas de cemento tiene como objetivo incrementar la densidad del cemento, controlar la pérdida de agua, y reducir el tiempo de fraguado.

#### GASTO DE DESPLAZAMIENTO.

El frente de avance de un fluido desplazándose en el espacio anular puede ser representado por tres tipos de perfiles de flujo: tapón, laminar y turbulento (Fig. 6). 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 lodo de perforación, una reducida canalización del cemento, y un mejor revestimiento del cemento alrededor de la tubería corta. El patrón de flujo aceptado para el desplazamiento del fluido de perforación es el turbulento. Sin embargo, en ciertas situaciones, como son: la geometría de agujero; el tamaño del espacio anular; las propiedades de ambos fluidos; el cemento y el fluido de perforación y las restricciones de presión, pueden imponer gastos de desplazamiento donde no se pueda obtener la turbulencia. En estas situaciones 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, aumentará el desplazamiento del lodo. (Fig. 7). El ritmo al cual es desplazado el cemento denso es menor o igual a 1 bl/pie, y se encuentra dentro del régimen de flujo tapón. Anteriormente se tenía un tiempo de contacto con turbulencia, de 10 minutos, con los fluidos limpiadores; sin embargo, la lechada se bombea en régimen de flujo laminar. Con la técnica actual la lechada se bombea en régimen de flujo tapón, ya que el flujo laminar no se considera tan eficiente en el desplazamiento del lodo.

#### USO DE EMPACADORES Y PRESIÓN EN LA CEMENTACION.

Debido al tamaño reducido del espacio anular y a los pobres resultados en los primeros 8 meses de 1980, se probó el uso de empacadores en la parte superior de la tubería corta. Los empacadores de la tubería corta se instalaron con un doble objetivo: (1) aumentar la presión hidrostática efectiva y (2) prevenir posibles escapes de gas alrededor de la parte superior de la tubería corta.

La presión hidrostática efectiva sobre la formación,



atrás de la tubería corta, se incrementa mediante la presión de inyección aplicada en la superficie (Fig. 8). Las presiones de inyección, que se aplican antes de que el tapón asiente, son de 1000 a 1500 lb/pg<sup>2</sup>. Este incremento en la presión hidrostática efectiva ayuda a controlar el flujo de gas hacia el interior del pozo, que puede ser iniciado a causa de la deshidratación y otros factores discutidos anteriormente. El incremento en la presión hidrostática también crea una mayor diferencial de presión, del pozo a la formación. Este incremento de presión efectiva ocasiona que se obtengan, en cortos tiempos, mayores resistencias en la columna de cemento. Si la cementación falla, un empacador en la parte superior de la tubería corta puede prevenir que el gas llegue a la superficie, antes de iniciar las operaciones de terminación.

Estas ocho características de diseño han sido introducidas dentro de la técnica de cementación de tuberías cortas en el área Wamsutter. Desde octubre de 1980, se han efectuado 14 trabajos de cementación de tuberías cortas con esta técnica. Estos 14 pozos indican un adecuado sello hidráulico, con buenos o excelentes registros de adherencia de cemento y de densidad variable (los registros se tomaron con una mayor presión en la tubería de revestimiento de 1000 lb/pg<sup>2</sup> y no se requirió ninguna reparación de cementación forzada. Este porcentaje de 100% de éxito supera significativamente el porcentaje anterior de 21%, y el incremento es atribuido a la técnica mejorada de cementación de tubería corta.

#### CONCLUSIONES.

El uso de este procedimiento de cementación de tuberías cortas, ha dado por resultado satisfactorias cementaciones en el área Wamsutter, de la cuenta Green River. El éxito de esta técnica depende de una buena planeación, seguida por la ejecución apropiada, y la supervisión de los detalles.

#### REFERENCIA GENERAL.

Cook, C. y Cunningham, W.C.: "Filtrate Control A Key in Successful Cementing Practices".  
J.P.T. Ago. 1977.



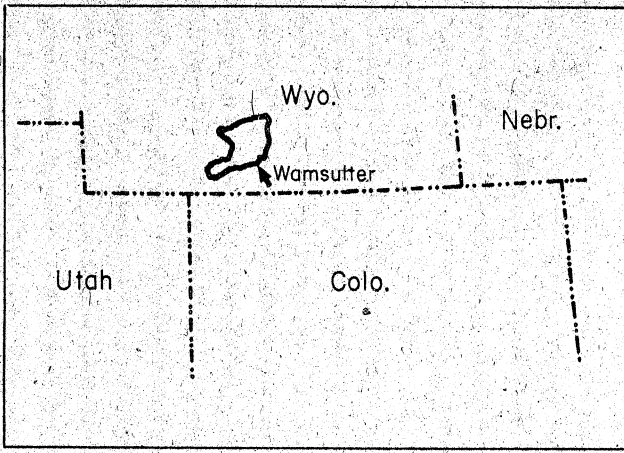


Fig 1 - Mapa de localización

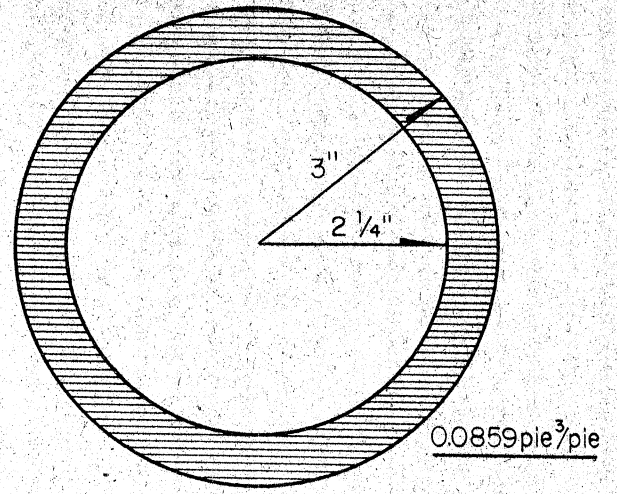


Fig 2 - Capacidad anular en agujero de 6 pg. con tubería corta de 4 1/2 pg.

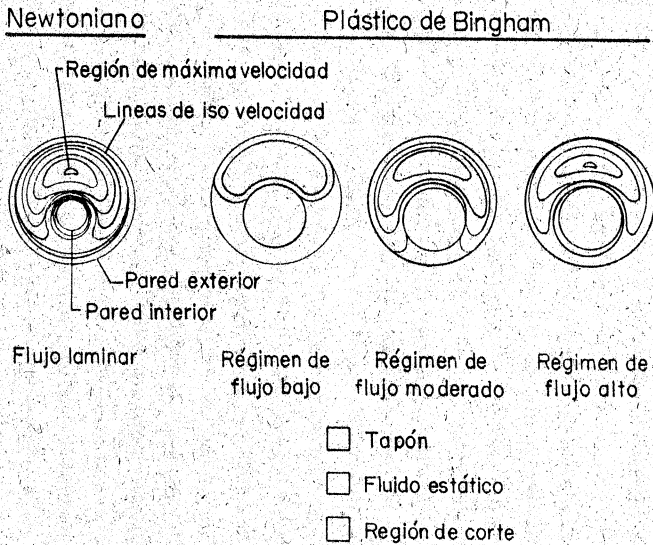


Fig 3 - Patrones típicos de flujo en un espacio anular excéntrico

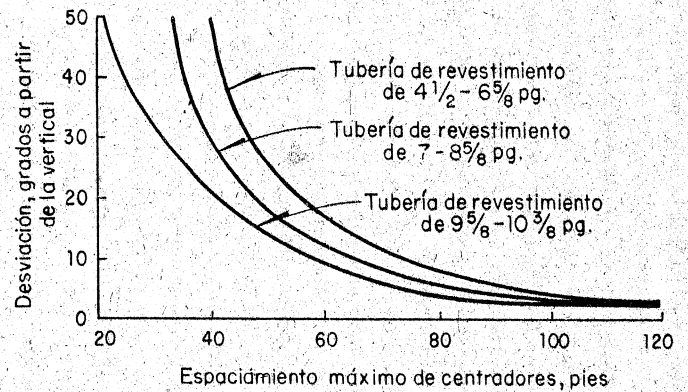
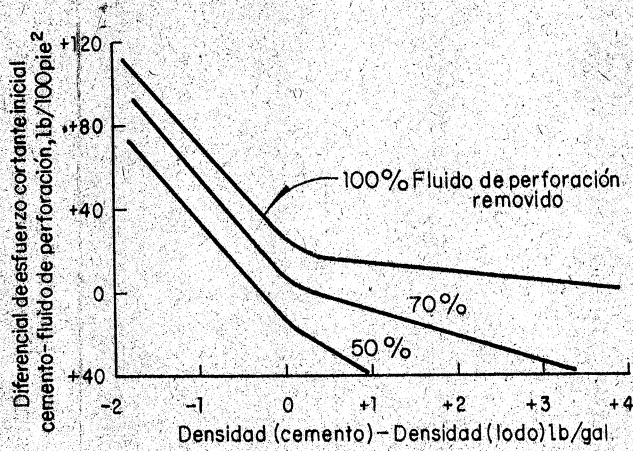
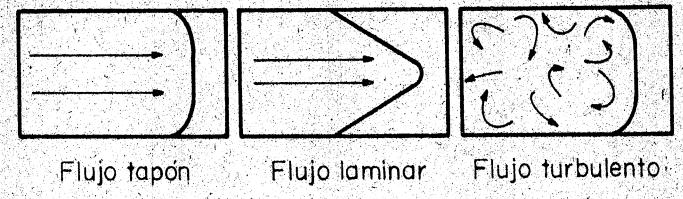


Fig 4 - Colocación de centradores en agujeros desviados

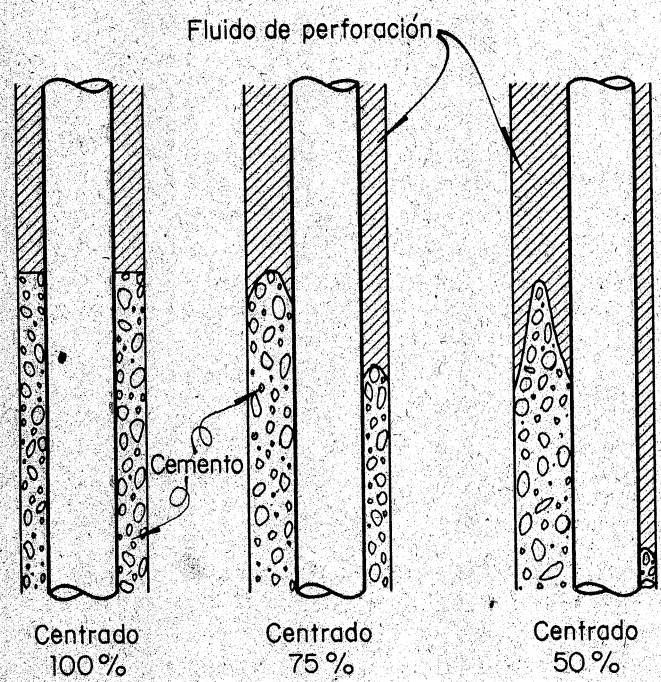


**Fig 5 - Efecto combinado de las diferencias de densidad y esfuerzo gel en un régimen de flujo tipo tapón**

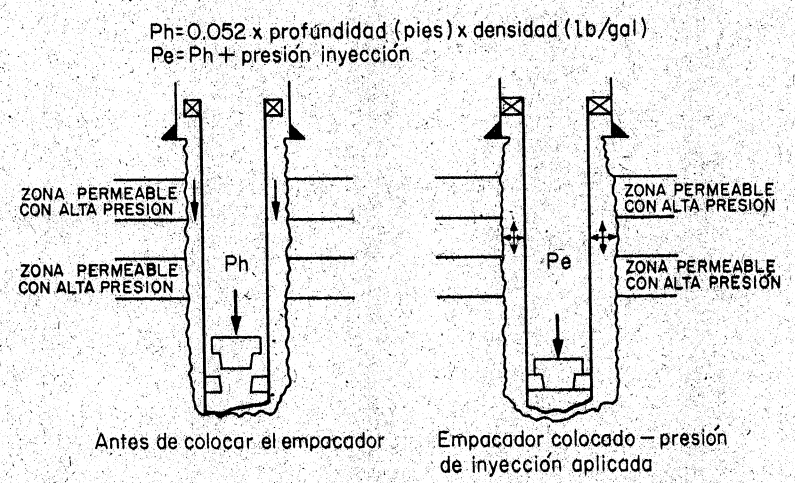
- 1 Modelo plástico de Bingham o
- 2 ley de potencias



**Fig 6 - Patrones de flujo mostrados en la pared del pozo**



**Fig 7 - Efectos del centrado sobre el desplazamiento del lodo**



**Fig 8 - Presión efectiva después de que el empacador es colocado y la presión de inyección es aplicada**

## SOLUCIONES A PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA CEMENTACION DE POZOS DESVIADOS.

R.J. Crook, Exxon Production Research Co.  
M.A. Wilson, Halliburton Services

Artículo SPE 14198, presentado en la 60ava Reunión Técnica Anual del SPE, en Las Vegas, Nevada; Traducido por Tomás Becerra Arteaga y Francisco Caraicochea P.

### RESUMEN:

La experiencia de campo sugiere, y los resultados de pruebas en laboratorio en un modelo a escala natural confirman, que el desplazamiento del lodo en pozos desviados se puede complicar debido a la formación de un canal de material sólido lodoso que se forma sobre el costado inferior del pozo. Este canal se origina por el asentamiento de sólidos mientras el fluido de perforación se encuentra bajo condiciones dinámicas. Los resultados de pruebas experimentales, utilizando un modelo de un pozo desviado a escala natural, bajo condiciones permeables e impermeables, indica que este canal de sólidos se puede prevenir mediante un control apropiado de la reología del fluido de perforación. Los resultados reportados también demuestran el efecto de los centradores de la tubería de revestimiento, del movimiento de la tubería y de los fluidos limpiadores, sobre la remoción de este canal de sólidos formado en el costado inferior del pozo. Con base en los resultados obtenidos en el laboratorio, se presentan sugerencias que mejoran la cementación de pozos desviados, mediante la eliminación del canal de sólidos asentado en el costado inferior del pozo.

### INTRODUCCION.

Como parte de una investigación continua sobre los factores que afectan el desplazamiento del fluido de perforación durante la cementación primaria, se llevó a cabo un estudio para identificar los factores que mejoran la cementación de los pozos desviados. En un estudio anterior se identificaron varios problemas potenciales durante la cementación de pozos desviados, incluyendo la presencia de canales de sólidos en el costa-



do inferior del espacio anular y canales de agua en el costado superior del espacio anular<sup>1</sup>. El problema potencial más grave que está afectando la cementación de pozos desviados, parece ser la depositación de sólidos, originada por el asentamiento de los agentes densificantes o recortes perforados provenientes del lodo de perforación. Los datos obtenidos de las pruebas del estudio anterior indicaron que la reología del lodo, específicamente el punto de cedencia, originaba que se asentaran o no los sólidos. El asentamiento proveniente del lodo de perforación, crea un canal continuo sin cementar a lo largo del costado inferior del pozo.

La presencia de canales de sólidos en el espacio anular puede obstaculizar el desplazamiento del lodo y malograr el propósito de la cementación, o sea: rodear la tubería de revestimiento con un completo recubrimiento de cemento, y adherirla a las formaciones adyacentes. La falla de rodear y proteger la tubería de revestimiento, a causa de un incompleto desplazamiento del lodo en las cercanías del fondo del pozo, puede ocasionar problemas tales como:

- Migración de los fluidos del pozo
- Colapso o corrosión de la tubería de revestimiento
- Pérdida del control del pozo
- Altos costos de reparación por recementación

En estudios anteriores en pozos verticales se ha encontrado que se puede obtener la más alta eficiencia de desplazamiento del lodo, mediante la reducción del punto cedente del lodo y la maximización de los gastos de bombeo. Sin embargo, el estudio inicial de cementación de pozos desviados indicó que: (1) se requirieron lodos con altos valores de punto cedente para prevenir el asentamiento de sólidos, y (2) que con lodos de bajo punto cedente se depositaron sólidos de tal magnitud que no se obtuvo el desplazamiento completo del lodo.

Los propósitos de este estudio fueron:

- 1) Investigar con más detalle la relación del punto cedente del lodo de perforación y la depositación de sólidos del lodo de perforación.
- 2) Investigar los métodos conocidos para mejorar la eficiencia de desplazamiento del lodo en pozos verticales y analizar su efectividad para pozos desviados.

Los factores conocidos que influyen en el desplazamiento del lodo en pozos verticales, han sido identificados y estudiados en un pozo vertical simulado por un aparato de prueba a escala natural. Estos factores se examinaron en un modelo de pozo desviado a escala natural, variando los ángulos de desviación. Estos factores incluyeron:

- Uso de fluidos limpiadores
- Centradores de la tubería
- Movimiento de la tubería

Los resultados obtenidos en este artículo sugieren:

- 1) Métodos de prevención de los canales de lodo formados por el asentamiento de lodo de perforación, y si se presenta la canalización del lodo.
- 2) Métodos de desplazamiento del canal de sólidos asentado en el costado inferior del pozo.

#### PROCEDIMIENTO Y APARATOS UTILIZADOS EN LOS EXPERIMENTOS.

Los aparatos utilizados en la realización de esta investigación se diseñaron y operaron para simular, con la mayor aproximación, las condiciones reales experimentadas durante la cementación de un pozo productor de aceite. La figura 1 muestra el cabezal instalado y utilizado para circular diferentes fluidos bajo condiciones de desviación.

En la figura 2 se muestra un diagrama del pozo simulado. Cada sección de prueba consta de un empaque de arenas permeables y consolidadas que rodean una tubería perforada, de 15 pies de longitud y un diámetro interior de 6.5 pg. Durante esta investigación se simularon dos condiciones del fondo del pozo: (1) formación permeable, tal que permitiera la formación del enjarre; y (2) formación completamente impermeable. Para las pruebas de formación impermeable se utilizó como sección de prueba una tubería de revestimiento de acero de un diámetro interior de 6.5 pg. Se instaló, dentro de la sección de prueba, una tubería de revestimiento de un diámetro interior de 5 pg. En la tubería de revestimiento se colocaron centradores en la cima y el fondo de la sección de prueba.

La sección de prueba se colocó dentro de la parte baja de la camisa de filtrado, y se permitió que llegara a estar saturada con agua. Se registró la pérdida de fluido hacia la formación permeable, a través de un orificio fijado sobre la camisa de filtrado.

La camisa de filtrado se rodeo con agua caliente, mediante una camisa de calentamiento. La temperatura durante la realización de las pruebas permaneció de la siguiente forma:

- Circulación 180°F
- Periodo de gelatinización del lodo 200°F
- Periodo de fraguado del cemento 200°F

Estas temperaturas se eligieron para simular, lo más real posible, las condiciones encontradas en varias operaciones de cementación de pozos profundos. Se utilizaron fluidos de perforación base agua, preparados en el laboratorio, con una densidad de aproximadamente 12 lb/gal. En cada prueba se midieron to



das las propiedades del lodo de perforación (pérdida de fluido, densidad, reología, etc) a la temperatura ambiente y a 120°F.

Las lechadas de cemento se diseñaron para tener una densidad aproximada de 16.8 lb/gal. Durante las pruebas de desplazamiento, la lechada de cemento se mezcló utilizando un mezclador tipo recirculante, y se mantuvo en un tanque de almacenamiento de hormigón antes de ser bombeada al fondo del agujero. Durante este periodo de almacenamiento, se midió la reología de la lechada a su temperatura, utilizando un viscosímetro Fann modelo 35. Normalmente el punto cedente de la lechada variaba de 20 a 60 lb/100 pies<sup>2</sup>. Anteriormente se había determinado que la reología de la lechada de cemento no juega un papel importante en los procesos de desplazamiento. Los gastos de desplazamiento se normalizaron en 4 bl/min, para eliminar la variación de los diferentes gastos de bombeo. Este gasto corresponde a una velocidad media, en el espacio anular, de cerca de 4 pies/seg. A esta velocidad, la lechada de cemento se encuentra en régimen de flujo laminar, con él se cree que se simulan las condiciones de campo en las cuales se realizan la mayoría de las operaciones de bombeo del cemento.

En un pozo típico, el lodo se circula durante la perforación, la circulación se detiene mientras se toman los registros y se introduce la tubería de revestimiento, posteriormente se circula el lodo otra vez, momentos antes de la cementación. Estas pruebas se diseñaron para simular estos periodos estáticos y de flujo. La prueba de desplazamiento se inició circulando durante una hora el fluido de perforación a un gasto de 3 bl/min. a 180°F, y registrando la cantidad de fluido perdido por filtrado a través de la formación permeable. Posteriormente la temperatura de calentamiento del agua se elevó a 200°F y el lodo permaneció estático por un periodo de 24 horas. Se mantuvo una presión diferencial de 100 lb/pg<sup>2</sup> para permitir la pérdida de fluido por filtrado y, de esta manera, la formación del enjarre a lo largo de la formación permeable. La cantidad de filtrado se registró durante este periodo de tiempo.

Después del periodo de gelatinización del lodo, el lodo fue una vez mas circulado, durante una hora, a un gasto de 3bl/min, a una temperatura de 180°F, y también se registró la pérdida de fluido por filtrado en este periodo.

Posteriormente el lodo se desplazó con un volumen predefinido de espaciador y la lechada de cemento se bombeó a un gasto de 4 bl/min, a una temperatura de circulación de 180°F. También se midió la pérdida de fluido por filtrado durante este periodo de desplazamiento. El volumen de cemento varió de 10 a 30 bl. Después de que el cemento se bombeó dentro del lugar, la temperatura se elevó a 200°F, y el cemento se fraguó por un periodo de 24 horas. Posteriormente se enfriaron y desmontaron las muestras de la prueba. La muestra se cortó en moldes, de tal



forma que permitieran la medición del centrado y la eficiencia de desplazamiento (igual al área del espacio anular cementada dividida por el área total del espacio anular) como se define en la figura 3. La eficiencia de desplazamiento se determinó para la mitad superior y la mitad inferior del área del espacio anular.

#### VARIACION DEL PUNTO DE CEDENCIA DEL LODO.

Se realizaron una serie de pruebas con lodos de diferente punto cedente, para determinar el efecto de la reología del lodo de perforación sobre la eficiencia de desplazamiento, en un espacio anular impermeable, cuando se está desplazando lodo únicamente con cemento. Los resultados de estas pruebas están ordenados en la Tabla 1, de acuerdo a puntos de cedencia creciente del lodo, para ángulos de desviación de 60° y 85° a partir de la vertical.

Diez de estas pruebas se realizaron para un ángulo de desviación de 85° (a partir de la vertical). En las primeras siete pruebas se presentó un canal continuo de sólidos a lo largo del costado inferior de espacio anular; sin embargo, cuando el punto cedente de lodo fue lo suficientemente alto, el canal ya no aparecía. Este fenómeno se presentó en las pruebas 8, 9 y 10, donde el punto cedente fue mayor o igual a 28 lb/100 pie<sup>2</sup> a 72°F.

La misma tendencia se observó en las cinco pruebas realizadas para un ángulo de desviación de 60° a partir de la vertical. En la prueba 11 se presentó un canal en el costado inferior; sin embargo, otra vez, a medida que se incrementó lo suficiente el punto cedente (pruebas 13-15), este canal ya no se presentó. El valor mínimo del punto cedente, para prevenir este canal para una desviación de 60°, fue de cerca de 20 lb/100 pies<sup>2</sup> a 72°F.

Los resultados de estas pruebas han conducido a dos importantes conclusiones: Primero, parece ser que existe un valor del punto cedente abajo del cual se presentará un canal continuo de sólidos. Segundo, los resultados también sugieren que el valor del punto cedente requerido para prevenir la formación de este canal, decrece con una reducción en el ángulo de desviación.

#### EL EFECTO DE LOS FLUIDOS LIMPIADORES.

Se realizó una serie de pruebas para determinar el efecto que tienen los fluidos limpiadores de alta y baja viscosidad, sobre la eficiencia de desplazamiento del fluido de perforación en un pozo desviado 80° a partir de la vertical. Con esta prueba también se investigó el volumen del fluido limpiador. Esta investigación se realizó bajo condiciones permeables e impermea

bles. La primera parte de la investigación, consistió en determinar cuál de los dos fluidos removería el canal de sólidos formado cuando se utiliza un lodo diseñado de tal forma que existiera asentamiento de sólidos durante los periodos de circulación, bajo condiciones impermeables. En las pruebas 16, 23 y 24 no se utilizó fluido limpiador; en las pruebas 17, 18 y 19 se utilizó agua; en las pruebas 20 y 21 se utilizó un fluido químico poco viscoso (A); y en la prueba 22 se utilizó un fluido químico poco viscoso (B).

Los resultados obtenidos, enlistados en la Tabla 2, indican que ni el fluido limpiador viscoso (A), ni los fluidos limpiadores poco viscosos (agua y B), fueron capaces de remover completamente el canal de sólidos. Sin embargo, los resultados de la prueba 19 sugieren que, cuando se utilice un lodo en el cual el asentamiento de sólidos es una posibilidad, bombeando grandes cantidades de fluidos limpiadores de baja viscosidad se incrementará el porcentaje de remoción del lodo. La segunda parte de la investigación consistió en determinar cuál de los dos fluidos limpiadores mejoraría la eficiencia de desplazamiento de un lodo de perforación que no produce asentamiento de sólidos, bajo condiciones permeables. Se realizaron un total de 5 pruebas, en la prueba 25 no se utilizó fluido limpiador; en las pruebas 26 y 27 se utilizó agua; y en las pruebas 28 y 29 se utilizó un fluido limpiador viscoso (A).

Los resultados observados (Tabla 3) indican resultados similares a los que se obtuvieron cuando se bombeaba un lodo que ocasionaba el asentamiento de sólidos. Ninguno de los fluidos limpiadores, de poca viscosidad (agua), ni el viscoso (A), pudieron incrementar la anterior eficiencia de desplazamiento obtenida sin utilizar un fluido limpiador. Sin embargo, en este caso los problemas encontrados se debieron a la formación del enjarre en lugar del asentamiento de sólidos.

#### EL EFECTO DE LOS CENTRADORES.

Se realizó una serie de pruebas con un ángulo de desviación de  $80^\circ$  a partir de la vertical, bajo condiciones impermeables, para estudiar el efecto que tienen los centradores convencionales sobre la eficiencia de desplazamiento de lodo. Para estas pruebas la reología del lodo se diseñó otra vez de tal forma que se formara un canal de sólidos en el costado inferior. También, en estas pruebas, el cemento fue precedido por un fluido limpiador. En la prueba 30, se colocó un centrador en la parte central de la tubería. En la prueba 31 los centradores se colocaron a  $1/3$  y  $2/3$  sobre la parte final de la tubería de revestimiento. En las pruebas 32, 33 y 34 se colocó un centrador retirado a  $1/3$  del final de la tubería de revestimiento.

Los resultados de estas pruebas están registrados en la Tabla 4. Se puede observar que las eficiencias de desplazamiento de la parte inferior, fueron mayores en estas pruebas, que

en las pruebas anteriores, en las cuales existieron condiciones similares del lodo y no se utilizaron centradores. Del análisis individual de cada segmento de cada prueba, se determinó que los centradores en realidad habían ayudado en cierta medida en el proceso de remoción del lodo. En todos los casos se mejoró la remoción del lodo en ambos extremos del centrador. Las figuras 4A y 4B muestran gráficamente esta tendencia. Los arcos de los centradores aparentemente alteraron el patrón de flujo, hasta el grado que se obtuvo una mejor remoción de lodo. Sin embargo este efecto parece estar localizado a unos cuantos pies del centrador bajo las condiciones estudiadas.

#### EFEECTO DEL MOVIMIENTO DE LA TUBERÍA Y LOS LIMPIADORES DE LA PARED.

Todas las pruebas de movimiento de tubería y limpieza de la pared, se realizaron para un ángulo de desviación de  $80^\circ$  a partir de la vertical.

La investigación se realizó utilizando formaciones permeables e impermeables. Estas pruebas tenían dos objetivos: (1) determinar si el movimiento recíprocante y/o el de rotación, bajo condiciones impermeables, incrementaría la remoción del canal de sólidos formado cuando se está circulando un lodo de perforación que origina el asentamiento de sólidos; y (2) determinar (bajo condiciones permeables) la eficiencia del movimiento de la tubería, con y sin raspadores de pared en la tubería de revestimiento, en la remoción de enjarre formado, cuando se está utilizando un lodo que no origina el asentamiento de sólidos. En todos los casos el movimiento de la tubería se inició al comienzo del segundo período de circulación del lodo, y continuó hasta que el cemento había desplazado el fluido de perforación.

Se realizaron un total de cuatro pruebas, para determinar la eficiencia del movimiento de la tubería en la remoción del canal de sólidos, formado por un tipo de lodo que origina el asentamiento de sólidos sobre el costado inferior del espacio anular impermeable. En la prueba 35 no se empleó movimiento de tubería. En la prueba 36 la tubería se giró a 40 rpm. Durante la prueba 37 la tubería se movió recíprocamente a 10 ciclos/minuto, con una carrera de 20 pg. (lo cual creo velocidades lineales de la tubería típicas del movimiento recíprocante durante la operación de cementación). En la prueba 38 la tubería se giró y movió recíprocamente. Se utilizó un volumen de fluido limpiador de 10 bl de agua en cada una de estas pruebas. Los resultados (Tabla 5) indicaron que en estas pruebas el movimiento de la tubería ayudó a mejorar la remoción del lodo; sin embargo, no se observaron importantes diferencias entre la rotación y el movimiento recíprocante, ni en forma individual o en combinación.

Una comparación de las pruebas 1, 2 y 3, en la Tabla 1, contra las pruebas 36, 37 y 38 en la tabla 5, muestra los efectos del movimiento de la tubería. En la Tabla 1, se observan efi-



ciencias de desplazamiento en el fondo de 23, 14 y 50% para un ángulo de desviación de 85° cuando no se empleó el movimiento de la tubería.

Estos valores se pueden comparar con los de la Tabla 5, donde se indican eficiencias de desplazamiento de 100, 99 y 100% (pruebas 26, 27 y 38) para un ángulo de desviación de 80°, para lodos de perforación con similares valores de punto de cedencia. Tomando en consideración el posible efecto de la ligera diferencia en el ángulo de desviación y el punto de cedencia, existe todavía evidencia para creer que el movimiento de la tubería fue un factor importante en las diferencias de eficiencia de desplazamiento observados en estas pruebas. Se realizaron siete pruebas para determinar si el movimiento de la tubería, individual o en combinación con el limpiador de pared de cable, mejoraría la remoción del enjarre formado, cuando se está circulando un lodo que no origina el asentamiento de sólidos, bajo condiciones permeables. Durante la prueba 39 no se empleó el movimiento de la tubería. En la prueba 40 la tubería se giró a 20 rpm. En la prueba 41 la tubería se movió recíprocamente a 10 ciclos/minuto. En la prueba 42 la tubería se giró y movió recíprocamente. Las condiciones en las pruebas 43-45 se ajustaron a aquéllas de las pruebas 40-42, excepto que se utilizó un limpiador de pared de cable en los últimos cinco pies del fondo de la sección de la formación permeable. Se usó en cada prueba un volumen de fluido limpiador de 20 bl. de agua. Los resultados de estas pruebas están anotados en la Tabla 6.

A partir de los resultados de las pruebas 39-42, se determinó que el movimiento sólo de la tubería no incrementa significativamente la remoción del lodo, cuando se está cementado a través de zonas permeables; sin embargo se observó una extraordinaria mejoría cuando se compararon los resultados obtenidos al utilizar limpiadores de pared de cable. Lo más extraordinario de esto, se muestra en la prueba 44. En esta prueba la remoción del lodo en el área del limpiador de pared de cable fue casi completa (98%), mientras que en la sección donde no se utilizaron limpiadores mecánicos, solamente se removió el 67% de lodo.

#### DISCUSION:

Lo más importante de este estudio fue el establecimiento de la capacidad para reducir o controlar el asentamiento de sólidos provenientes de fluido de perforación mediante el mantenimiento de al menos un valor mínimo de punto de cedencia. Controlando el punto cedente del lodo y así controlando el asentamiento de sólidos, ayudará a eliminar el canal de sólidos asentado a lo largo del costado inferior del espacio anular.

En estudios anteriores, sobre el desplazamiento del lodo en pozos verticales, se concluyó que un lodo con un alto punto de cedencia, reduciría la eficiencia de desplazamiento mediante

la reducción de la movilidad del fluido. Estos estudios también concluyeron que la eficiencia de desplazamiento del lodo es mayor cuando se maximizan los gastos de bombeo, independientemente de las propiedades reológicas del cemento. Con base en los resultados de este estudio, parecería que, en pozos desviados, los gastos de bombeo son una consideración secundaria para la condición del lodo de perforación. Los gastos en flujo turbulento, pueden ayudar a remover el canal de sólidos asentado; sin embargo, las pruebas utilizando fluidos limpiadores de baja viscosidad, que se bombearon en flujo turbulento, indicaron solamente una escasa mejoría.

Otros factores analizados en este estudio fueron menos importantes, que el punto de cedencia, en la obtención de una alta eficiencia de desplazamiento de lodo; pero en las pruebas utilizando un lodo que no origina el asentamiento de sólidos, en combinación con el movimiento de la tubería y los limpiadores de pared, se obtuvo la más alta eficiencia de desplazamiento. Lo encontrado, es potencialmente significativo, porque en un pozo real, el asentamiento de los recortes de mayor tamaño, sobre el costado inferior del espacio anular, parece que se presenta aun cuando no se asienten otros sólidos del lodo.

La colocación de centradores, la cual se había identificado en estudios anteriores, como un factor importante en el desplazamiento vertical, es aún más importante en pozos desviados, debido a que las cargas que están actuando sobre la tubería de revestimiento, tienden a forzarla hacia el costado inferior del pozo. Este trabajo sugiere que los centradores pueden crear, por sí mismos, alternaciones locales del flujo que también benefician el desplazamiento

#### CONCLUSIONES:

El asentamiento de sólidos del lodo de perforación sobre el costado inferior del espacio anular, crea un canal de lodo que origina un canal continuo de material no cementado. La formación de tal canal de lodo ocasiona un incompleto recubrimiento de cemento, dejando un conducto potencial para la migración de los fluidos del pozo.

Existe un valor mínimo del punto de cedencia del lodo, arriba del cual el asentamiento de sólidos del lodo no es un problema importante. Este valor del punto cedente varía de acuerdo al ángulo de desviación del pozo: a menor ángulo de desviación se requerirá un punto cedente menor para prevenir el asentamiento.

Los fluidos limpiadores de muy baja viscosidad pueden mejorar, en poco grado, el desplazamiento de los diferentes tipos de material de asentamiento provenientes de los lodos. Los centradores de la tubería de revestimiento, mejoran la eficiencia de desplazamiento del lodo, particularmente en las regiones de

los extremos de los centradores.

Individualmente el movimiento recíprocante o la rotación de la tubería, pueden mejorar la eficiencia de desplazamiento. Sin embargo, la combinación de los dos tipos de movimientos no parece mejorar en forma importante la eficiencia de desplazamiento sobre el uso de sólo un tipo de movimiento.

Los limpiadores de pared, en este caso el limpiador de pared de cable, mejora en forma significativa el porcentaje de remoción del lodo, en las zonas permeables que hicieron contacto con los limpiadores, durante el movimiento de la tubería.

#### REFERENCIAS

- 1) Keller, S.R.; Crook, R. J.; Haut, P.C.; and Kulakofsky, D. S.: "Problems Associated with Deviated-Wellbore Cementing" paper SPE 11979 presented at SPE-AIME 58th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, San Francisco, California, October 5-8, 1983.
- 2) Brice, J.W., Jr. and Holmes, R.C.: "Engineering Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques", J. Pet. Tech. (May, 1964), 503-508.
- 3) McLean, R.H.; Manry, C.W.; and Whitaker, W. W.: "Displacement Mechanics in Primary Cementing", J. Pet. Tech. (February, 1967), 251-60.
- 4) Clark, C. R. and Carter, L.G.: "Mud Displacement with Cement Slurries", J. Pet. Tech. (July, 1973), 775-83.
- 5) Haut, R. C. and Crook, R. J.: "Primary Cementing: Optimizing for Maximum Displacement", World Oil (November, 1980), 105-16.
- 6) Howard, G. C. and Clark, J. B.: "Factors to be Considered in Obtaining Proper Cementing of Casing", Drilling and Production Practices, API (1948), 257.



T A B L A I

VARIACION DEL PUNTO DE CEDENCIA DEL LODO BAJO CONDICIONES DE DESVIACION

PRUEBA	ANGULO DE DESVIACION (°)	CEMENTO: 16.8 lb/gal <sup>1</sup> A 180°F		FLUIDO DE PERFORACION <sup>2</sup>		EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTOS <sup>3</sup> (%)			
		VOLUMEN (bl)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb <sub>f</sub> /100pies <sup>2</sup> )	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb <sub>f</sub> /100pies <sup>2</sup> )	T	C	F
1	85	10	18	30	34	4	65	96	23
2	85	10	20	30	31	6	51	92	14
3	85	10	15	29	31	9	80	92	50
4	85	20	32	22	63	17	92	100	79
5	85	20	25	27	83	23	86	100	58
6	85	10	29	31	65	23	80	92	59
7	85	10	14	29	72	25	84	96	67
8	85	20	35	33	85	28	99	97	99
9	85	20	27	34	104	36	100	100	100
10	85	10	20	28	78	47	99	98	100
11	60	20	25	31	73	15	82	94	70
12	60	20	63	37	47	17	95	100	90
13	60	20	18	37	61	20	100	100	99
14	60	20	55	42	48	24	99	100	97
15	60	20	22	30	62	29	100	100	100

1 Gasto de desplazamiento - 4 bl/min

2 Lodo base agua 12 lb/gal

3 Reportado como: Total (T); de la cima a la parte media (C); del fondo a la parte media (F)

TABLA 2. EFECTO DE LOS FLUIDOS LIMPIADORES SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DE UN LODO QUE ORIGINA ASENTAMIENTO DE SOLIDOS BAJO CONDICIONES DE DESVIACION DE 80°.

PRUEBA	CEMENTO - 16.8 lb/gal <sup>1</sup> A 180°F			FLUIDO ESPACIADOR <sup>1</sup>		FLUIDO DE PERFORACION <sup>2</sup> A 72°F		EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO <sup>3</sup> (%)		
	VOLUMEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	TIPO	VOLUMEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	T	C F	
16	20	32	29	---	--	30	4	74	59	87
17	20	31	34	AGUA	10	34	3	78	99	36
18	20	28	14	AGUA	10	45	9	84	97	69
19	20	25	34	AGUA	40	48	18	77	57	94
20	20	27	56	A4	10	50	21	76	93	34
21	20	29	31	A4	40	43	4	71	54	66
22	20	23	29	B5	40	31	12	77	83	74
23	20	26	30	---	--	50	15	73	91	25
24	20	24	31	---	--	51	8	91	99	83

1 Gasto de desplazamiento 4 lb/min

2 Lodo base agua de 12 lb/gal

3 Reportada como: Total (T); de la cima a la parte media (C); del fondo a la parte media (F)

4 Espaciador viscoso, base agua

5 Espaciador en flujo turbulento, base agua.

TABLA 3. EFECTO DE LOS FLUIDOS LIMPIADORES SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DE UN LODO QUE NO ORIGINA ASENTAMIENTO DE SOLIDOS BAJO CONDICIONES PERMEABLES Y DESVIACION DE 80°

PRUEBA	CEMENTO - 16.8 lb/gal <sup>1</sup> A 180 °F			FLUIDO ESPACIADOR <sup>1</sup>	FLUIDO PERFORACION <sup>2</sup> A 72 °F			EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO <sup>3</sup> (%)
	VOLUMEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )		TIPO	VOLUMEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	
25	30	74	12	---	---	61	30	82
26	30	44	41	AGUA	10	66	34	67
27	30	50	39	AGUA	40	74	39	78
28	30	51	64	A3	10	67	36	80
29	30	55	66	A3	40	72	34	68

- 1 Gasto de desplazamiento - 4 bl / min
- 2 Lodo base agua 12 lb/gal
- 3 Lodo base agua, espaciador viscoso



EFFECTO DE LOS CENTRALIZADORES CONVENCIONALES SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DE UN LODO QUE ORIGINA ASENTAMIENTO DE SOLIDOS BAJO CONDICIONES DE DESVIACION DE 80°

PRUEBA	CEMENTO - 16.8 lb/gal <sup>1</sup> A 180 °F		FLUIDO ESPACIADOR <sup>1</sup>		FLUIDO PERFORACION <sup>2</sup> A 72° F		EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO <sup>3</sup> (%)	
	VOLUMEN (bl)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	TIPO	VOLUMEN (bl)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	T C F
30	20	23	30	AGUA	10	54	13	92 84 97
31	20	32	28	AGUA	10	45	8	97 98 91
32	20	22	24	AGUA	10	54	13	96 100 94
33	20	63	37	AGUA	40	44	14	93 98 86
34	20	53	58	B <sup>4</sup>	5/10/55	44	12	96 95 98

- 1 Gasto de desplazamiento - 4 bl/min
- 2 Lodo base agua 12 lb/gal
- 3 Reportado como un total/cima-mitad/fondo-mitad
- 4 Lodo base agua, espaciador en flujo turbulento
- 5 5 bl. de agua /10 bl. de (B) / 5 bl. de agua

EFFECTO DEL MOVIMIENTO DE LA TUBERIA SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DE UN LODO QUE ORIGINA  
ASENTAMIENTO DE SOLIDOS BAJO CONDICIONES DE DESVIACION DE 80°

PRUEBA	TIPO DE MOVIMIENTO.	VOLU MEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	TIPO	VOLUMEN (b1)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA	EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO <sup>3</sup> (%)		
									T	C	F
35	NINGUNO	30	40	32	AGUA	10	44	20	89	99	81
36	ROTACION	30	60	15	AGUA	10	43	8	96	93	100
37	MOV. INCLINA DO.	30	48	14	AGUA	10	53	9	99	98	99
38	MOV. INC. Y ROT.	30	52	28	AGUA	10	46	11	99	99	100

CEMENTO - 16.8 lb/gas<sup>1</sup>  
A 180° FFLUIDO  
ESPACIADOR<sup>1</sup>FLUIDO  
PERFORACION<sup>2</sup>  
A 72° F

- 1 Gasto de desplazamiento - 4 bl/min
- 2 Lodo base agua 12 lb/gal
- 3 Reportado como un total/cima-mitad/fondo-mitad.

EFFECTO DEL MOVIMIENTO DE LA TUBERIA SOBRE EL DESPLAZAMIENTO DE UN LODO QUE NO ORIGINA  
ASENTAMIENTO DE SOLIDOS BAJO CONDICIONES PERMEABLES Y DESVIACION DE 80 °

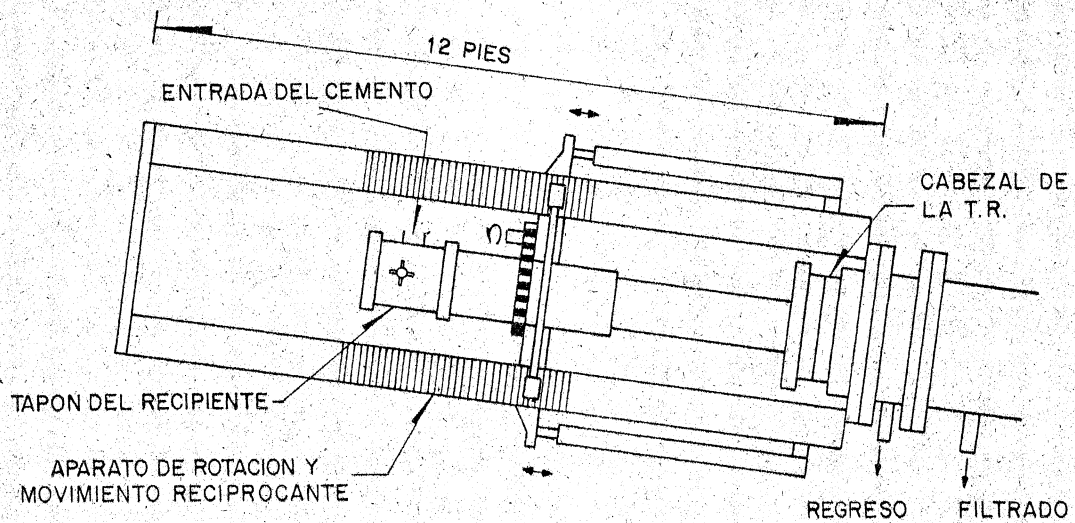
PRUEBA	TIPO DE MOVIMIENTO	VOLU MEN (bl)	CEMENTO - 16.8 lb/gas <sup>1</sup> A 180°F		PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies <sup>2</sup> )	TIPO	VOLUMEN	FLUIDO ESPACIADOR <sup>1</sup>		PUNTO DE CEDENCIA	EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO <sup>3</sup> (%)	
			VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)				FLUIDO PERFORACION <sup>2</sup> A 72°F	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)		T	C F
39	NINGUNO	30	50	55	AGUA	20	76	38	77	67	63	
40	RECIPROCANTE	30	55	22	AGUA	20	63	29	80	70	72	
41	ROTACION	30	47	56	AGUA	20	64	29	74	81	43	
42	RECIP. Y ROTAC.	30	59	40	AGUA	20	68	34	84	75	80	
43	RECIP., CON FLUIDO LAVADOR.	30	62	46	AGUA	20	77	41	85	69	86	
44	ROTAC., CON FLUIDO LAVADOR	30	44	41	AGUA	20	69	32	88	67	98	
45	RECIP., ROTAC. Y FLUIDO LAVADOR.	30	60	48	AGUA	20	75	35	97	92	99	

1 Gasto de desplazamiento - 4 bl/min

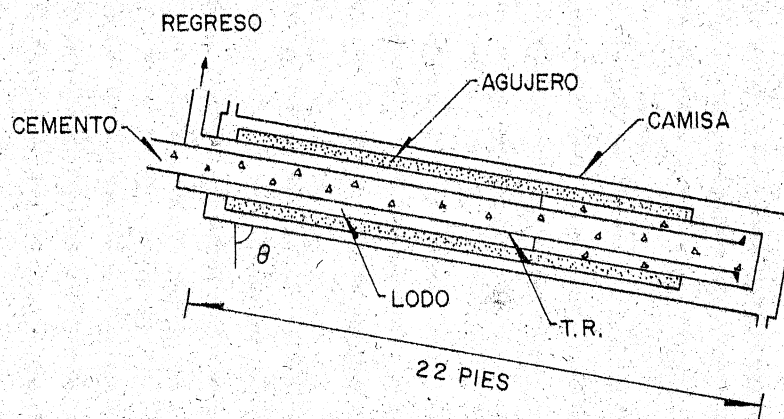
2 Lodo base agua 12 lb/gal

3 Reportado como un total /5 pies de la cima/ 5 pies del fondo.





*Fig 1. Diagrama del montaje del equipo de rotación y movimiento recíprocante.*



*Fig 2. Esquema del pozo simulado y de la camisa de calentamiento.*

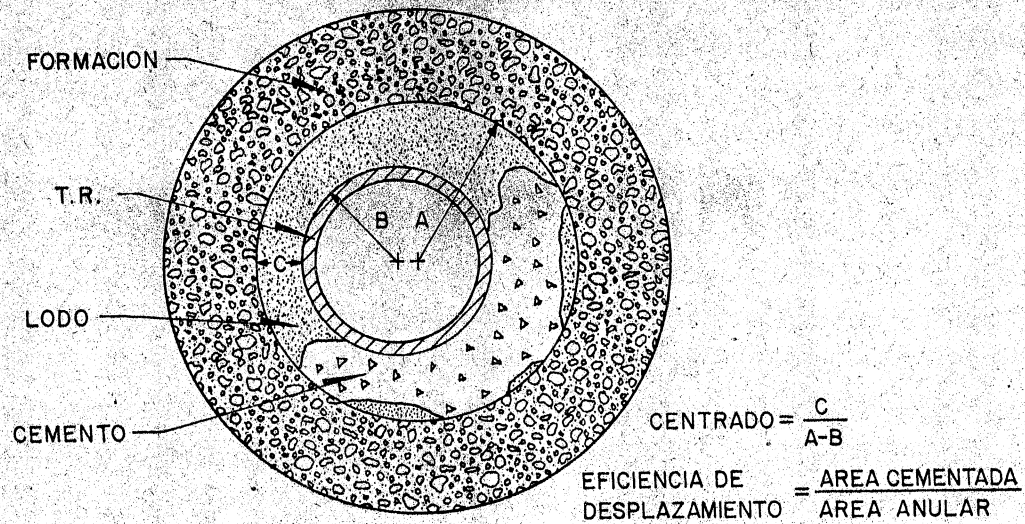


Fig 3. Definición de centrado y eficiencia de desplazamiento.

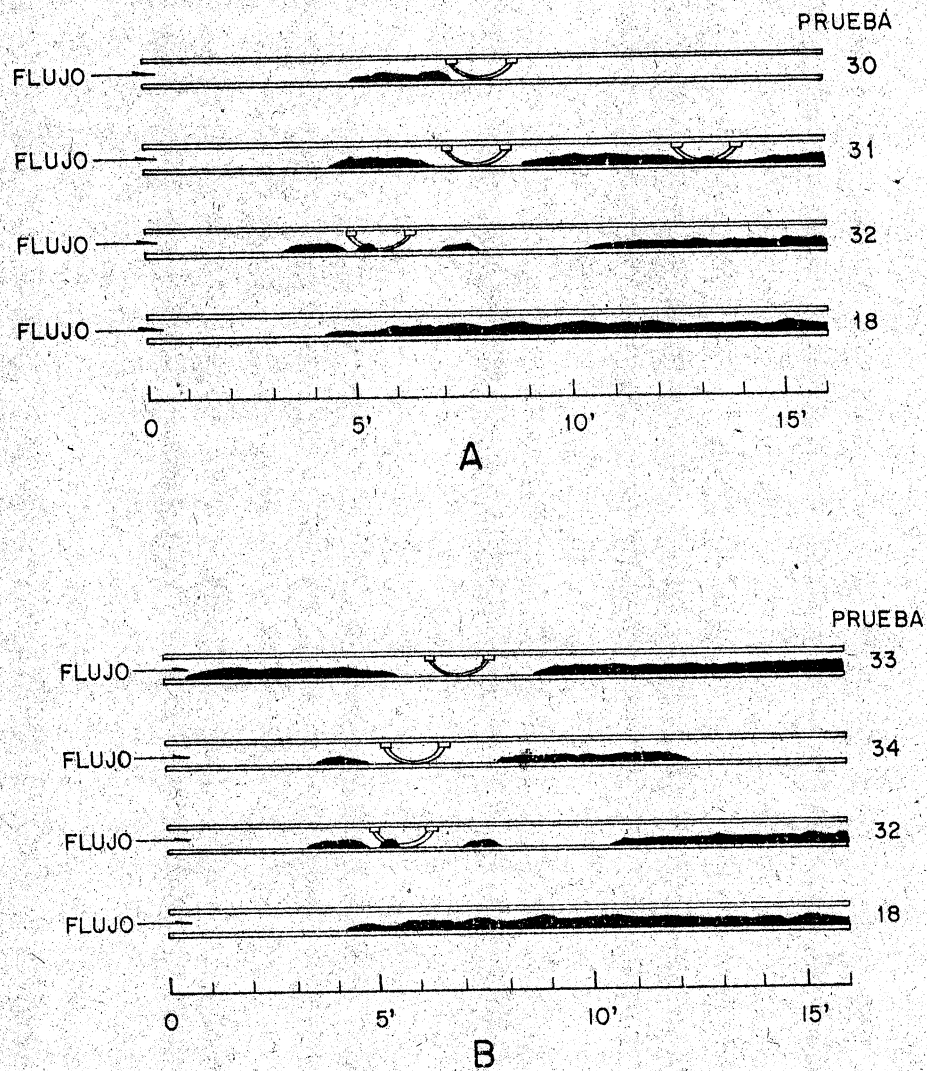


Fig 4. Efecto de los centradores en las pruebas de pozos desviados.





Impreso por la  
Coordinación de Servicios Generales  
a través de la Unidad de Difusión,  
Departamento de Impresión.  
El tiraje consta de 300 ejemplares  
y se terminó de imprimir  
en el mes de noviembre de 1989.



