



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A N:

PABLO FERNANDO CARRIZOSA CARRERA

MOISES DIAZ GOMEZ

ASESOR: ING. MARTIN TERRAZAS ROMERO



MEXICO. D. F.

OCTUBRE 2004

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-533

SR. PABLO FERNANDO CARRIZOSA CARRERA
Presente

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

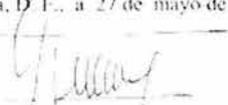
TECNOLOGÍA PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA

- I DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA**
- II EQUIPO, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACION FORZADA**
- III CEMENTOS Y ADITIVOS**
- IV DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO**
- V MÉTODOS DE EVALUACIÓN PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA**
- VI TAPONES DE CEMENTO**
- VII EJEMPLOS DE APLICACIÓN**
- BIBLIOGRAFÍA**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de mayo de 2004
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-1-535

SR. MOISÉS DÍAZ GÓMEZ
Presente

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

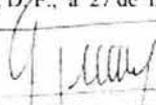
TECNOLOGÍA PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA

- I DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA**
- II EQUIPO, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACION FORZADA**
- III CEMENTOS Y ADITIVOS**
- IV DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO**
- V MÉTODOS DE EVALUACIÓN PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA**
- VI TAPONES DE CEMENTO**
- VII EJEMPLOS DE APLICACIÓN**
- BIBLIOGRAFÍA**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de mayo de 2004
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO


GFB*JAGC*gtg

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"TECNOLOGÍA PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA"

Tesis presentada por:

Pablo Fernando Carrizosa Carrera

Moisés Díaz Gómez

Dirigida Por: **Ing. Martín Terrazas Romero**

Jurado del examen profesional

PRESIDENTE: Ing. Manuel Villamar Viguera

VOCAL: Ing. Martín Terrazas Romero

SECRETARIO: M. C. Jaime Ortiz Ramirez

1er SUPLENTE: Ing. Rafael Viñas Rodriguez

2do SUPLENTE: Ing. Martín Carlos Velázquez Franco



Handwritten signatures of the jury members, including the President, Vocal, Secretary, and two substitutes, written over horizontal lines.

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA MATER:

La Universidad Nacional Autónoma de México

Por darme la oportunidad de formarme profesionalmente

A MIS PADRES:

Carmen y Pablo

Por haber creído en mí a pesar de mis tropiezos y los errores cometidos a lo largo de mi vida, y por haberme apoyado siempre en mis buenos y malos momentos, les estaré eternamente agradecido por ayudarme a llegar hasta aquí.

A MIS ABUELITOS:

Esperanza y Juan

Porque sin ellos no hubiera logrado esto, ya que con su cariño y su apoyo incondicional me dieron las fuerzas necesarias para que lo que era un sueño se convirtiera en realidad.

A MI ABUELITA:

Germana

Porque siempre me ha demostrado lo mucho que me quiere y también por su café, que es el mejor del mundo. Y a mi abuelito Chucho donde quiera que esté.

A MIS HERMANOS:

Jesús y Gaby

Porque espero que esto les sirva como una inspiración para lograr lo que más deseen.

A TODA MI FAMILIA:

Porque de ellos siempre recibí palabras de aliento y buenos deseos.

A MIS MAESTROS:

Ing. Manuel Villamar Viguera, Ing. Olivia S. Bobadilla Mendoza e Ing. José Martínez Pérez

Por compartir conmigo sus conocimientos, pero sobre todo por su amistad.

A MIS COMPAÑEROS DE “LA OFICINA”:

Alberto, Antelmo, Arturo, Carlos, Cesar, Gerardo, Hugo, Ignacio, Juan Manuel, Lalo, Moisés, Oscar, Rodolfo, Teodoro Iván, Vicuña y El Kech.

Por su amistad incondicional.

Un agradecimiento muy especial al Ing. José Martínez Pérez, quien nos brindó su valioso tiempo y conocimientos para la realización de este trabajo.

Pablo Fernando Carrizosa Carrera

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA MATER:

Deseo agradecer a la Facultad de ingeniería de la UNAM, y a todos sus profesores.

A MIS PADRES:

Alberta Gómez Méndez y Arcadio Díaz Guzmán

Por toda la ayuda recibida en esta etapa de mi vida, y por todo lo que quisieron darme y por ser buenos padres. Muchas gracias....

A MI HIJO:

Moisés Alejandro Díaz Valdez

Quien en estos momentos y por siempre será lo más apreciado.

A MIS HERMANAS Y HERMANO, SOBRINA Y SOBRINO:

Mary, Katy, José, Itzel, Osmar

A todos mis familiares, muchas gracias.

A MIS MAESTROS:

Ing. Olivia S. Bobadilla Menéndez e Ing. José Martínez Pérez

Sinceramente muchas gracias....

A MIS COMPAÑEROS DE "LA OFICINA":

Ignacio, Juan Manuel, Pablo, Carlos, Eduardo, Hugo, Oscar, T. Iván, César, Arturo,

Rodolfo, Alberto.

Porque siempre seremos amigos.

Moisés Díaz Gómez

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	4
I. Descripción de las Técnicas para la Cementación Forzada	5
I.1 Introducción.....	5
I.2 Técnicas de Cementación Forzada.....	5
I.3 Métodos de Colocación de la Lechada de Cemento.....	13
I.4 Aplicaciones de la Cementación Forzada.....	17
I.5 Conceptos de la Cementación Forzada.....	30
I.6 Requerimientos de una Cementación Forzada.....	40
I.7 Ambiente.....	43
I.8 Recursos.....	45
I.9 Aspectos Teóricos de la Cementación Forzada.....	46
I.10 Teorías erróneas sobre la Cementación Forzada.....	55
I.11 Razones del Fracaso de una Cementación Forzada.....	57
I.12 Procedimiento básico para realizar una Cementación Forzada.....	60
I.13 Planeación del Trabajo.....	64
II. Equipos, Herramientas y Accesorios para la Cementación Forzada ...	66
II.1 Introducción.....	66
II.2 Unidad de Alta Presión.....	68
II.3 Trompos o Tolvas de Cemento.....	69
II.4 Conexiones Superficiales.....	69
II.5 Herramientas Recuperables.....	70
II.6 Herramientas Molibles.....	72

III. Cementos y Aditivos	77
III.1 Introducción.....	77
III.2 Cemento Pórtland.....	78
III.3 Proceso del Cemento.....	79
III.4 Clasificación API del Cemento.....	90
III.5 Cementos Especiales.....	92
III.6 Aditivos para Cemento.....	93
III.7 Materiales para una Cementación Forzada.....	101
IV. Diseño de la Lechada de Cemento	106
IV.1 Introducción.....	106
IV.2 Factores de Diseño de la Lechada.....	106
IV.3 Pruebas de Laboratorio para el Cemento.....	121
IV.4 Pruebas de Laboratorio para la Lechada de Cemento.....	123
IV.5 Reología.....	130
V. Métodos de Evaluación para la Cementación Forzada	133
V.1 Introducción.....	133
V.2 Evaluación de una Cementación.....	134
V.3 Evaluación de los Trabajos de Cementación Forzada.....	135
V.4 Pruebas Hidráulicas.....	135
V.5 Consideraciones de Adherencia.....	139
V.6 Métodos para la Localización del Cemento detrás de la Tubería.....	143
V.7 Evaluación de la Calidad del Cemento.....	159
V.8 Cementación Correctiva.....	162

VI. Tapones de Cemento	163
VI.1 Introducción.....	163
VI.2 Uso de los Tapones de Cemento.....	163
VI.3 Precauciones al colocar un Tapón de Cemento.....	167
VI.4 Volumen de Cemento y Diseño de la Lechada.....	168
VI.5 El sistema del Lodo.....	169
VI.6 Técnicas para la Colocación de la Lechada.....	171
VI.7 Pruebas que se hacen a los Tapones de Cemento.....	175
VI.8 Consideraciones para el Diseño de los Tapones.....	175
VI.9 Razones por las que Falla un Trabajo de Taponamiento.....	180
VII. Ejemplos de Aplicación	183
Conclusiones	196
Bibliografía	197

RESUMEN

El proceso de cementación primaria ha sido usado por más de 70 años para sellar y soportar las tuberías de revestimiento en un pozo. Desafortunadamente, los resultados no son siempre exitosos y durante la vida de muchos pozos se ha requerido de ciertos trabajos de corrección. La técnica, comúnmente llamada cementación forzada, es más difícil y más amplia en su aplicación que la cementación primaria. Las operaciones de la cementación forzada pueden ser desarrolladas durante la perforación o la terminación de un pozo o durante su reparación o intervención posterior.

La cementación forzada es necesaria por muchas razones, pero probablemente su uso más importante es el de aislar la producción de hidrocarburos de aquellas formaciones que producen otros fluidos. El elemento clave de una cementación forzada es la colocación del cemento en el punto deseado o en puntos necesarios para lograr el propósito. Puede ser descrita como el proceso de forzar la lechada de cemento dentro de los agujeros en la tubería de revestimiento y en las cavidades detrás de la misma. Los problemas que soluciona una cementación forzada se relacionan con el objetivo de aislar zonas productoras

A menudo es difícil determinar por qué algunos pozos pueden ser forzados exitosamente en una sola operación, mientras que otros en el mismo campo, requieren varias operaciones. Existen ciertos fundamentos para la apropiada comprensión y aplicación de los principios de cementación forzada.

Las cementaciones forzadas son ampliamente usadas en pozos, con los siguientes propósitos: corregir por medio de inyección de cemento a presión, posibles fallas de cementaciones primarias, rupturas de tuberías de revestimiento, abandono de intervalos explotados, etcétera.

Los trabajos de cementación a presión están definidos como el proceso de inyectar una lechada de cemento a base de presión, a través de los agujeros o ranuras que existen en la tubería de revestimiento y comunican al espacio anular del pozo. Cuando la lechada es forzada contra un área permeable, las partículas sólidas filtradas sobre la cara de la

formación, así como la fase acuosa, entran a la matriz de ésta. Un trabajo de cementación forzada, diseñado apropiadamente, tiene como resultado la construcción de un enjarre sobre los agujeros abiertos entre la formación y la tubería de revestimiento; dicho enjarre forma un sólido casi impermeable. En los casos en que la lechada de cemento es colocada dentro de un intervalo fracturado, los sólidos del cemento deben desarrollar un enjarre sobre las caras de las fracturas y/o puentear la fractura.

Para llevar a cabo los trabajos de cementación a presión casi siempre se requiere del empleo de un empacador recuperable o permanente, según el caso, para aislar el espacio anular entre la TP y la TR del pozo. Así se deja directamente comunicada la zona en donde se desea hacer la inyección de cemento, con la sarta de trabajo. Con esto se obtiene un mayor rango de presión de operación y mayor seguridad de confinamiento de la lechada de cemento.

La cementación forzada tiene muchas aplicaciones durante las fases de perforación y terminación por ejemplo:

- Reparar un trabajo de cementación primaria que falló debido a que el cemento dejó un canal de lodo originando una canalización.
- Eliminar la entrada de agua de ambas zonas, inferior y superior, dentro de una zona productora de hidrocarburos.
- Reducir la relación de gas-aceite por aislamiento de la zona de gas de un intervalo adyacente al intervalo de aceite.
- Reparar una fuga en la tubería de revestimiento debido a la corrosión de la misma en zonas expuestas.
- Abandonar una zona represionada o no productora.
- Taponar todo o parte de una o más zonas de un pozo inyector con zonas múltiples de tal forma que la dirección de los fluidos inyectados dentro de las zonas sea la deseada.
- Sellar zonas de pérdidas de circulación.
- Evitar la migración de fluidos entre zonas productoras y no productoras de hidrocarburos.

Existen varias técnicas para realizar el trabajo de cementación a presión. La técnica empleada sirve para darle nombre.

- Cementación a presión con bombeo continuo o bombeo intermitente.
- Cementación a presión con rompimiento de formación e inyección de la lechada en el interior de la fractura provocada.
- Cementación a presión sin romper formación, formado depositaciones de cemento con base en la construcción de enjarre de baja permeabilidad en las zonas de inyección.

La técnica que se emplea se selecciona de acuerdo con el objetivo de la operación.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se recopilaron las técnicas existentes para realizar una cementación forzada. Se inició con los cementos utilizados en estas operaciones ya que para realizar una operación exitosa, la buena elección de este es fundamental, así como conocer sus propiedades y las condiciones en que puede ser usado, además de los aditivos que se emplean en estos. Se mencionan también herramientas utilizadas en estas operaciones y la forma en que se evalúa el éxito o fracaso de una operación de cementación forzada.

A pesar de los años que se tiene cementando pozos dentro de la industria petrolera y la experiencia adquirida durante estos años, siguen presentándose trabajos de cementación primaria defectuosos debido a que a veces no se puede tener un control absoluto sobre las condiciones de operación para que sean las óptimas al llevar a cabo dicho trabajo. Los trabajos de cementación defectuosos pueden resultar en un costo adicional de re-cementación, o lo que es peor en la pérdida del pozo.

A veces las operaciones de cementación por ser realizadas de manera continua por la gente especializada llegan a considerarse rutinarias no dándoles la importancia requerida y cayendo en una cementación defectuosa.

Cuando se efectúa una cementación, tenemos que considerar que es un proceso que involucra a todo el personal relacionado en la perforación de pozos desde la gerencia de perforación, los supervisores de perforación, los ingenieros de perforación, y el personal de las compañías de servicio.

Aunque un trabajo de cementación se enfoca en actividades técnicas y operativas, trabajadores, operadores, ingenieros y el personal de diseño y planeación deben tener claro el objetivo que se busca además de actitud y dedicación para obtener los mejores resultados.

CAPITULO I DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA

I.1 INTRODUCCION

La cementación forzada es, por definición histórica, la aplicación de una presión diferencial a través de una lechada de cemento para lograr la deshidratación del cemento. El propósito de la deshidratación es para crear inmovilidad de la lechada de cemento hasta que pueda desarrollar un esfuerzo compresivo. Cuando la lechada es forzada contra una formación permeable, sus partículas sólidas, forman un enjarre en la cara de la formación como una fase acuosa dentro de la matriz de esta. El enjarre formado es prácticamente un sólido impermeable. En casos donde la lechada es colocada dentro de intervalos fracturados, los sólidos del cemento deben desarrollar un enjarre contra la formación y a su vez obturar las fracturas. El objetivo de una cementación forzada es colocar el cemento en el punto correcto para lograr el aislamiento de fluidos, y obtener un sello entre la tubería de revestimiento y la formación; además obturar zonas porosas e intervalos disparados.

I.2 TÉCNICAS DE CEMENTACION FORZADA.

I.2.1 METODO BRADEN HEAD

El método original de forzamiento es el Método Braden Head, el cual es llevado a cabo a través de la tubería de producción o tubería de perforación sin el uso de empacador (Figura I.1). La presión es incrementada cerrando los preventores (BOP) o las válvulas de control en la cabeza del pozo, después que el cemento ha sido bombeado cerca del fondo de la sarta de cementación. Una predeterminada cantidad de lechada se bombea a una cierta altura específica afuera de la tubería de producción o de la tubería de perforación. La tubería de producción o de perforación es luego levantada fuera de la lechada y se cierran las válvulas de superficie. A continuación se bombea el fluido de desplazamiento por la tubería de producción o de perforación hasta que se consigue la presión que se desea o hasta que una determinada cantidad de fluido sea bombeada. La lechada de cemento remanente se regresa cuando se ha terminado la operación. Este método se usa ampliamente en

cementaciones forzadas en pozos poco profundos, en taponamientos y algunas veces para sellar zonas con pérdida de circulación parcial durante la perforación o cuando no se tiene el cementador apropiado. La aplicación del método está restringida por que hay que presurizar la TR y por lo tanto las máximas presiones están limitadas por la resistencia de la TR. Además es difícil ubicar exactamente el lugar deseado sin usar un empacador.

Esta técnica, ilustrada en la figura I.2, es normalmente usada cuando la cementación forzada de baja presión es utilizada, y cuando no hay duda respecto a la capacidad de la TR para soportar la presión de forzamiento. No se requiere de herramientas especiales, aunque un tapón puente puede ser requerido para aislar intervalos más profundos en el pozo.

La tubería de trabajo es corrida hasta el fondo de la zona a ser cementada. Los arietes de los preventores son cerrados sobre la tubería, y se efectúa una prueba de inyección. La lechada de cemento es bombeada hacia el fondo por la sarta de cementación.

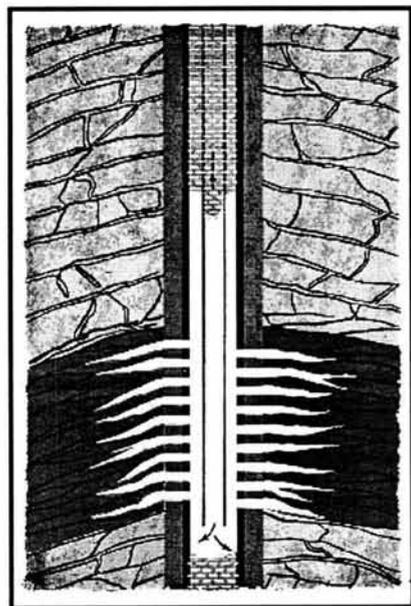


FIGURA I.1 MÉTODO DE BRADEN HEAD

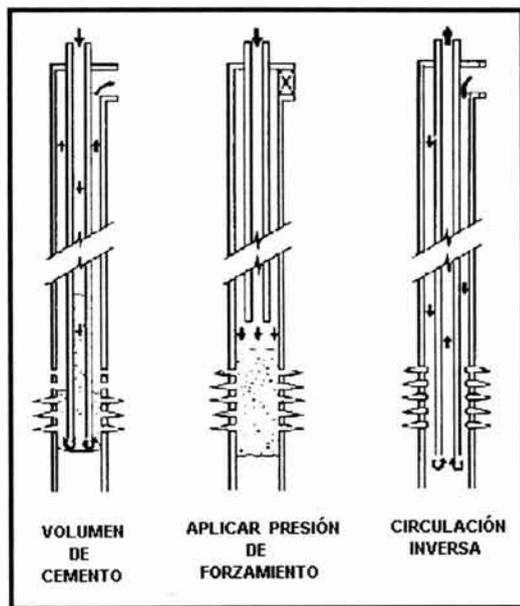


FIGURA I.2 MÉTODO DE BRADEN HEAD

Existen dos técnicas para efectuar esta operación, siendo las siguientes:

1. Forzar con la tubería franca frente a los disparos.

- a) Se introduce la tubería hasta la base de los disparos, calibrándola de acuerdo a su diámetro.
- b) Se circula hasta homogeneizar columnas, verificando el nivel de lodo en las presas.
- c) Se cierran preventores anulares.
- d) Se efectúa prueba de admisión, si admite la formación se registra la presión y se abren los preventores.
- e) Se bombean los fluidos espaciadores, dependiendo del tipo de lodo en operación.
- f) Se bombea la lechada y se desplaza hasta el extremo inferior de la tubería de trabajo.
- g) Se cierran preventores.
- h) Se inyecta cemento a gastos bajos, hasta terminar el volumen de lechada o hasta que se alcance la presión calculada y dejar represionado el pozo el tiempo necesario de deshidratación, un poco antes del fraguado total del cemento
- i) Descargar la presión, abrir preventores y sacar tubería.
- j) Se levanta la tubería y se circula inverso dos veces la capacidad de la tubería de perforación.

Para seguridad de esta operación deberá efectuarse con tubería de aluminio en el extremo pues en caso que ésta quede atrapada por el fraguado prematuro del cemento, pueda ser desconectada y posteriormente ser molida fácil y rápidamente.

2. Forzar con la tubería arriba del cemento.

- a) Repetir los pasos anteriores hasta el inciso d.
- b) Se bombea el cemento para colocarlo como tapón por circulación.
- c) Se levanta la tubería hasta quedar arriba del cemento con un margen de seguridad.
- d) Cerrar preventores anulares.
- f) Se inyecta cemento a la formación.
- g) Se abren preventores y se circula inverso.

I.2.2 METODO DE CEMENTACION FORZADA CON EMPACADOR.

Este método utiliza empacador o retenedor recuperables o no, ubicados en una posición cercana a la parte superior de la zona a ser cementada. Esta técnica se considera mejor que la de Braden Head ya que confina o sitúa la presión en un punto específico en el agujero.

Antes de ubicar o de colocar el cemento se hace una prueba de presión para determinar la presión de fractura de la formación. En ciertas ocasiones, la sección abajo de los disparos a forzar puede ser aislada con un tapón puente. Cuando la presión de cementación deseada se ha obtenido, se regresa el exceso de lechada.

VENTAJAS

- Permite altas presiones de forzamiento. El empacador aísla la zona a ser forzada.
- Existe un mejor control de la operación que con el método Braden Head.
- Permite una mayor eficiencia de colocación de la lechada por el método de bombeo intermitente.
- Es posible corregir un trabajo deficiente sin tener que estar sacando la herramienta.

Esta técnica puede ser dividida en dos partes, el método con empacador recuperable y el método con retenedor móvil.

Método con empacador recuperable.

En cementación forzada son usados empacadores a presión o tensión. Como se muestra en la figura 1.3, estos tienen una válvula by pass que permite la circulación de fluidos mientras se corren en el agujero, y una vez que el empacador está colocado. Esta característica permite la limpieza de las herramientas después de la operación, y el regreso del exceso de lechada por una presión excesiva; esto también evita el efecto de pistón o sondeo mientras se está corriendo en el agujero.

La principal ventaja de los empacadores recuperables sobre el retenedor molible es su capacidad de anclarse y soltarse varias veces, sin tener que sacar la herramienta, permitiendo así mayor flexibilidad y ahorro de tiempo en el trabajo. Los tapones tipo puente recuperable pueden correrse en un solo viaje con el empacador y recuperarse después que la lechada haya sido colocada, el excedente de la lechada se saca por medio de circulación inversa.

En la mayoría de las operaciones uno o dos sacos de arena fracturante o barita se colocan en la cima del tapón puente para prevenir la adhesión del cemento sobre la junta del mecanismo.

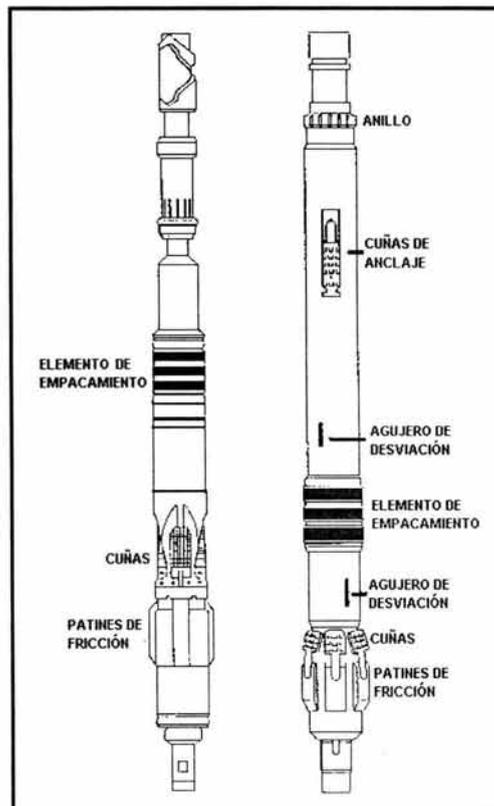


FIGURA I.3 EMPACADORES RECUPERABLES

Método con retenedor de cemento molible.

Los retenedores de cemento se usan en lugar de los empacadores para prevenir retroflujo cuando no se espera la deshidratación del cemento, o cuando una alta presión diferencial negativa puede afectar el enjarre del cemento.

En algunas situaciones, la comunicación con formaciones potencialmente superiores hace riesgoso el uso de un empacador. Cuando se cementan zonas múltiples, el retenedor de cemento aísla los disparos más bajos, pudiendo así cementar las zonas subsecuentes sin esperar la colocación de la lechada. Los retenedores de cemento son empacadores molibles provistos de una válvula la cual es operada por un tensor en el extremo de la sarta (figura I.4) un retenedor molible da al operador más confiabilidad de colocar el empacador más cerca de las perforaciones. Esto es además ventajoso ya que un volumen menor de fluido debajo del empacador es desplazado a través de los disparos delante de la lechada de cemento.

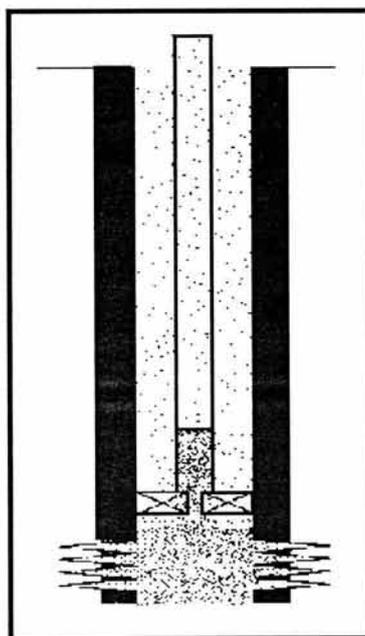


FIGURA I.4 RETENEDOR DE CEMENTO PERFORABLE

Los tapones tipo puente móviles son normalmente empleados para aislar la TR de bajo de la zona que será tratada. Su diseño es similar al de los retenedores de cemento. Pueden correrse con tubería o con línea de acero. Los tapones puente no permiten el flujo a través de la herramienta.

Programa operativo de una cementación forzada con herramienta.

1. Se escarea la TR hasta la profundidad donde se va a anclar el retenedor o empacador recuperable.
2. Se mete la herramienta seleccionada hasta la profundidad programada calibrando la tubería.
3. Con la herramienta 100 m bajo de la mesa rotatoria, se prueba su efectividad con circulación.
4. Se mete la herramienta hasta la posición de anclaje, se prueba la circulación y se verifica el peso de la sarta con movimiento recíprocante para tener información y saber si después de la operación puede existir un problema por atrapamiento.
5. Se instalan las conexiones superficiales, líneas de control y se prueban tomando en cuenta el estado mecánico del pozo y la operación que se va a efectuar.
6. Se anclan las herramientas según el procedimiento establecido para cada una de ellas.
7. Se prueba la efectividad de la herramienta con peso, tensión y presión, por la TP y por el espacio anular, dependiendo del estado mecánico del pozo.
8. Si es un retenedor, suelte la herramienta, y levante el soldador arriba del retenedor para probar la efectividad del mismo, cerrando los preventores y aplicando la presión equivalente al 30% del valor de la presión interna nominal de la tubería de menor grado.

Falta página

N° 12

Descargar primero la presión del espacio anular y posteriormente la de la tubería de producción, desanclar el soltador y circular en inversa bombeando dos veces la capacidad de la tubería de producción, abrir los preventores y continuar con el programa del pozo.

c) Si la densidad del cemento es menor que la del lodo en operación, se levanta el soltador arriba del retenedor, bombear los volúmenes separadores seguidos del cemento programado hasta colocar el separador frente al retenedor, conectar el soltador, cerrar preventores, represionar el espacio anular y proceder a bombear el cemento hasta alcanzar la presión final programada.

Descargar la presión del espacio anular, posteriormente la de la tubería de producción, desconectar el soltador, cerrar preventores, circular en inversa, abrir preventores, sacar el soltador y continuar con el programa del pozo.

I.3 METODOS DE COLOCACION DE LA LECHADA DE CEMENTO

I.3.1 METODO DE CEMENTACION FORZADA CON BOMBEO CONTINUO.

Durante la cementación forzada la lechada es bombeada continuamente hasta que la presión de forzamiento final es obtenida (la cual puede estar sobre o debajo de la presión de fractura). Al detener el bombeo la presión es monitoreada y si se da una caída de presión, se da un filtrado adicional en la interfase cemento/formación; mas lechada debe ser bombeada para mantener la presión superficial de forzamiento final. Se continúa inyectando hasta que el pozo mantenga por varios minutos la presión de forzamiento, sin inyección adicional de lechada de cemento. El volumen de la lechada inyectado es usualmente grande, comúnmente de 10 a 100 barriles.

En algunos métodos de cementación forzada, una cantidad de agua (o lavador químico) es bombeada antes que la lechada, para obtener la presión de fractura.

El tiempo de bombeo mínimo es el tiempo para mezclar y bombear la lechada al intervalo seleccionado. El equipo para medir este tiempo se define en las normas API 10-A y 10-B. El probador de tiempo de espesamiento hace un simulacro de las condiciones del pozo donde

las temperaturas estáticas de fondo pueden ser de hasta 260 °C y las presiones exceden los 980 kg/cm².

En las cementaciones a presión, los requerimientos de presión pueden variar para las diferentes técnicas, dependiendo de las características de la lechada y condiciones del pozo.

Bombeo continuo lento.

Es el proceso más usado en una cementación ya que el manejar pequeños volúmenes de lechada ayuda a que se forme una capa de cemento deshidratado frente a la formación porosa que primero acepta el fluido. Conforme los disparos y canales van siendo abiertos por la capa de cemento deshidratado, se registra un aumento de presión en la superficie. Es importante observar detenidamente la lectura del manómetro que registra la presión de inyección. En el caso de que se haya creado una fractura, el volumen de lechada podría ser bombeado cerca de la formación a un gasto lento con un bombeo continuo. Con este tipo de bombeo la presión de inyección comienza a subir hasta que la presión de superficie indica que el forzamiento ha ocurrido. La presión se mantiene momentáneamente en la formación para verificar las condiciones estáticas y entonces se libera para saber si el cemento ya se encuentra dentro del espacio a obturar. La lechada excedente arriba de los disparos es sacada con circulación inversa.

Bombeo continuo rápido.

Generalmente no es recomendable realizar trabajos a bombeo rápido ya que implica manejar mayores volúmenes de lechada aumentando con ello la presión superficial ocasionando fracturamiento. Las altas presiones de trabajo no aumentan las posibilidades de éxito, pero incrementan la posibilidad de fracturar la formación.

I.3.2 METODO DE BOMBEO FORZADO INTERMITENTE.

Modernas cementaciones con características de baja pérdida de fluido y con la disponibilidad del empacador recuperable y del tapón puente, hacen de este método el más eficiente en una etapa única, pero divide la colocación interna alternando periodos de bombeo-espera.

Esta técnica intermitente utiliza el control de la pérdida de fluido de la lechada al construir un enjarre contra la formación y dentro de los disparos, sin embargo la lechada restante permanece como un fluido dentro de la tubería de revestimiento.

La pequeña cantidad de pérdida de filtrado de la lechada hace impracticable, si no imposible, el bombeo continuo a un ritmo bajo para mantener una diferencial de presión constante. El mínimo gasto de inyección disponible con el equipo de campo existente es excesivo hasta para una cementación forzada a alta presión donde se crean grandes fracturas.

El único procedimiento que hace posible la deshidratación de pequeñas cantidades de cemento dentro de los disparos, es el método de bombeo vacilante. Este procedimiento consiste en la aplicación intermitente de presión a un gasto de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ bl/min. Separados por un intervalo de 2 minutos para permitir las caídas de presión debidas a la pérdida de filtrado en la formación. La caída inicial es normalmente rápida, debido a que no hay enjarre, a medida que el enjarre se deposita y la presión de aplicación se incrementa los periodos de filtrado se vuelven mas largos y la diferencia entre la presiones inicial y final se vuelven más pequeñas, hasta que al final del trabajo la caída de presión se considera despreciable. (Figura I.5).

Los volúmenes de lechada necesarios para esta técnica son menores que los utilizados para otros métodos. Una formación con pérdida, normalmente requiere un periodo vacilante largo para comenzar a incrementar la presión. Un primer periodo de interrupción de 30 minutos o más no es razonable o prudente. Un periodo intermitente mucho menor inicial, aproximadamente 5 minutos, es normalmente suficiente para formaciones débiles.

Una lechada de cemento no es un fluido real propiamente, porque en su contenido hay partículas sólidas (cemento) rodeado por un fluido real (agua). Por esta razón el cemento no puede ser bombeado dentro de la formación permeable. Fluidos reales tales como el agua, aceite, ácido, etc. pueden ser bombeados al interior de la formación. Cuando el cemento se deshidrata contra la cara permeable de la formación la fase de agua de la lechada es forzada a salir y un filtro de partículas sólidas de enjarre de cemento se forma en la cara de la formación. Si la presión de forzamiento es excesiva en la superficie, la formación será fracturada y nada del cemento bombeado entrará a la formación, se meterá en esas

fracturas. La filosofía básica de forzar con una baja pérdida de fluido fracturando o no la formación no siempre es exitosa.

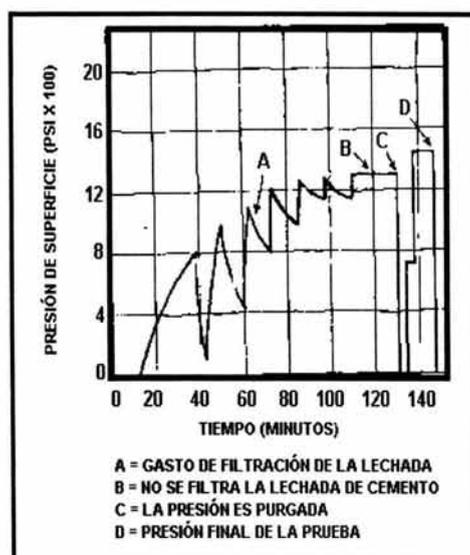


FIGURA I.5. BOMBEO VACILANTE

La pérdida de fluidos de la lechada es usualmente muy rápida y puede fraguar dentro de la TR antes que la lechada pueda cubrir toda la formación. El resultado puede ser un tapón de cemento a través de la cima de los disparos.

A la inversa, el control de la pérdida de fluido (obtenida por usar aditivos especiales en la lechada) ayuda a anular las pérdidas prematuras del fluido de la lechada en la TR. Cuando el fluido se está perdiendo en la formación, se forma un enjarre de cemento resistente a la presión. Además, la pérdida de fluido está ocurriendo en la formación por lo que en la TR no se presenta una pérdida de fluido o esta es mínima. Es posible obtener un tapón de cemento en la formación y atravesar los disparos; y además tener el tiempo suficiente para regresar la lechada excedente en la TR. El beneficio de la intermitencia durante la operación de bombeo es que esta acción tiende a incitar la depositación controlada de sólidos del cemento contra la formación.

El bombeo intermitente es el complemento del bombeo lento para llevar a cabo mejores trabajos en cementación forzada. Las intermitencias efectuadas en una operación de forzamiento reducirán significativamente la capacidad de bombeo de la lechada. A pesar de que dicha intermitencia no se consideran durante las pruebas de laboratorio, pueden ser un factor que contribuya a dejar el cemento fraguado dentro de las tuberías antes de obtener la presión de cementación deseada.

Cuando la presión de inyección es demasiado baja o se abate rápidamente, se recomienda un bombeo lento y periodos prolongados de intermitencia para acelerar de esta forma la deshidratación del cemento lo que permitirá alcanzar la presión máxima.

I.4 APLICACIONES DE LA CEMENTACIÓN FORZADA.

I.4.1 REPARAR UN DEFICIENTE TRABAJO DE CEMENTACIÓN PRIMARIA.

El mal desplazamiento del lodo durante la cementación primaria, provoca que la lechada se canalice a través del lodo de perforación. Consecuentemente, bolsas o canales de lodo quedan detrás de la TR (Figura I.6), y no habrá un aislamiento hidráulico bueno entre las zonas permeables. Si esto no es corregido acarreará serios problemas durante la vida del pozo, tales como:

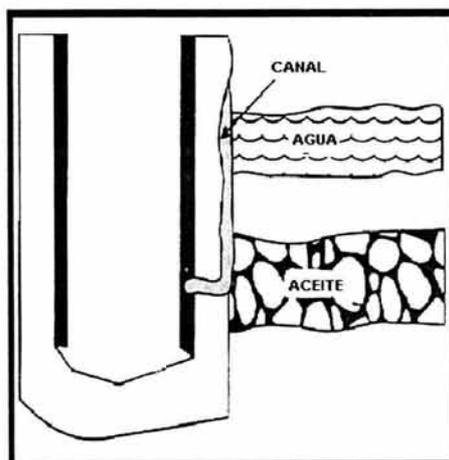


FIGURA I.6 AISLAMIENTO HIDRAÚLICO DEFECTUOSO

- Los tratamientos de estimulación no tendrán buenos resultados, a causa de un pobre control de los fluidos de desplazamiento.
- Evaluación inexacta del potencial del pozo por efectos parásitos debido a fluidos cercanos.
- Baja productividad del pozo como resultado de la alta producción de agua o alta RGA.
- Fallas en proyectos de inyección de agua.

La elección de disparar en una TR cementada para aplicar una cementación forzada no es una decisión fácil de tomar. Definir donde disparar es también crítico, un minucioso análisis del trabajo de cementación primaria, con base en una precisa medición de todos los parámetros de la operación y una interpretación cuidadosa de los registros son importantes para tomar la decisión.

Dos situaciones se pueden dar entre la TR y la formación:

- El canal de lodo a ser reparado se encuentra contra una formación permeable. En el forzamiento el enjarre de cemento se construye y eventualmente llena el espacio vacío.
- La circulación se establece entre dos zonas disparadas. La circulación se efectúa para reemplazar al lodo por cemento en el canal. Básicamente, esto es una recementación parcial o total en el intervalo de interés.

Las dos operaciones anteriores son exitosas solo si la presión de tratamiento de fondo permanece abajo de la presión de fractura de la formación. La fractura creada durante la ejecución del trabajo provocaría abrir una ruta a través de la cual un gran volumen de la lechada de cemento penetraría, resultando un daño al intervalo permeable no alcanzando los objetivos del tratamiento.

La circulación de forzamiento (Figura I.7) es casi siempre efectuada con un retenedor de cemento. La circulación es alcanzada con agua o ácido como un fluido de limpieza. El intervalo es circulado con un fluido lavador para asegurar una buena limpieza. Y la lechada de cemento es entonces bombeada y desplazada. El incremento de la presión no ocurre

durante el trabajo, excepto por un incremento debido a la presión hidrostática de la columna de cemento que fluye en el espacio anular. Una vez que la colocación es terminada, la sarta y el empacador (cuando no se utilice un retenedor molible) son recuperados. El exceso de cemento es llevado a la superficie por circulación inversa.

Existe la posibilidad que alguna cantidad de lechada de cemento entre a la TR, TP, tubería de producción, o en el espacio anular arriba de la herramienta para el forzamiento durante el trabajo. Debido de esto existe el riesgo de que la tubería de perforación (o producción) quede atrapada dentro del agujero. Además, se recomienda correr un retenedor con un empacador para minimizar este riesgo. De preferencia, el retenedor debe ser colocado lo más cerca posible de la cima de las perforaciones para minimizar la exposición de la TP al cemento el cual puede entrar al pozo a través de los disparos superiores.

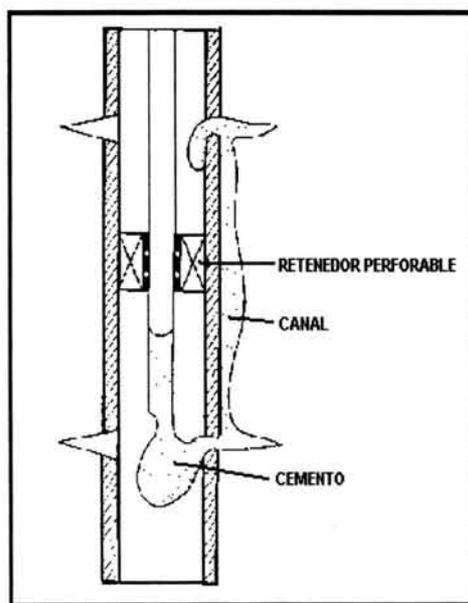


FIGURA I.7 CIRCULACIÓN DE FORZAMIENTO

I.4.2 EVITAR LA PRODUCCIÓN DE AGUA NO DESEADA.

La entrada de agua (usualmente resultado de una conificación) puede ocurrir durante la vida productiva del pozo, provocando una excesiva relación agua/aceite (WOR), reduciendo la

productividad del pozo. Realizando una cementación forzada podemos sellar para evitar la entrada de agua.

La conificación de agua puede ser agua de fondo o agua la cual migra a través de los canales anulares. Dicha producción de agua solo puede detenerse o alterarse a través de las fracturas o canales anulares o bien en las canalizaciones de la cementación primaria. El flujo de agua a través de la permeabilidad vertical de la matriz es muy difícil de detener porque, durante un tratamiento de forzamiento sólo el filtrado de cemento penetra a los poros de la formación y las partículas de cemento permanecen en la cara de la formación.

El agua es parte integral de todos los poros de la roca y esta presente en la mayoría de las formaciones productoras de aceite y gas. Esta tal vez ayude al flujo de hidrocarburos esparcidos ampliamente en la roca del yacimiento, ayudando en la recuperación del aceite. En muchos casos esta ha actuado como una fuerza ascendente para hacer un eficiente mecanismo de recuperación por empuje de agua. El agua como un problema en la producción de aceite o gas puede existir en cualquiera de estas tres formas: (1) saturación excesiva del espacio poroso en existencia con los hidrocarburos, (2) espacio poroso saturado como una separación definida de la columna de aceite en el contacto agua/aceite y (3) una zona saturada removida de la zona de interés por medio de un canal o fractura (Fig.1.8). Cada una de estas condiciones debe ser diagnosticada y tratada de forma distinta.

Una baja carga de partículas y baja viscosidad del fluido, forman un gel fuerte para diferentes condiciones de fondo del pozo. Estos fluidos pueden penetrar profundamente en la permeabilidad de la roca ofreciendo una buena perspectiva para solucionar el problema de invasión de agua.

También, el empleo de unidades de tubería flexible para realizar estos trabajos ha adquirido popularidad. La tubería flexible ha probado ser un método muy económico para la colocación de pequeños volúmenes de lechada de cemento en estas operaciones. Se ha reportado que arriba del 85 % del costo de trabajo se ha ahorrado con el empleo de tuberías flexibles (Figura 1.9). El procedimiento lo podemos dividir en cuatro etapas:

- Una columna de lodo que sirve como soporte (viscosidad homogénea) se inyecta hasta que el nivel está justo abajo de los disparos por forzar. Algo de contaminación por lodo puede ocurrir durante la colocación por el mezclado y el contacto con fluidos, la sarta de TF se saca y el lodo contaminado se circula hacia afuera.

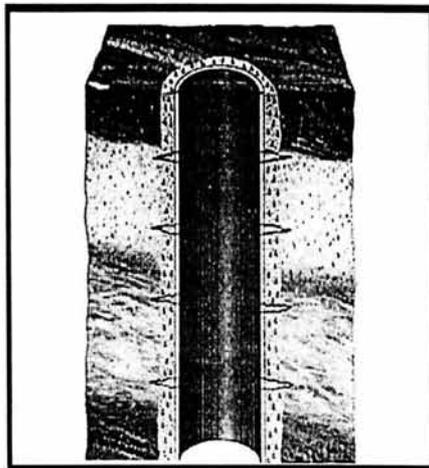


FIGURA 1.8 EVITAR LA INTRUSIÓN DE AGUA

- El se bombea el cemento con la boquilla localizada justo arriba de la interfase lodo/agua. Cuando las perforaciones son cubiertas con lechada de cemento, la presión de forzamiento se aplica. La boquilla debe de mantenerse bajo la interfase agua/cemento.
- Después de haber obtenido la presión de forzamiento un fluido contaminante se inyecta para diluir la lechada de cemento.
- El cemento y lodo contaminado son circulados fuera y el pozo se lava.

El agua puede entrar en la formación a través de permeabilidad horizontal, a través de un microanillo en la unión tubería/cemento o cemento/formación, ascendiendo en un punto de entrada adyacente a la columna de aceite, o a través de la permeabilidad vertical a la columna de aceite. La habilidad para taponar los disparos adyacentes a la producción de agua para prevenir la producción a través de la permeabilidad horizontal no es el problema, de cualquier forma esta no prevendrá la migración ascendente en el espacio anular. Para

sellar el espacio anular se requiere una cuidadosa aplicación del programa. Primero, no se debe fracturar la formación durante la colocación del cemento, si esto ocurre la mayoría del cemento ocuparía un plano vertical y no llenará los vacíos del espacio anular. La densidad de los disparos en la tubería debe ser tal que la periferia de la tubería debe tener amplia exposición para recibir una buena cantidad de cemento completamente al rededor de ella. El cemento debe tener baja pérdida de filtrado, del tipo de alta densidad para una mejor colocación y resistencia.

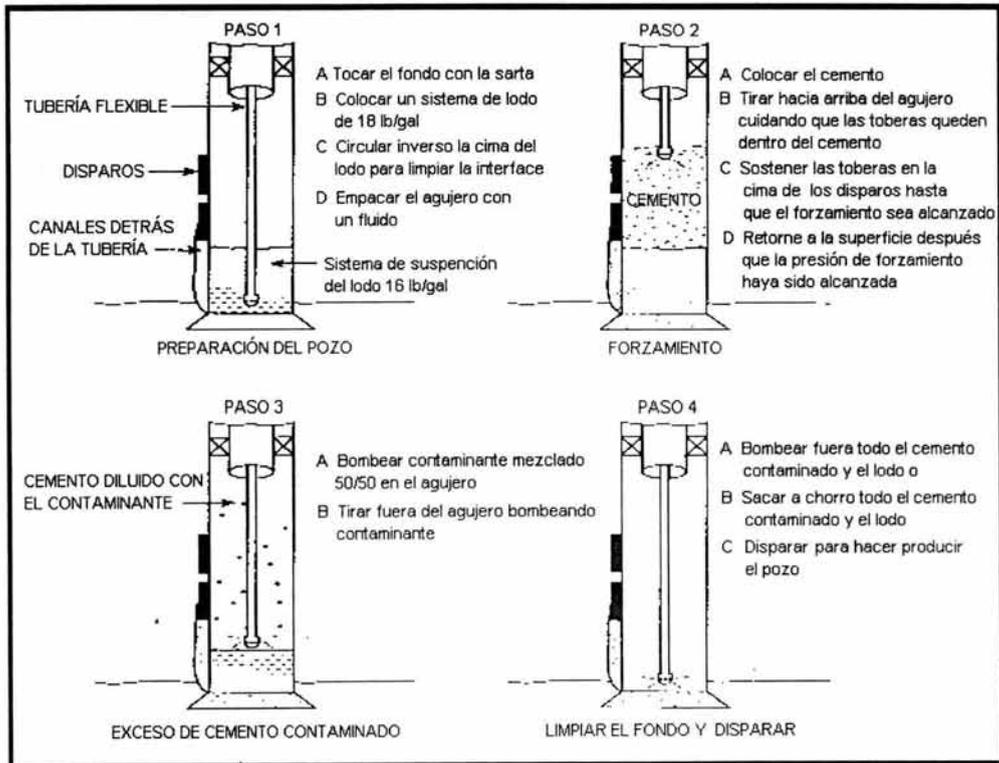


FIGURA I.9. EMPLEO DE LA TUBERÍA FLEXIBLE

La migración del agua a través de la permeabilidad vertical para la producción de aceite puede ser controlada por el desplazamiento de grandes cantidades de partículas libres, en solución de baja viscosidad, tal como el silicato de sodio en el espacio poroso, desplazándolo por debajo de la presión de fractura. Esto es solo una medida temporal hasta que el agua migre al rededor del material que se ha forzado. Se ha tenido éxito usando una lechada de cemento-aceite-diesel para forzar el agua. Este material es compuesto principalmente por aceite, diesel y cemento, no fraguará hasta que sea puesto en contacto con agua. Solo la zona conductora de agua será cementada, mientras que en la zona productora de aceite la lechada continuará sin fraguar dentro del pozo. Desafortunadamente después de producir en el intervalo de aceite el agua podría saturar esta zona de tal forma que sería necesario repetir un forzamiento en la zona productora de agua. Un definido contacto agua/aceite aparece como la condición más necesaria para aplicar la cementación forzada en todo el intervalo disparado y disparar en una nueva zona seleccionada.

I.4.3 DISMINUIR LA RGA (RELACIÓN GAS-ACEITE)

En la vida de un pozo, la RGA llega a un límite económico debido a su alta producción de gas, por lo que es necesaria una reparación. Esto se ilustra en la figura I.10. El procedimiento más usado es aplicar cementación forzada en todos los disparos de las zonas de aceite y gas y disparar en otra zona seleccionada.

I.4.4 REPARAR UNA ROTURA O FUGA EN LA TR.

La cementación forzada también se aplica para reparar defectos de la TR. Si se efectúa una operación de forzamiento, esta será similar a colocar un tapón de cemento con la tubería de perforación o de producción, abierta en su extremo inferior. El volumen de cemento se desplaza a la profundidad indicada y se eleva la sarta de trabajo sobre el volumen de cemento colocado, y se aplica la presión de trabajo, tomando en cuenta que no se rebasa la presión de fractura de la formación. La reparación en la TR por una fuga de sobrepresión accidental es un trabajo de forzamiento difícil de aplicar. Si la fuga es de 3 a 4 pies de longitud (figura I.11). En primer lugar se determina la localización y amplitud de la fuga. Se requiere la localización para que sea aislada correctamente la zona para el forzamiento y la amplitud indicará el tipo de lechada a utilizar. Para una fuga con longitud menor a 1 pie de

longitud, la misma técnica para forzar las cavidades de los disparos puede ser aplicada, usando una presión de forzamiento baja y un moderado control de la pérdida de fluido. Si la rotura excede los 10 pies, entonces la operación se aplica como si existiera un largo intervalo de perforaciones. Se debe procurar un mayor volumen de lechada con una baja pérdida de fluido, el propósito es colocar tanto cemento en la fuga como sea posible sin que exista una deshidratación prematura, se debe evitar el fracturamiento de la formación. Existen ocasiones en que la longitud de la fractura aumenta cuando se aplican presiones de forzamiento muy altas. Al presentarse una rotura en una TR nueva, una opción diferente sería colocar un parche.

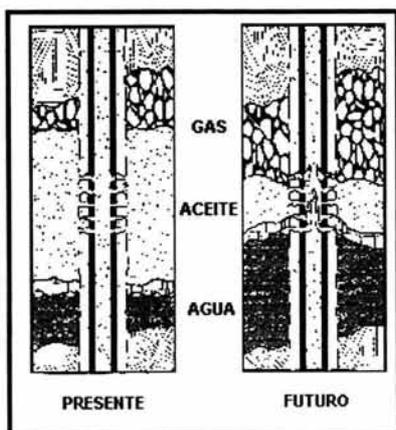


FIGURA I.10 DISMINUCIÓN DE LA RGA

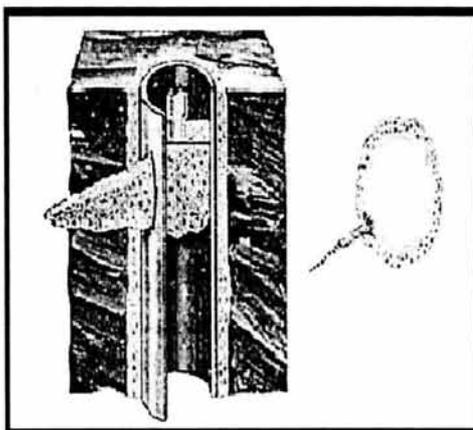


FIGURA I.11 REPARACIÓN DE FUGA EN LA TR

I.4.5. ABANDONO DE ZONAS NO PRODUCTIVAS O AGOTADAS.

Taponar una zona agotada es un trabajo de reparación. La inyección de la lechada es usualmente realizada por medio de una herramienta de forzamiento (empacador o retenedor), por debajo de la presión de fractura de la formación (forzamiento a baja presión). Si una zona es considerada no comercial, esta es aislada o abandonada usando la colocación de una herramienta permanente (molible), ver figura I.12. El tapón puede ser colocado a conveniencia para que nuevos intervalos puedan ser abiertos encima del intervalo agotado. Puede haber problemas si sobre las perforaciones repentinamente comienza a producir agua o si un tratamiento de estimulación no responde de la manera esperada.

Comúnmente para abandonar un intervalo, se coloca un empacador permanente utilizando una lechada de baja pérdida de filtrado y forzar las perforaciones con una presión menor a la presión de fractura de la formación, ya que una fractura inducida podría alcanzar el nuevo intervalo productor y sería necesario otro trabajo de forzamiento.

Después de la colocación del cemento, la sarta se desprende del empacador y se levanta aproximadamente 10 pies por encima de este. Se circula el fluido del pozo a la inversa y el agujero es limpiado en ese punto. En años recientes, las operaciones son hechas con unidades de tubería flexible, ya que resulta más económico.

I.4.6 CORREGIR UN TRABAJO DE CEMENTACION PRIMARIA.

En ocasiones un llenado adicional arriba de la cementación primaria es diseñado para complementar una zona arriba de la cementación primaria. Una zona de baja presión podría tomar parte de la lechada por que el peso de la columna hidrostática es excesivo, o la zona puede causar una completa pérdida de circulación. En otras ocasiones el cemento no cubrió completamente la zona de interés. Quizá la causa para una baja cima del cemento es que el lavado del cemento resultó excesivo. La compensación más común para este caso es usar un exceso de cemento en la cementación primaria. Hay dos métodos comunes para llevar a cabo el trabajo de cementación: (1) Un tapón podría ser usado en la TR para desplazar el cemento hasta los disparos o (2) Un empacador colocado sobre la cima de los disparos. (Figura I.13). La TR puede ser cementada por disparos realizados a la altura de la cima del cemento primario, bombeando la lechada a través de estos disparos y a la profundidad deseada. Esta operación es similar a un trabajo de cementación primaria involucrando solo la circulación de la lechada. Esta operación debe efectuarse por debajo de la presión de fractura de la formación.

La cementación primaria puede ser deficiente por algunos factores como:

- Pérdida de circulación ocurrida durante la cementación
- Se desconoce con precisión el volumen del agujero
- Hay derrumbes considerables

Cuando se lleva a cabo la recementación a través de los disparos con el segundo método, un empacador molible es colocado 20 pies por arriba de las perforaciones. La cementación se lleva a cabo por la TP después que un buen volumen de fluidos es bombeado para remover los fluidos de perforación en el espacio anular. La ventaja de este método sobre el método de tapón, es una retención del cemento en el empacador teniendo este una válvula de contra flujo. La desventaja es que el empacador tendría que ser molido si se encuentra la zona productora.

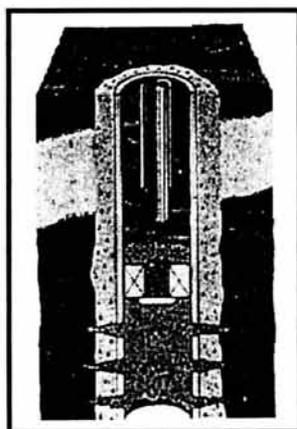


FIGURA I.12 ABANDONO DE UN INTERVALO

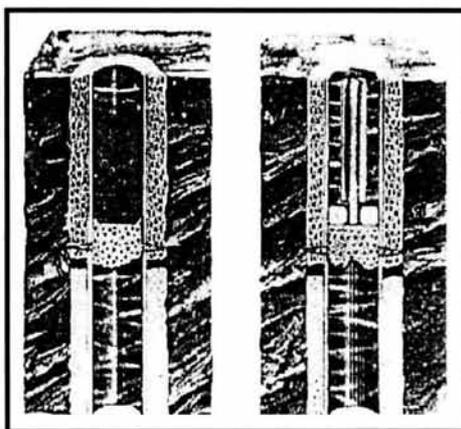


FIGURA I.13 CORRECCIÓN DE TRABAJOS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA

I.4.7 MODIFICAR PERFILES DE INYECCION

La cementación forzada también se utiliza exitosamente para modificar perfiles de inyección en pozos de inyección de agua. La práctica común es cementar todos los disparos y redisparar en un nuevo intervalo.

I.4.8 CEMENTACIÓN PARA BLOQUEO

Este método sirve para prevenir la migración de fluidos por debajo y por encima de la formación productora. Se debe disparar la sección permeable debajo de la formación productora y después cementarla, y se hace lo mismo con la formación superior permeable, luego se perforan los tapones y se dispara el intervalo productora. Este método ha tenido éxito

en muchos casos para evitar la conificación de agua. (Figura I.14), una baja presión de forzamiento debe utilizarse para no exceder la presión de fractura de la formación.

I.4.9 CEMENTACION FORZADA EN LA CIMA DE UNA TR CORTA (LINER)

Las TR cortas (liners) son difíciles de cementar por diferentes causas como: (1) un espacio anular reducido, (2) pobre centralización, (3) pobre reología, (4) pequeñas cantidades de cemento son fácilmente contaminadas por el lodo, (5) el gas puede filtrarse y dañar el cemento antes de su fraguado.

Si la fuga es a través de la cabeza del liner, una cementación correctiva puede ser ejecutada. La fuga puede ser tan grande para aceptar cemento; por lo tanto, el procedimiento es el mismo que al forzar unos disparos en la TR. Se usa normalmente un empacador recuperable

Si no se obtiene un buen resultado, la TR se dispara en otro lugar estratégico y la operación de forzamiento es repetida. Un empacador molible se puede colocar en el liner, o un empacador recuperable se coloca arriba del liner (Figura I.15).

I.4.10 CEMENTACIÓN EN ZONAS FRACTURADAS

En la inyección a presión de formaciones de caliza o dolomitas fracturadas debe ponerse mayor énfasis en sellar efectivamente las fracturas o sistemas de canales. Es necesario modificar el diseño de la lechada con respecto a lo usado en areniscas permeables, en las cuales el principal interés es el comportamiento de la lechada en los disparos y la formación. En la cementación de formaciones de carbonatos fracturados es más importante que el cemento llene las fracturas o sistemas de canales en lugar de que se forme un enjarre y se requieran mayores volúmenes de lechadas que en el caso de areniscas permeables.

La técnica más satisfactoria usa dos tipos de lechada.

1. Una lechada altamente acelerada (de fraguado rápido)
2. Una lechada con moderada pérdida de filtrado.

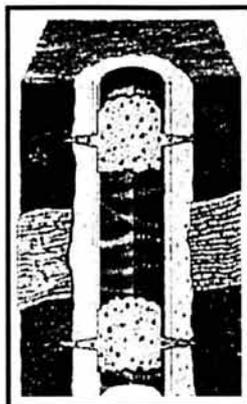


FIGURA I.14 CEMENTACIÓN PARA BLOQUEO

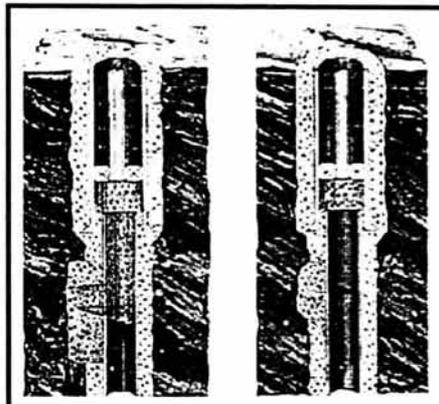


FIGURA I.15 CEMENTACIÓN FORZADA EN LA CIMA DE UN LINER

Las lechadas aceleradas diseñadas para fraguar rápido son bombeadas en áreas de mínima resistencia y mantenidas hasta el fragüe inicial. Una vez que esto ha ocurrido, lechadas con moderada pérdida de filtrado pueden ser forzadas en las fracturas menos accesibles. El primer objetivo en el diseño de las lechadas es que deben tener un fraguado inicial a los 10 o 15 minutos de colocadas en su lugar. El tiempo de bombeo para estas lechadas varía con las condiciones de fondo del pozo y los volúmenes de cemento acelerado varían de 35 a 100 sacos. Debido a la baja permeabilidad de las formaciones de carbonatos, las lechadas con características de moderada pérdida de filtrado dan buenos resultados. En algunos casos una lechada con moderada pérdida de filtrado puede ser usada en primer lugar para llenar las fracturas primarias y los extremos de los canales. La lechada es seguida por otra de alta resistencia que lleva aditivos de bloqueo.

I.4.11 AGUJEROS DE CORROSIÓN.

Si la TR tiene fisuras a causa de la corrosión lo primero es localizarlas (figura I.16) la naturaleza del problema sería definir la localización física, si los agujeros son adyacentes a una zona corroida por agua o alguna otra sección corroida conocida. La técnica de forzamiento debe ser similar a un trabajo de obturar un gran intervalo disparado, con el uso de un cemento con baja pérdida de fluido a una baja presión de operación. Casi siempre se obtiene buenos resultados en las operaciones de cementación, pero rápidamente son

desarrollados otros agujeros por corrosión en otros lugares. Este problema podría ser tal que sería necesario cambiar el liner o la sarta completa de TR.

Si el agujero de corrosión es en una TR no cementada, se aplica el mismo procedimiento de recementación. El método del tapón es probablemente el mejor sólo que no es posible colocar un retenedor en la tubería que puede presentar alta corrosión. La fuga podría presentarse en la tubería o en el empacador que no se anclaría adecuadamente por el adelgazamiento de la tubería.

Si la falla en la TR es resultado de pequeños agujeros, estos usualmente no aceptarán fluido lo suficientemente rápido para ser forzados. Los agujeros pueden ser lo suficientemente pequeños para causar un enjarre de cemento prematuro dentro de la TR sin llenar el vacío detrás de esta. La única alternativa es disparar cerca de la falla y forzar.

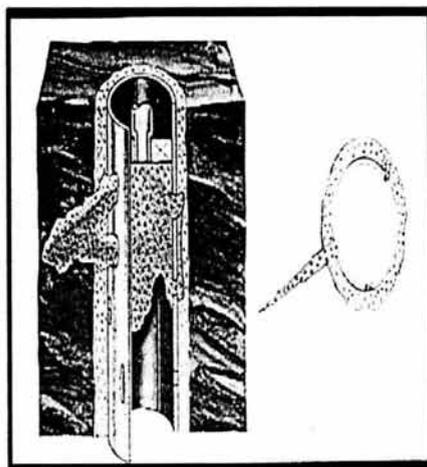


FIGURA I.16 CEMENTACIÓN DE AGUJEROS DE CORROSIÓN

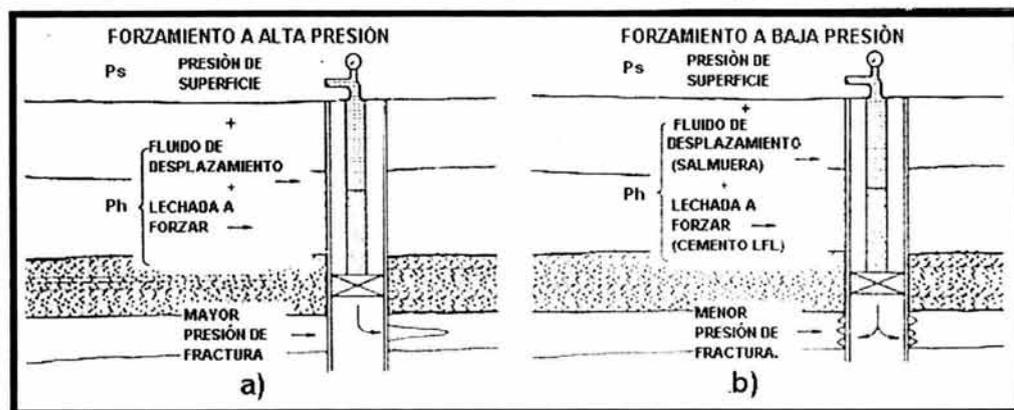
I.5 CONCEPTOS DE LA CEMENTACIÓN FORZADA

I.5.1 PRESIÓN DE FORZAMIENTO.

Los objetivos de una cementación forzada están usualmente definidos por los requerimientos de presión. La técnica de **Alta Presión** (Fig. I.17a) emplea la presión de ruptura de la formación y el bombeo de la lechada o el filtrado del cemento en la formación, hasta alcanzar en superficie un valor determinado de presión que debe ser mantenida sin retorno. La técnica de **Baja Presión** (Fig. I.17b) involucra colocar la lechada en el intervalo a tratar con la aplicación de una presión suficiente para formar un enjarre de cemento deshidratado en los disparos, canales o fracturas que puedan estar abiertas.

I.5.2 BLOQUE A PRESIÓN

Consiste en disparar arriba y abajo de la zona productora e inyectar el cemento a través de los disparos. Es usado para aislar las zonas productoras antes de la terminación del pozo. La técnica normalmente consiste en disparar arriba y abajo de la zona productora, inyectar el cemento por los disparos y perforar los dos tapones de cemento. (Fig. I.18)



FIGURAS I.17 a y I.17 b. FORZAMIENTO A ALTA Y BAJA PRESIÓN

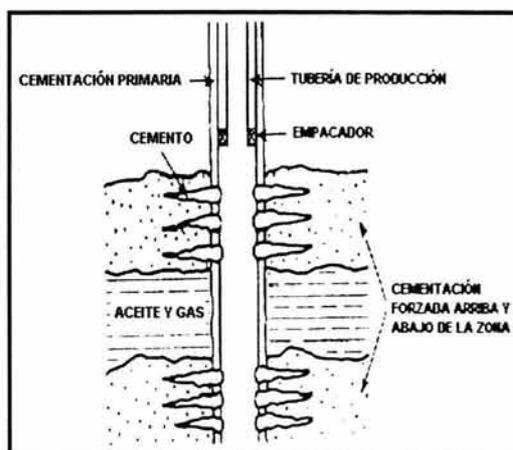


FIGURA I.18. BLOQUE A PRESIÓN

I.5.3 PRESIÓN DE FRACTURA.

Es la fuerza por unidad de área necesaria para vencer la presión de formación y la resistencia que ofrece una formación a su fracturamiento depende de la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de compresión a los que está sometida. La densidad es una propiedad muy importante para el fluido de control y se deben considerar varios parámetros para seleccionarlo, como son la profundidad y el gradiente de fractura, los cuales se toman en cuenta para determinar la presión hidrostática que ejercerá el control sobre la presión de formación.

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

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

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

$$M = (S - P) K$$

Donde:

M = esfuerzo de la matriz de la roca.

S = presión de la sobrecarga.

P = presión de la formación.

K = relación de esfuerzos.

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

$$P. F. = P + (S - P)$$

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

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

$$P. F. = G. F. * D$$

Donde:

P. F. = presión de fractura (lb/pg²).

G. F. = gradiente de fractura (lb/pg²/pie)

D = profundidad (pies).

I.5.4 PRESIÓN DE FORMACIÓN.

Fuerza por unidad de área ejercida por los fluidos contenidos en una formación, registrada a la profundidad de la misma estando el pozo cerrado y estabilizado. Esta presión puede ser

medida con una herramienta llamada registrador de presión la cual es bajada con unidad de cable de acero. Esta presión también se conoce como presión de yacimiento o presión de fondo estática.

1.5.5 PRESIÓN DE SOBRECARGA.

Presión ejercida sobre una capa o estrato considerado, debido a la acumulación del peso de los minerales que componen los sedimentos suprayacentes mas el peso de los fluidos contenidos en los espacios porosos; y se expresa como el producto de la densidad promedio de la roca por la profundidad dependiendo de su valor de:

- 1.- Densidad de la roca.
- 2.- Porosidad de la masa rocosa.
- 3.- Densidad promedio de los fluidos contenidos en el espacio poroso

Dicha expresión se incrementa con la profundidad y se expresa como:

$$S = (W_{\text{matriz rocosa}} + W_{\text{fluidos}}) / \text{Area}$$

$$S/D = 0.052 (1 - \phi) \rho_m + 0.052\phi\rho_f$$

La ecuación anterior da como resultado la variación de la presión contra la profundidad en pies, donde:

ϕ = porosidad (adimensional)

ρ_m = densidad de la matriz

ρ_f = densidad promedio de los fluidos

S/D = gradiente de presión de sobrecarga

1.5.6 GRADIENTE DE FRACTURA.

El gradiente de fractura es el cociente presión/profundidad que define la manera en que varía la presión de fractura al variar la profundidad figura 1.19. A partir de datos obtenidos de

algunas cementaciones forzadas donde se haya efectuado fracturamiento de la formación, se puede estimar en el campo el gradiente de fractura, adicionando la presión de superficie observada al suspender instantáneamente el bombeo, presión de cierre instantánea P_{ci} , con la presión hidrostática debido al fluido en el pozo P_h , dividiendo entre la profundidad de la formación D , es decir:

$$G.F. = (P_{ci} + P_h) / D$$

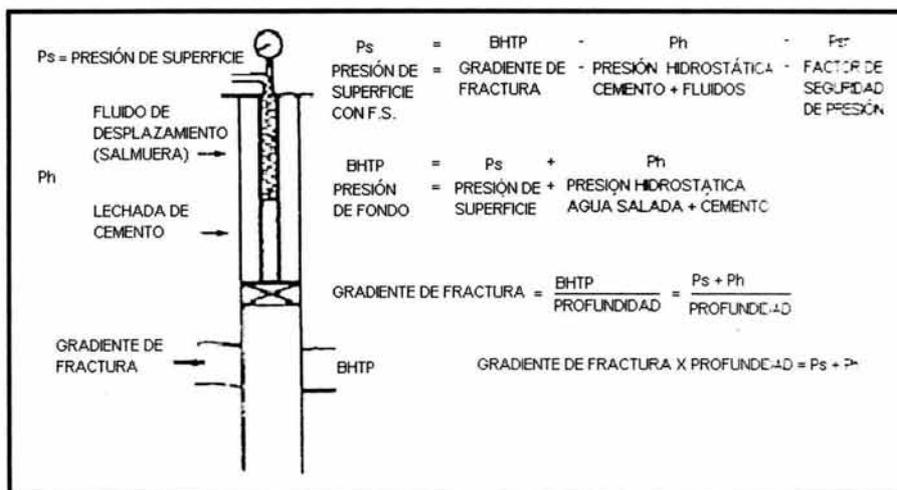


FIGURA I.19 GRADIENTE DE FRACTURA

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

I.5.7 PRESION DE CEMENTACION DE FONDO.

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

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h - P_f$$

Donde:

P_{tr} = Presión de cementación de fondo

P_{wh} = Presión de la cabeza del pozo o Presión superficial aplicada por las Bombas.

P_h = Presión hidrostática

P_f = Pérdidas por fricción

*Todas expresadas en unidades consistentes, ejemplo (lb/pg²).

En cementaciones forzadas, debido a que las pérdidas por fricción son relativamente bajas generalmente se desprecia en los cálculos. La ecuación anterior se convierte en:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h$$

Antes para la cementación forzada, debe construirse una gráfica, mostrando la presión de fondo como una función del volumen acumulado inyectado para controlar el trabajo (Figura I.20). Las presiones de fondo reflejan el cambio en los gradientes de fluido como el fluido de lavado (para determinar presión de fondo), cemento y fluidos de desplazamiento, los cuales son bombeados dentro y a través de la tubería.

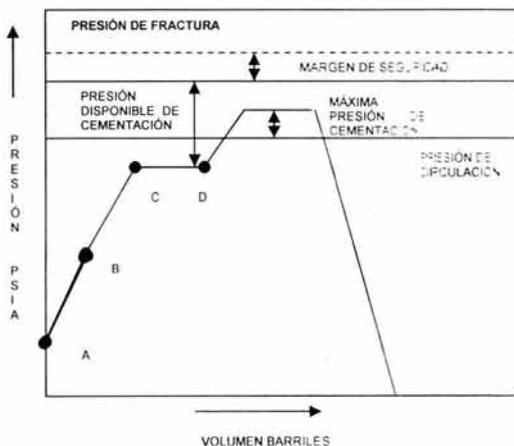


FIGURA I.20. PRESIONES DE CEMENTACIÓN EN EL FONDO DEL POZO

Ejemplo: en un pozo (8000 ft) se va a realizar una cementación forzada usando 60 sacos de cemento clase H con aditivos. Se planea emplear 10 barriles de agua salada (salmuera) con densidad 9.0 lb / gal como fluido lavador.

Datos:

- Tubería de revestimiento: 5 ½ pg, 17 lb/pie, 0.0232 bl/pie, 13.01 pie/bl.
- Tubería de producción: 2 7/8 pg, 6.5 lb/pie, 0.00579 bl/pie, 172.72 pies/bl.
- Disparos: 7990 a 8015 pies.
- Vol. de lechada: 1.18 pies³/saco.
- Densidad de la lechada: 15.6 lb/gal.
- Fluido de desplazamiento: agua limpia 8.33 lb/gal.
- Gradiente de fractura: 0.75 lb/pg²/pie
- Cementador colocado a 7960 pies

La figura I.20, representa la presión de tratamiento del fondo contra los volúmenes acumulativos inyectados. El pozo está lleno con agua. El programa de inyección sería:

1. Desplazar 10 barriles de agua salada de densidad 9.0 lb/gal.
2. Mezclar y bombear 60 sacos de cemento dentro de la tubería.
3. Desplazar el agua de lavado hacia el extremo de la tubería.
4. Anclar el cementador.
5. inyectar el bache de agua salada y el cemento, con agua dulce (8.33 lb/gal)

NOTA: Se usarán las siguientes abreviaturas:

Ws = Agua salada.

Wf = Agua dulce.

cmt = Cemento.

La presión mostrada en el punto A es la presión de fondo cuando el agujero está lleno de agua dulce.

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h; (P_{wh} = 0)$$

$$= P_{wh} + (0.433 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}) \times 8000 \text{ pies.}$$

$P_{tr} = 3461 \text{ lb/pg}^2$. = Presión hidrostática de la columna de agua en el punto B, después de que fueron bombeados 10 barriles de agua salada dentro de la tubería, la presión de fondo es ahora la suma de la presión hidrostática de la columna de agua salada y la presión hidrostática de la columna de agua dulce.

La columna de agua salada es 10 barriles por 172.72 pies/bl = 1727.2 pies.

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h; (P_{wh} = 0)$$

$$= (P_h) W_s + (P_h) W_f$$

$$= 0.052 (9.0 \text{ lb/gal}) (1727.2 \text{ pies}) + 0.052 (8.3 \text{ lb/gal}) (7960 - 1727.2)$$

$$P_{tr} = 3498.4 \text{ lb/pg}^2;$$

Punto B = presión hidrostática de las 2 columnas de agua.

Cuando el cemento se mezcla y se bombea, la presión de fondo se incrementará, 60 sacos de cemento dan un volumen de 12.5 bls (60 sacos x 1.18 pies³/saco x 0.178 bls/pie³) y de una columna de 2176.2 pies dentro de la tubería de 2 7/8 de pulgada (12.6 bl x 172.72 pies/bl). La presión en el punto C es:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h; (P_{wh} = 0)$$

$$= (P_h) W_s + (P_h) c_{mt} + (P_h) W_f$$

$$P_{tr} = 0.052 (9.0) (1727.2) + 0.052 (15.6)(2176.2) + 0.052 (8.33)(8000 - 1727.2 - 2176.2)$$

$$P_{tr} = 4348 \text{ lb/pg}^2, \text{ Punto C.}$$

NOTA: Si en este trabajo se usara tubería de 2 3/8 pg, la presión en el punto C sería de 5795 lb/pg². Si en esta zona de 8000 pies tuviera un gradiente de fractura de 0.7 psi/pie, la presión de fractura de 5600 lb/pg² habría sido excedida por la presión hidrostática.

La presión de fractura de 6000 lb/pg² (0.75 lb/pg²/pie x 8000 pies) se muestra en la gráfica.

En el punto C, cuando el agua salada está en el extremo de la tubería, la presión superficial disponible para la operación es:

$$\begin{aligned} P_{wh} &= P_{tr} - P_h \text{ (se indica como margen de seguridad } 300 \text{ lb/pg}^2\text{)} \\ &= 6000 - 4348 - 300 \\ P_{wh} &= 1352 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

La presión superficial no debe exceder las 1352 lb/pg² bombeando 10 bls adicionales de agua, se desplazará el cemento hacia las perforaciones. El volumen del agujero debajo del cementador en el fondo del intervalo disparado es 1.3 bls (55 pies x 0.0232 bl/pie). El volumen de cemento usado para forzar será igual a esa cantidad mas un volumen adicional que representa la cantidad requerida para llenar las perforaciones y aquella cantidad de cemento que se contamina y se corta por el agua con sal, hasta el punto que puede ser bombeada dentro de la formación.

I.5.8 PRESION DE INYECCION SUPERFICIAL

La presión de inyección superficial se observa cuando la formación después de romperse empieza a admitir fluidos entonces es la presión de bombeo registrada en la superficie mediante la cual se forza el cemento a la formación.

La presión de inyección es el promedio de las observadas durante la inyección de la lechada, antes de alcanzar la presión máxima.

I.5.9 PRESION MAXIMA

La presión máxima se registra en la superficie al alcanzar la mayor lectura de presión en el manómetro cuando finaliza la inyección de la lechada de cemento dentro de la formación.

Es importante pensar como está reaccionando el pozo. La actividad del trabajo deberá regirse por las presiones superficiales, considerando siempre lo que está sucediendo en el fondo del pozo. La presión máxima debe pre-establecerse por medio de un estudio que tome en cuenta las condiciones del pozo, recordando que el objetivo es el de construir una capa

de cemento frente al intervalo y no el de alcanzar altas presiones que puedan fracturar la formación.

I.5.10 PRESION FINAL

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

I.5.11 PRESION HIDROSTATICA

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

$$P_h = D \times \rho_f / 10$$

Donde:

P_h = Presión hidrostática (kg/cm^2)

D = Profundidad (m)

ρ_f = Densidad del fluido (gr/cm^3)

I.5.12 PRESION DE CIERRE INSTANTANEA

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

I.5.13 TIEMPO DE ESPERA (WOC).

Es el tiempo de espera para el fraguado del cemento una vez finalizada la operación, debe ser gobernado por la resistencia requerida del cemento colocado. El cemento debe tener la suficiente resistencia para soportar los golpes durante la perforación, resistir el flujo de los

fluidos en el fondo del pozo y aislar el intervalo productor durante una operación de fracturamiento.

En práctica de campo, la espera por un periodo de 4 a 12 horas es lo común entre tratamientos de forzamiento o después de que la presión final de forzamiento ha sido alcanzada. Una vez en su lugar, el enjarre de cemento deshidratado, desarrollará una resistencia rápidamente.

El enjarre de cemento deshidratado, desarrollará una resistencia a los esfuerzos de varios cientos de libras durante las primeras 8 horas. Limpiar o fluir entre etapas, puede dañar las zonas forzadas si ellas son lavadas o se provocan disturbios dentro de las primeras 4 horas después del forzamiento.

I.5.14 DESHIDRATACION DEL CEMENTO.

Una lechada de cemento está compuesta básicamente de partículas de cemento y agua. Cuando dichas partículas son demasiado grandes para penetrar en los poros de la formación permeable, estas son separadas del agua por una presión diferencial. Esto es llamado deshidratación. En la deshidratación el agua es forzada de la lechada de cemento y se forma un enjarre de partículas sólidas en la cara de la formación. Si se ejerce una presión de forzamiento de fondo excesiva la formación se fracturará y parte de la lechada será forzada el interior de las fracturas durante el forzamiento.

I.6 REQUERIMIENTOS DE UNA CEMENTACION FORZADA.

Muchos trabajos se definen por la presión requerida para obtener un sello. La técnica de alta presión (figura I.17.a) utiliza agua salada para determinar la presión de ruptura de la formación. El lodo no se debe usar como fluido fracturante por que puede tapar o dañar la formación. Después de la rotura, una lechada de cemento y agua es colocada cerca de la formación y bombeada a bajos gastos. A medida que el bombeo continúa, la presión de inyección comienza a subir hasta que la presión de superficie indica que se ha producido ya sea la deshidratación del cemento o la penetración de la lechada. La presión es momentáneamente mantenida sobre la formación para verificar las condiciones estáticas y

luego es liberada para determinar si el cemento se mantiene en el lugar. El exceso de lechada debe ser regresado. Si la presión de forzamiento deseada no es obtenida, se emplea el método de "hesitación" o de etapas (bombeo intermitente). Este método involucra mezclar un volumen de cemento (30 a 100 sacos), bombearlos a la formación, esperar hasta que está cercano al punto en que se inicia el fraguado y repetir la operación tantas veces como sea necesario. La figura I.21 ilustra las etapas y muestra las presiones de superficie.

La técnica a baja presión está considerada como el método más eficiente en base al desarrollo de los aditivos de control de filtración y el uso del empacador recuperable. Con esta técnica se evita la fractura. En el método de etapas, el cemento se coloca en una sola etapa pero con periodos alternados de bombeo y espera. El control de las propiedades de pérdida por filtrado determina que se forme un enjarre contra la formación o dentro de los disparos, mientras que el cemento remanente permanece como un fluido en el interior de la TR (Fig. I.22).

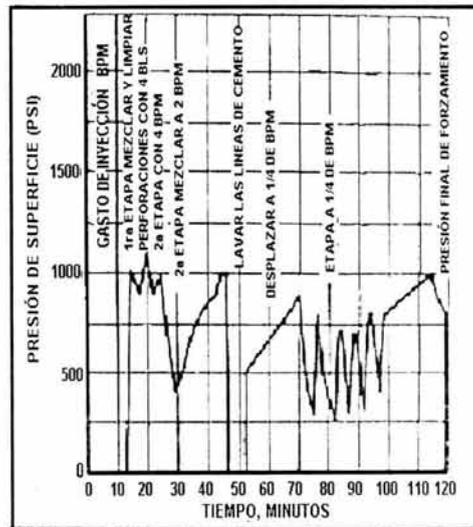


FIGURA I.21. MÉTODO DE ETAPAS

La pérdida de fluido por filtración de las lechadas de cemento puro es muy elevada y se produce una deshidratación en la TR antes que la lechada haya cubierto completamente el

Falta página

N° 42

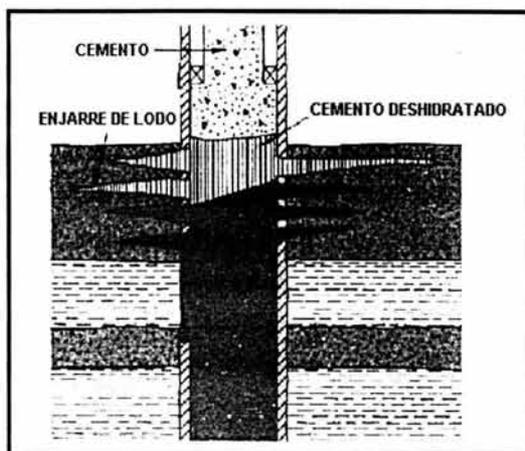


FIGURA I.23 DESHIDRATACIÓN DEL CEMENTO



FIGURA I.24. PÉRDIDAS DE FLUIDO DEL CEMENTO POR FILTRADO

I.7 AMBIENTE.

La lista de la Tabla I.1, contiene los ambientes que deben considerarse al planear una cementación forzada sin considerar las razones para tomar una acción como remedio.

La cementación forzada es uno de los tipos de reparación mas complejos, la cual requiere de bastante estrategia anterior a la operación; si no se comprende perfectamente bien, el

I.8 RECURSOS.

Cuando se efectúa una cementación forzada se pueden usar varios recursos; algunos de ellos se enlistan en la Tabla I.2. Estos se pueden usar al planear la mayoría de las operaciones, pero para cualquier clase de ellas deben tomarse en cuenta estos recursos por su valor intrínscico a ese trabajo en particular. Unos de los principales recursos disponibles, es el cemento con baja pérdida de agua (L-W-L.- LOW WATER LOSS). Estas lechadas de cemento, tienen muchos atributos debido a que existe poco cambio en la relación agua-cemento. Esto origina tiempos de espesamiento más uniformes y una lechada que permanece fluida mientras se bombea, lo que a su vez proporciona:

TABLA I.2 RECURSOS PARA CEMENTACIONES FORZADAS.
<ul style="list-style-type: none"> • Registro de calibración en agujero descubierto. • Registro de inspección de TR. • Registro de adherencia de cemento. • Tubería: Escariadores, rimas y trompos. • Sarta de tubería de prueba. • Máximo diámetro interior posible de la sarta de reparación. • Diseño y selección de la lechada cementante: Baja pérdida de agua, ¿baja densidad? ¿alta temperatura?. • Herramientas (perforables y recuperables). • Fluidos de servicio. • Disparos.

- Menor presión para el desplazamiento.
- Menores problemas por pérdidas de circulación.

Asimismo, con el pequeño cambio en la relación agua-cemento, los volúmenes de llenado y desplazamiento son más confiables. Finalmente, la probabilidad de provocar daño a la formación y el peligro de fraguado instantáneo se reduce al mínimo. En la medida que las restricciones en la presión de fondo lo permitan (presión de fractura), los cementos con baja pérdida de agua permitirán cementaciones forzadas en una sola etapa y con mayores volúmenes.

El cemento puro, se puede utilizar en lugar del cemento L-W-L con las siguientes restricciones:

- La pérdida de agua de la lechada ocasiona un aumento en la viscosidad del cemento, lo que crea presiones mayores de desplazamiento, que a su vez podría fracturar la formación.
- En casos extremos, la pérdida de agua ocasionaría un fraguado instantáneo que, dañaría la formación.

I.9 ASPECTOS TEÓRICOS DE LA CEMENTACIÓN FORZADA.

Sin tener en cuenta la técnica usada durante un trabajo de cementación forzada, la lechada de cemento (una suspensión de sólidos) esta sujeta a una presión diferencial contra una roca permeable. El resultado del fenómeno físico son la filtración, depositación del enjarre y, en algunos casos, fracturamiento de la formación. La lechada, sometida a una presión diferencial, pierde parte de su agua en el medio poroso, y un enjarre de cemento parcialmente deshidratado es formado. El enjarre de cemento, formado contra la formación permeable, tiene una alta permeabilidad inicial (Fig. I.25). En tanto las partículas de cemento son acumuladas, el espesor del enjarre y la resistencia se incrementan; como un resultado, el ritmo de filtración decrece, y la presión requerida para deshidratar la lechada de cemento aumenta posteriormente. El ritmo de filtrado-formación de enjarre es función de cuatro parámetros:

- Permeabilidad de la formación.
- Presión diferencial aplicada.
- Tiempo, y
- Capacidad de la lechada para perder fluido a condiciones de fondo.

Al forzar contra una formación de permeabilidad dada, el ritmo con el cual la hidratación de la lechada disminuye es directamente relacionado al ritmo de pérdida de fluido (Fig. I.26). Al forzar contra formaciones de baja permeabilidad, la lechada con bajo ritmo de pérdida de

fluido se deshidrata lentamente, y la duración de la operación puede ser excesiva. Contra una formación de alta permeabilidad, una lechada con un alto ritmo de pérdida de fluido se deshidrata rápidamente; consecuentemente, el pozo podría llegar a ser obturado por el enjarre. La lechada ideal para el forzamiento debe ser diseñada para controlar el ritmo de formación del enjarre y permitir la construcción de un enjarre uniforme sobre toda la superficie permeable.

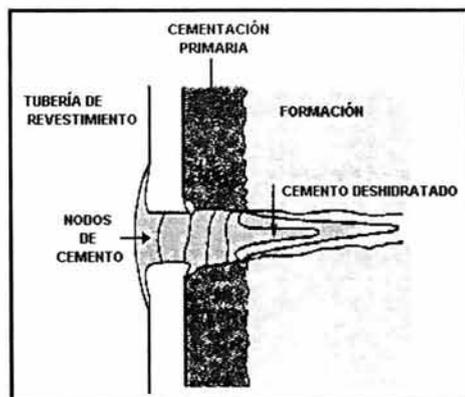


FIGURA I.25. ENJARRE DE CEMENTO

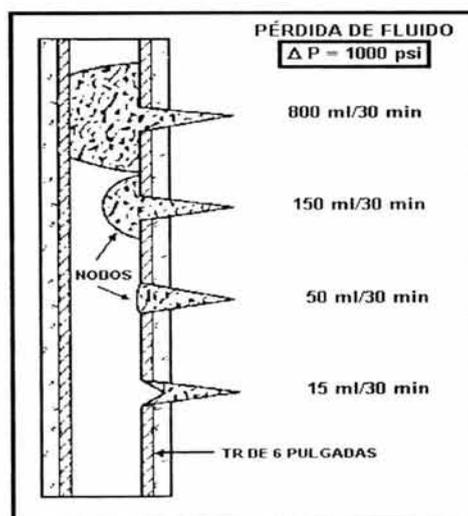


FIGURA I.26. PÉRDIDA DE FLUIDO

Estudio de Binkley, Dumbauld y Collins.

Estos autores desarrollaron la ley de formación de enjarre por una suspensión (tal como una lechada de cemento). Cuando un volumen dQ de filtrado pasa a través del área de superficie plana permeable A , un enjarre de espesor dS y de porosidad ϕ es depositado. Esta relación es ilustrada en las siguientes ecuaciones:

$$dS = \frac{f}{1-f-\phi} x \frac{dQ}{A} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

f = fracción por volumen de sólidos en suspensión, o

$$f = \frac{V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{sólidos}} + V_{\text{líquidos}}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{la relación } w = \frac{f}{1-f-\phi} \dots\dots\dots(3)$$

w = "constante de depositación".

La "Ley de formación del enjarre" puede ser escrita:

$$\frac{dS}{dt} = wq \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

q = ritmo de flujo del filtrado por unidad de área de superficie.

$\frac{dS}{dt}$ = ritmo de construcción del espesor del enjarre.

Asumiendo que la caída de presión a través de la superficie de filtración es despreciable. Binkley aplico la Ley de Darcy para el flujo del filtrado a través del enjarre, estableciendo la siguiente ecuación:

1. Desarrollo de un enjarre como una función del tiempo de filtración.

$$S = \sqrt{\frac{2 kw \Delta P}{\mu}} t^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

k = permeabilidad del enjarre (constante).

μ = viscosidad del filtrado, y

ΔP = presión diferencial.

w = constante de depositación

t = tiempo de filtración

2. Volumen acumulado del filtrado como una función del tiempo de filtración.

$$Q = \sqrt{\frac{2 kA^2 \Delta P}{\mu w}} t^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

3. Permeabilidad del enjarre.

$$k = \frac{\mu Q S}{2At \Delta P} \dots\dots\dots(7)$$

4. Constante de depositación.

$$w = \frac{AS}{Q} \dots\dots\dots(8)$$

5. Llenado de un disparo no fracturado.

Binkey y colaboradores asumieron que la geometría de un disparo es la mostrada en la figura 1.27. La profundidad del disparo es considerada de gran longitud en relación a su diámetro. Asumiendo que la caída de presión en la formación es cero, Binkley y colaboradores demostraron que el tiempo requerido para construir un enjarre puede ser expresado con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\mu}{kw\Delta P} \left(\frac{H^2}{2} + \frac{a^2}{4} + eaH \right) \dots\dots\dots(9)$$

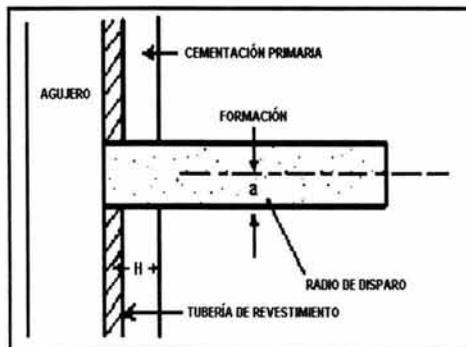


FIGURA 1.27 GEOMETRÍA DE UN DISPARO

Experimentos determinaron el valor de $e = 0.25$. La relación $\frac{\mu}{kw\Delta P}$ contiene todas las variables relacionadas para las propiedades de depositación de la lechada de cemento, y es llamado factor de depositación. Es interesante la relación de profundidad de un disparo contra su diámetro. La profundidad de un disparo tiene un efecto despreciable sobre el proceso de depositación.

6. Depositación de sólidos en el interior de la TR para el llenado de los disparos.

Para simplificar los cálculos Binkley y su equipo asumieron que el nodo construido en el interior de la TR tiene una forma esférica en cada etapa de su crecimiento, y que el desarrollo lateral ocurre a la misma razón con el crecimiento vertical. La geometría es ilustrada en la figura I.28.

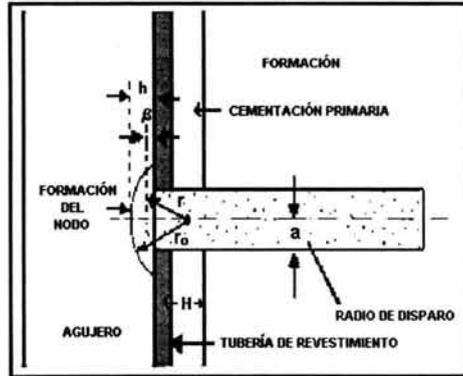


FIGURA I.28 FORMACIÓN DEL NODO EN UN DISPARO

Refiriéndonos a la figura I.28 si h es la altura en el nodo construido dentro de la TR, entonces la ecuación siguiente puede ser derivada.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kw\Delta P}{\mu} \left[\frac{1}{(H + \beta + ea) \frac{r_0^2}{r_1^2} + \frac{r_0^2}{r_1^2} - r_0} \right] \dots(10)$$

Donde:

H = espesor combinado del forro de cemento y de la TR.

a = radio del disparo.

$$\beta = r_1 - \sqrt{r_1^2 - a^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$r_0 = \frac{h^2 + (a+h)^2}{2h} \dots\dots\dots(12)$$

$$r_1 = \sqrt{(r_0 - h)^2 + a^2} \quad , y \dots\dots\dots(13)$$

$$e = 0.25 \dots\dots\dots(14)$$

T = Tiempo de filtración (min.)

$(\mu\text{kw}\Delta p) a^2$ = Factor de composición de la lechada de cemento. (min. / in²)

a = Radio del disparo

H = Longitud de la TR + la cementación Primaria (in)

h = Altura del nodo de cemento (in)

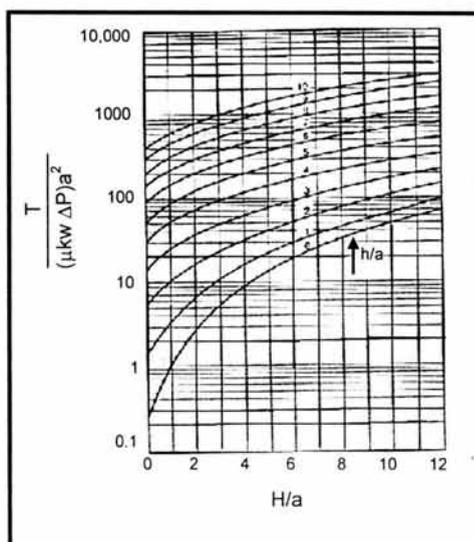


FIGURA 1.29 TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN VS ALTURA DEL NODO

El resultado de la integración numérica de estas ecuaciones complejas ha sido graficado en la figura 1.29, que representa el tiempo requerido para llenar un disparo y construir un nodo vs. La razón H/a, para diferentes alturas de nodo

Estudio de Hook y Ernst.

Hook y Ernst desarrollaron un estudio experimental sobre los efectos de los aditivos para el control de la pérdida de fluidos, la presión diferencial y permeabilidad de la formación y como influyen en el ritmo de construcción del enjarre. Sus conclusiones son presentadas en las tablas I.3, I.4 Y I.5.

La tabla I.3 es una recopilación del comportamiento de la permeabilidad sobre los enjarres los cuales fueron formados con diferentes concentraciones de un aditivo para la pérdida de fluido. La permeabilidad de un enjarre de cemento fue medida siendo de 5 mD aproximadamente – un valor mas bajo que ese se encuentra en formaciones de areniscas productoras. Cuando la lechada contiene suficiente aditivo de pérdida de fluido para reducir el ritmo de pérdida de fluido API a 25 ml/30 min., el resultado es que el enjarre es aproximadamente 1000 veces menos permeable. La tabla I.3 también muestra que la permeabilidad del enjarre y el ritmo de deshidratación de la lechada esta en función de la concentración de aditivos para pérdida de fluidos y que el ritmo de crecimiento del enjarre esta relacionado indirectamente a la permeabilidad del mismo. Los aditivos para la pérdida de fluido reducen la permeabilidad del enjarre; consecuentemente, la cantidad de sólidos los cuales pueden filtrarse fuera de la lechada también se reduce.

Concentración de aditivo para pérdida de fluido(gal/saco)	Pérdida de fluido API a 1000 psi (cm ³ /30 min.)	Permeabilidad del enjarre formado a 1000 psi (mD)	Tiempo para formar un enjarre de 2 pg de espesor (min.)
0.00	1200	5.00	0.2
0.07	600	1.60	0.8
0.13	300	0.54	3.4
0.17	150	0.19	14.0
0.19	100	0.09	30.0
0.22	50	0.009	100.0
0.24	25	0.006	300.0

La tabla I.4 muestra la influencia de la presión de forzamiento sobre el ritmo de crecimiento del enjarre. Primero fue mostrado que variar la presión de forzamiento de 500 a 1000 psi (3.5 a 6.9 Mpa) no influye en la permeabilidad del enjarre resultante. Sin embargo, acoplado con la Ley de Darcy los datos mostraron que el ritmo de flujo de fluido a través del enjarre es directamente proporcional a la presión de forzamiento.

TABLA I.4 EFECTO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL SOBRE LA PERMEABILIDAD DEL ENJARRE Y EL RITMO DE FILTRACIÓN.			
Presión diferencial del enjarre formado (psi).	Permeabilidad del enjarre (mD).	Pérdida de fluido API (cm ³ /30 min.)	Gasto a través del enjarre (cm ³ / min.)
Lechada 1	5.8		
500	6.0	1200	50
1000		1200	110
Lechada 2	1.9		
500	1.6	600	17
1000		600	30
Lechada 3	0.53		
500	0.54	300	4.7
1000		300	9.7
<p>Lechada 1 – Cemento clase A 46 % de agua.</p> <p>Lechada 2 - Cemento clase A 0.5 % de dispersante 0.07 gal/saco de aditivo líquido para la pérdida de fluido. 46 % de agua</p> <p>Lechada 3 - Cemento clase A 0.5 % de dispersante 0.07 gal/saco de aditivo líquido para la pérdida de fluido. 45 % de agua</p> <p>Por medio del incremento de la presión de 500 psi a 1000 psi el ritmo de filtración se incremento a un factor cercano de 2.</p>			

La tabla I.5 muestra el efecto de la permeabilidad de la formación sobre el ritmo de crecimiento del enjarre de cemento. Contra una formación de 30 mD el tiempo requerido para formar un enjarre es aproximadamente el doble que el observado contra una formación de unos 300 mD de permeabilidad. Estos resultados demostraron la importancia de conocer la permeabilidad de la formación antes de diseñar la lechada.

TABLA I.5 TIEMPO REQUERIDO PARA LA FORMACIÓN DE UN ENJARRE DE 1 1/4" EN UNA SUPERFICIE DE FILTRADO DE DIÁMETRO DE 1" A 1000 PSI.			
	Arenisca Bandera (30 mD)	Arenisca Berea (300 mD)	Malla API 325
Lechada 1	6 min.	2.5 min.	2.5 min.
Lechada 2	9 min.	6.5 min.	6.5 min.
Lechada 3	5 min.	2.5 min.	2.5 min.
<p>Lechada 1 – Cemento API clase A 0.5 % de dispersante 0.14 gal/saco aditivo líquido para pérdida de fluido 46 % de agua.</p> <p>Lechada 2 - Cemento API clase A 0.5 % de dispersante 0.17 gal/saco de aditivo líquido para la pérdida de fluido. 46 % de agua</p> <p>Lechada 3 - Cemento API clase A 0.7 % de aditivo sólido para la pérdida de fluido. 46 % de agua</p>			

I.10 TEORIAS ERRONEAS SOBRE CEMENTACIÓN FORZADA.

Existen tres mitos predominantes con respecto a las cementaciones forzadas, que contribuyen a aplicaciones erróneas y procedimientos inadecuados en el campo.

- **Un concepto erróneo** es que todo el cemento entra en la matriz de la formación. Esta concepción errónea lleva a poner más atención en la cantidad de cemento bombeado detrás de la tubería y la presión aplicada, cuando realmente estos factores afectan muy poco los resultados de la cementación. La verdad es que en operaciones de baja presión es el filtrado del cemento (y no todo el cemento) el que entra en la formación

(Figura I.30). Cuando la formación es fracturada, entonces sí el cemento penetra en la fractura producida.

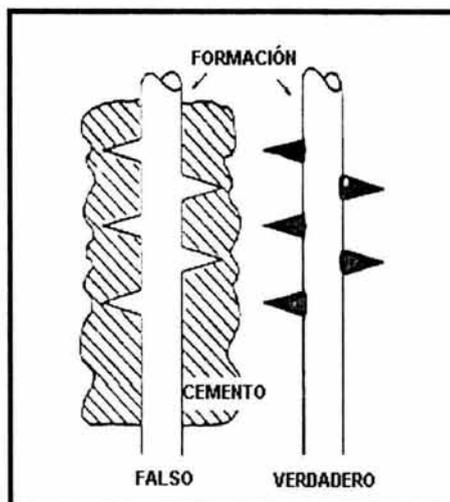


FIGURA I.30 PENETRACIÓN DEL CEMENTO EN LA FORMACIÓN

- **Otra suposición** frecuentemente hecha, es que todos los disparos están abiertos para la cementación forzada o que todos los disparos son forzados a abrir por el proceso de ruptura al inyectar solo lodo. Lo real es que los disparos casi nunca están abiertos y para que puedan recibir fluidos se requiere de un esfuerzo considerable (Figura I.31). El enjarre es capaz de resistir grandes presiones diferenciales, especialmente en la dirección del disparo. Muchos fracasos en una cementación son atribuidos a limpiezas subsiguientes de los disparos. Además se tiene el concepto de que el fracaso en las tareas de cementación forzada es debido a altos esfuerzos compresivos, bajo tiempo de fraguado, altas presiones forzadas, y demasiados aditivos en el cemento, cuando en realidad el problema son los disparos taponados.
- **Un tercer tropiezo** es pensar que se forma un sello o cuña horizontal de cemento alrededor del agujero. Los resultados más bien indican que como no todo el cemento entra en la formación, el filtrado lo hace a través de los disparos. Cuando la formación es fracturada, la lechada de cemento puede entrar en una serie de cuñas irregulares

(Figura I.32). La orientación de estas fracturas dependen de la compresión de la zona a ser tratada, en muchas oportunidades es de NE a SE.

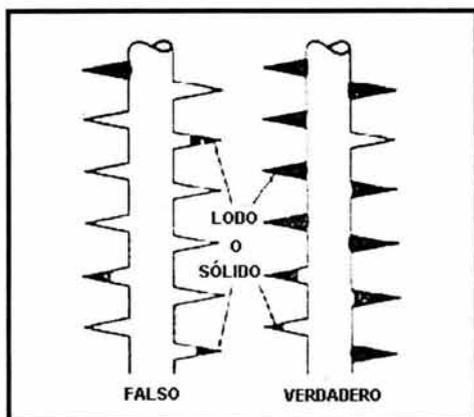


FIGURA I.31 FORZAMIENTO DE LA FORMACIÓN

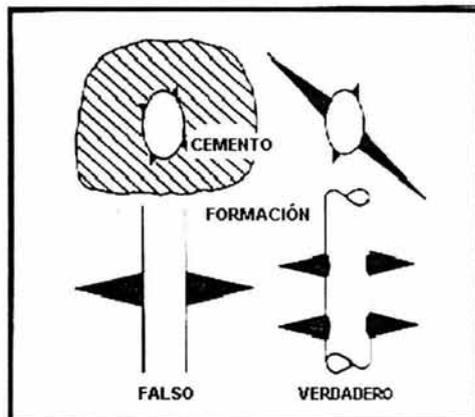


FIGURA I.32 PENETRACIÓN DE LA LECHADA EN UNA FORMACIÓN FRACTURADA

I.11 RAZONES DEL FRACASO DE UNA CEMENTACION FORZADA

En ocasiones un trabajo de cementación forzada falla por no conocer los objetivos, una minuciosa investigación puede conducirse para analizar el trabajo, comprender por que una falla ocurre y proceder a diseñar el tratamiento subsecuente.

I.11.1 CONCEPTOS ERRÓNEOS.

- La lechada de cemento penetra los poros de la roca.

Solo la mezcla de agua y la substancias disueltas penetran los poros, mientras que los sólidos se acumulan en la cara de la formación y forman el enjarre. Las formaciones requerirían una alta permeabilidad de 100 darcies para que los granos del cemento penetren la matriz de la arena. La única forma para que una lechada penetre a la formación es a través de fracturas y largos agujeros (vugulares).

- **Alta presión es necesaria para obtener un buen forzamiento.**

Si la presión de fractura de la formación es excedida, el control sobre la colocación de la lechada se pierde, y la lechada entra en zonas no deseadas. La alta presión puede perjudicar en lugar de ayudar en la colocación de la lechada en todas las zonas deseadas. Una vez creada una fractura podría extenderse a través de varias zonas, y abrir canales de comunicación indeseables entre zonas aisladas previamente.

I.11.2 DISPAROS TAPONADOS.

Otro concepto erróneo común en la cementación forzada y que puede ocasionar un fracaso, es que todos los agujeros de los disparos están abiertos y receptivos de fluido. El filtrado del lodo, el cual es capaz de soportar una gran presión diferencial cuando es aplicado del pozo hacia la formación, fácilmente limpia cuando es sometido a una presión diferencial en la otra dirección. En adición al enjarre, detritos, costras, parafinas, arena de formación, grasa de tubería, herrumbre, pintura, etc., pueden acumularse en los disparos y contribuir al taponamiento. Goodwin (1984) reporta que, en un pozo productor, la cima de los disparos está usualmente abierta cuando los disparos taponados están generalmente encontrados en la zona más baja. Forzar bajo estas condiciones el pozo provocará fallas, llenar todos los disparos con cemento si estos están taponados, permitirá el flujo de fluidos de la formación e indicará que falló el trabajo de cementación forzada.

La limpieza de los disparos antes de un trabajo de forzamiento es un método usual para que estos reciban la mayor cantidad de lechada de cemento que sea posible. Esto puede ser hecho por procedimientos mecánicos o químicos.

La limpieza mecánica de los disparos involucra el uso de una herramienta lavadora. La herramienta lavadora (figura I.33) aísla un pequeño número de disparos por un tiempo. Un fluido lavador es bombeado bajo la tubería de producción, forzando dentro de los disparos, fuera de la TR y a través de los disparos superiores dentro del anular. La herramienta es movida lentamente hacia arriba para cubrir el intervalo disparado. Comúnmente los fluidos de limpieza son químicos lavadores surfactantes, seguidos por un ácido débil cuando escamas o lodo de perforación son removidos. Los solventes son usados cuando se presentan

depósitos de parafinas. La surge tool (figura I.34) es básicamente una cámara de aire entre una válvula superior e inferior. La herramienta es corrida en el agujero con un empacador para aislar el intervalo deseado. Una vez que el empacador es colocado, la válvula inferior es abierta (operada por presión anular), permitiendo que los fluidos entren a la cámara de aire. La rápida despresurización del agujero crea una alta presión diferencial a través de los disparos y provoca la limpieza de los detritos y otros materiales taponantes en ellos. Luego se establece la circulación, la válvula superior es abierta (esto es completado por el movimiento de la TP, presión en TP o fuga por ruptura) y los detritos son circulados fuera del agujero.

La técnica de limpieza por químicos involucra el uso de ácidos y solventes, bombeados adelante de la lechada de cemento como un fluido espaciador para limpiar los disparos.

I.11.3 LOCALIZACION INDEBIDA DEL EMPACADOR

El empacador no debe ser colocado muy arriba de los disparos, la lechada de cemento puede ser contaminada por canalización del lodo o fluido de terminación. Las propiedades de la lechada tales como pérdida de fluido, tiempo de espesamiento y viscosidad son afectadas por contaminación, y los resultados de la colocación de la lechada son alterados. Shryock y Slagle (1968) recomiendan que el empacador se coloque a no más de 75 pies (23 m) arriba de los disparos. Suman y Ellis (1977) recomiendan que el empacador se coloque entre 30 y 60 pies (9 y 18 m) arriba de los disparos. El uso de un fluido espaciador adelante y atrás de la lechada es también recomendado.

I.11.4 ALTA PRESION FINAL DE FORZAMIENTO.

Una alta presión final de forzamiento no garantiza el éxito; por el contrario incrementa la posibilidad de fracturar la formación, y perder el control sobre la colocación de la lechada de cemento. Es importante que se desarrolle la capacidad de imaginar el fondo del pozo por todo el personal involucrado en esta operación.

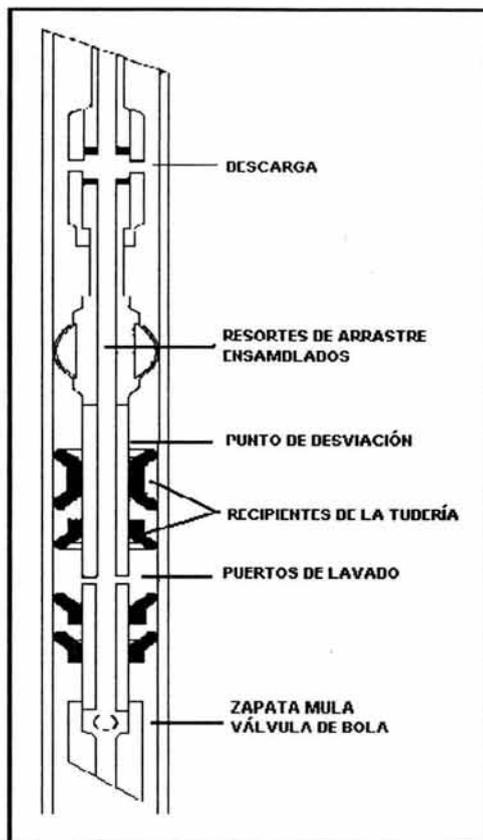


FIGURA 1.33 HERRAMIENTA LAVADORA DE PERFORACIONES

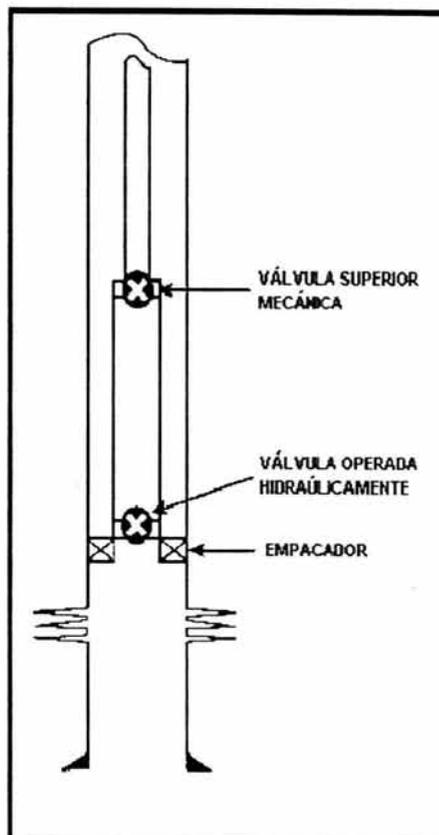


FIGURA 1.34 SURGE TOOL

1.12 PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA REALIZAR UNA CEMENTACION FORZADA.

La siguiente es una lista general que describe una secuencia de eventos durante un trabajo de cementación forzada.

1. Las zonas bajas son aisladas mediante un tapón puente recuperable o móvil.
2. Los disparos son lavados con una herramienta lavadora
3. Se recupera la herramienta con que se lavaron los disparos y si el método del empacador es elegido, es corrido en el agujero con un cable de trabajo. se pone a la profundidad

deseada y se prueba. Una presión de prueba en el anular se de 1000 psi es generalmente suficiente. Si el cemento es puesto frente a los disparos, asegúrese de cubrir completamente la longitud de la zona.

4. Se realiza una prueba de inyección usando agua limpia, libre de sólidos o salmuera esta debe desplazarse por los disparos. Esta prueba nos da una idea de la permeabilidad de la formación y como será el filtrado. El primer volumen de fluido espaciador, seguido por la lechada de cemento son circulados hacia el agujero con la válvula de circulación abierta. Esta circulación se realiza para que no se aporten fluidos dañinos adelante de la lechada a la formación. Una pequeña presión se aplica en el anular para que la lechada libre caiga como resultado de un efecto de tubo en "u". Si el fluido dañino no se ha circulado, la válvula de circulación del empacador se debe cerrar dos o tres barriles antes que la lechada alcance el empacador. Si el cemento se coloca frente de los disparos con el empacador sin colocar, la circulación del cemento se debe detener tan pronto cubra la zona seleccionada. La tubería se saca de la lechada de cemento y el empacador se coloca a la profundidad deseada. La profundidad a la que el empacador va a ser colocado debe elegirse con cuidado. Si la tubería es corrida, la distancia entre los disparos y el empacador, es limitada por la longitud de la tubería debajo del empacador (tail pipe). El empacador no se debe colocar demasiado cerca de los disparos, pues al comunicar la presión a través del anular arriba del empacador, se puede causar un colapso en la TR. Una profundidad de colocación segura debe ser decidida basándose en una evaluación de la calidad del cemento obtenida a través de los registros. En la figura 1.35, el empacador es colocado muy arriba, permitiendo que la lechada de cemento sea contaminada, son estos canales de cemento a través del lodo los que alcanzan los disparos. Shryock y Slagle(1968) recomendaron que el empacador recuperable debe colocarse a nos más de 25 pies ((8 m) arriba de los disparos.
5. La presión de forzamiento se aplica. Si el método de bombeo intermitente es usado con la técnica de alta presión, la formación es fracturada, y la lechada de cemento es bombeada dentro de la fractura antes de que el bombeo intermitente se efectúe. Si es elegida la técnica de forzamiento de baja presión, el bombeo intermitente comienza tan pronto como se coloque el empacador.

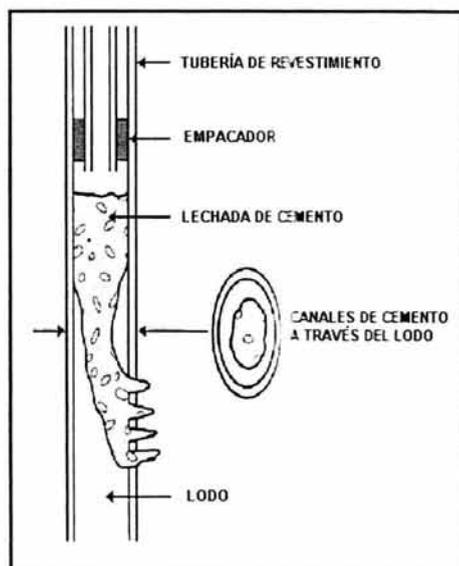


FIGURA I.35 CANALES DE CEMENTO A TRAVÉS DEL LODO

6. Bombeo continuó hasta que no se observe caída de presión. Una presión posterior de aproximadamente 500 psi (3.5 MPa) después de la presión final de inyección indica el fin del proceso de inyección. A menudo, los agujeros bien cementados aceptan una presión mas alta que la presión de fractura, pero el riesgo de una fractura existe si uno intenta verificar esto.
7. La presión es purgada y los retornos son revisados. La válvula de paso del empacador se abre y el exceso de cemento se saca.
8. Las herramientas se recuperan, y se deja el pozo para permitir el fraguado de la lechada en el tiempo recomendado.

La tecnología de la cementación forzada ha mejorado considerablemente a través de los años y aunque todavía presenta algunos problemas los éxitos se incrementan.

A continuación se presentan unas reglas prácticas que deben considerarse y algunas conclusiones que concuerdan con la experiencia actual. Los siguientes son aspectos a considerar en una cementación forzada:

1. La mayor parte de las cementaciones forzadas utilizan control de filtración para mantener fluidez y reducir la deshidratación prematura de la lechada durante el bombeo
2. Las altas presiones de forzamiento que antes eran consideradas esenciales para el éxito, son actualmente consideradas indeseables cuando se usa cementación con filtración controlada.
3. Si ocurre el fracturamiento de la formación antes o durante la operación de forzamiento, grandes volúmenes de lechada pueden ser bombeados antes que se produzca el fraguado.
4. La técnica de bajo filtrado nos da un mejor control de flujo del cemento en pequeños canales o huecos atrás de la tubería. Incluso reduce la cantidad de cemento requerida para la operación de forzamiento.
5. Las lechadas se deben diseñar para una máxima eficiencia de sellado en zonas de calizas o dolomitas fracturadas.
6. Las pruebas y normas a seguir corresponden a las condiciones API, utilizando manómetro 325 y una presión diferencial de 1,000 psí, donde no se dispongan de núcleos de la formación para estos ensayos. El tiempo de bombeabilidad se debe planear para exceder el requerido en mezclar, desplazar, forzar y regresar el exceso de cemento. Un mínimo de 30 minutos más que lo planeado es suficiente.
7. El volumen de cemento no debe exceder la capacidad de la sarta de trabajo. La presión hidrostática del cemento en una sarta de tubería con diámetro reducido puede exceder la presión de fractura de la formación.
8. Los beneficios del bombeo intermitente (hesitación) durante la operación de forzamiento es que la depositación de los sólidos del cemento contra la formación puede ser mas

A continuación se presentan unas reglas prácticas que deben considerarse y algunas conclusiones que concuerdan con la experiencia actual. Los siguientes son aspectos a considerar en una cementación forzada:

1. La mayor parte de las cementaciones forzadas utilizan control de filtración para mantener fluidez y reducir la deshidratación prematura de la lechada durante el bombeo.
2. Las altas presiones de forzamiento que antes eran consideradas esenciales para el éxito, son actualmente consideradas indeseables cuando se usa cementación con filtración controlada.
3. Si ocurre el fracturamiento de la formación antes o durante la operación de forzamiento, grandes volúmenes de lechada pueden ser bombeados antes que se produzca el fraguado.
4. La técnica de bajo filtrado nos da un mejor control de flujo del cemento en pequeños canales o huecos atrás de la tubería. Incluso reduce la cantidad de cemento requerida para la operación de forzamiento.
5. Las lechadas se deben diseñar para una máxima eficiencia de sellado en zonas de calizas o dolomitas fracturadas.
6. Las pruebas y normas a seguir corresponden a las condiciones API, utilizando malla 325 y una presión diferencial de 1,000 psí, donde no se dispongan de núcleos de la formación para estos ensayos. El tiempo de bombeabilidad se debe planear para exceder el requerido en mezclar, desplazar, forzar y regresar el exceso de cemento. Un mínimo de 30 minutos más que lo planeado es suficiente.
7. El volumen de cemento no debe exceder la capacidad de la sarta de trabajo. La presión hidrostática del cemento en una sarta de tubería con diámetro reducido puede exceder la presión de fractura de la formación.
8. Los beneficios del bombeo intermitente (hesitación) durante la operación de forzamiento es que la depositación de los sólidos del cemento contra la formación puede ser más

fácilmente controlada. Como una regla general, cuanto más rápida la depositación, más corto es el trabajo.

9. En situaciones cuestionables, un empacador molible ofrece un mejor control que un empacador recuperable porque contiene una válvula de contrapresión.

10. Una forma efectiva de limpiar los disparos taponados es circular una solución ácida antes de la cementación a presión.

11. El tiempo de espera (WOC) después de una cementación forzada no excede de 8 a 24 horas, ya que el enjarre deshidratado, por su baja relación agua / cemento, fragua muy rápidamente.

I.13 PLANEACION DELTRABAJO

Planear es la etapa más importante en una operación de cementación forzada. Deben ser estudiadas las condiciones del pozo y los objetivos cuidadosamente establecidos por que una cementación a presión puede resultar complicada y cara. En la planeación, las siguientes preguntas deben ser aclaradas.

1. ¿Por qué una cementación forzada? (¿Estamos aislando una zona?, ¿Reparando una TR?, ¿Sellando el pozo?)
2. Si no utilizamos el método Braden head, ¿Qué herramienta utilizaremos?
3. ¿Debe ser el empacador molible o recuperable?
4. ¿A qué distancia de la zona de interés debe fijarse el empacador?
5. ¿Debemos usar alta o baja presión?
6. ¿Cómo debemos bombear? (¿En etapas intermitentes?, ¿Lentamente?, ¿rápidamente?)

7. ¿Qué clase de fluidos hay en el pozo? (¿Ácido?, ¿Agua?, ¿Lodo de perforación?)
8. ¿Qué tipo de lechada usaremos? (¿Cuanto?, ¿Con qué características?).
9. ¿Que equipo mecánico y otras restricciones deben ser consideradas?
10. ¿Cuáles son las condiciones del pozo? (¿Los fluidos en el agujero?, ¿La presión de fondo?, y temperatura de fondo?)
11. ¿Es el objetivo fracturar la formación? ¿Cuál es el gradiente de fractura?
12. ¿Cuál es el tiempo de espera del cemento?
13. ¿Cómo probaremos el trabajo de cementación forzada?

Cada esfuerzo debe ser realizado con el propósito de mejorar las condiciones del pozo antes y durante la operación de forzamiento. La sarta de TR y TP deben estar limpias tanto como sea posible (libres de incrustaciones, parafinas, residuos y restos de la perforación). Los empaques en la cabeza del pozo a ser utilizados o los preventores deben ser probados a la presión que se espera ejercer.

Si el trabajo de forzamiento se efectúa a través de la TR es necesario calcular la presión interna y la resistencia de las juntas de la TR. Si el forzamiento será efectuado a través de la TP y la TR, se debe conocer la resistencia de colapso de la TP. El punto más importante en el trabajo de planeación es entender el problema.

CAPITULO II. EQUIPOS, HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA.

II.1 INTRODUCCIÓN

Una herramienta recuperable actúa como un empacador, sellando el espacio anular entre la tubería de trabajo y la de revestimiento. Estas pueden ser levantadas y ancladas en cualquier punto deseado dentro del pozo y una vez realizada la operación pueden ser fácilmente recuperadas en la superficie.

Los empacadores recuperables se prefieren frecuentemente cuando se buscan los siguientes objetivos:

1. Operación para bloqueo.
2. Operación en zonas múltiples.
3. Empleados como tapón recuperable para aislar un intervalo disparado más bajo, mientras se trabaja en un intervalo superior.

Estos empacadores recuperables pueden ser bajados tantas veces como sea necesario. Las mayores objeciones para su uso es que:

- a) El retorno no puede evitarse cuando se libere la presión a menos que tengan una válvula de no retorno.
- b) Al circular en inversa el exceso de cemento se puede alterar la mezcla de cemento que ha sido forzado.

Los empacadores molibles (también conocidos como tapones) se usan preferentemente cuando se efectúa bajo estas condiciones:

- 1) Pozos con bajo nivel de fluidos (baja Ps).
- 2) Zonas que requieren operaciones múltiples.
- 3) Operación por abandono (yacimiento agotado).

Comúnmente el empacador móvil contiene una válvula de no retorno (check) para evitar el regreso al terminar del desplazamiento y una válvula deslizante para cuando se desee mantener la presión en cualquiera de las dos direcciones. La válvula soportará el peso de la columna hidrostática del fluido relevando al cemento de esta carga mientras fragua. Se puede circular en inversa el exceso de cemento de la TP sin aplicar presión de circulación al área forzada debajo del empacador. La TP puede sacarse del pozo sin peligro de que quede atrapada.

Los cementadores recuperables también pueden dividirse en dos categorías: los que llevan una válvula (by pass) de fluido concéntrica construida dentro del empacador y los que tienen la válvula separada.

La válvula tiene tres propiedades:

- 1) Estando abierta comunica el agujero con la tubería, parte del fluido del pozo sube a través del empacador y sale hacia los puertos de la desviación.
- 2) Proporciona un método para igualar la presión alrededor del empacador.
- 3) A veces puede usarse para colocar fluido por encima del empacador, la principal restricción del desviador "by pass" es la probabilidad de fuga durante la operación, en cuyo caso el cemento en compresión estará en la herramienta y no en el área deseada.

Las operaciones de cementación forzada que se efectúan con un empacador de cualquier tipo son similares a las discutidas cuando se usa un retenedor para una operación normal.

II.2 UNIDAD DE ALTA PRESIÓN.

La unidad de alta presión o unidad cementadora (Figura II.1) está constituida generalmente por dos bombas de alta potencia con su tablero de control y dos tanques de depósito, en las cuales se mide el agua utilizada durante la cementación. Una de las bombas, succiona el agua de los depósitos y alimenta al mezclador, proporcionándole el agua necesaria para obtener la lechada de cemento. La otra bomba succiona la lechada de cemento y la envía al pozo a través de las líneas que conecta a la unidad cementadora con el cabezal de cementación.

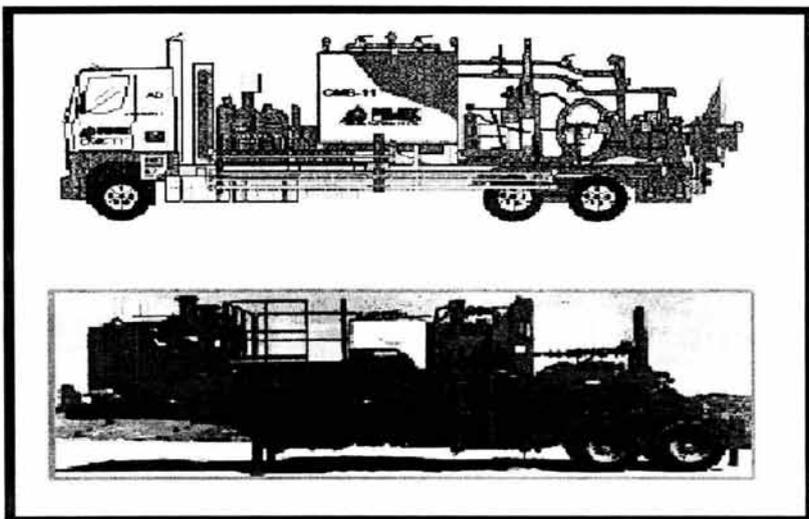


FIGURA II.1 UNIDAD DE ALTA PRESIÓN

En el mezclador se efectúa la mezcla agua-cemento. Su forma es semejante a la de un embudo con la parte ancha hacia arriba en la cual se vierte el cemento. Está provisto en la base con dos unidades que permiten conectar la línea de alimentación de agua y la línea de descarga de lechada. La primera línea se une de las bombas de la unidad cementadora y la segunda línea de descarga la mezcla de cemento a un depósito, del que se succiona por la otra bomba y enviada al pozo. Con el propósito de controlar la densidad de la lechada, ésta se determina periódicamente tomando muestras del depósito mencionado y midiéndose manualmente con la balanza de lodos, o bien, se registra en forma continua, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que desplaza la lechada hacia el pozo.

II.3 TROMPOS O TOLVAS DE CEMENTO.

Dependiendo de la cantidad de cemento a utilizar y del tiempo disponible antes de la operación, se moverá un silo estacionario o unidad transportadora de cemento (trompo), revisando que no este tapada la descarga del cemento por efecto de la humedad. Vea la figura II.2. Si es un silo estacionario, se deberá limpiar con aire 10 minutos antes de iniciar la operación, si es una unidad transportadora de cemento (trompo) represionar con aire para descargar el cemento, verifique que la descarga del cemento al embudo de mezclado sea uniforme para que la densidad de la lechada sea homogénea.

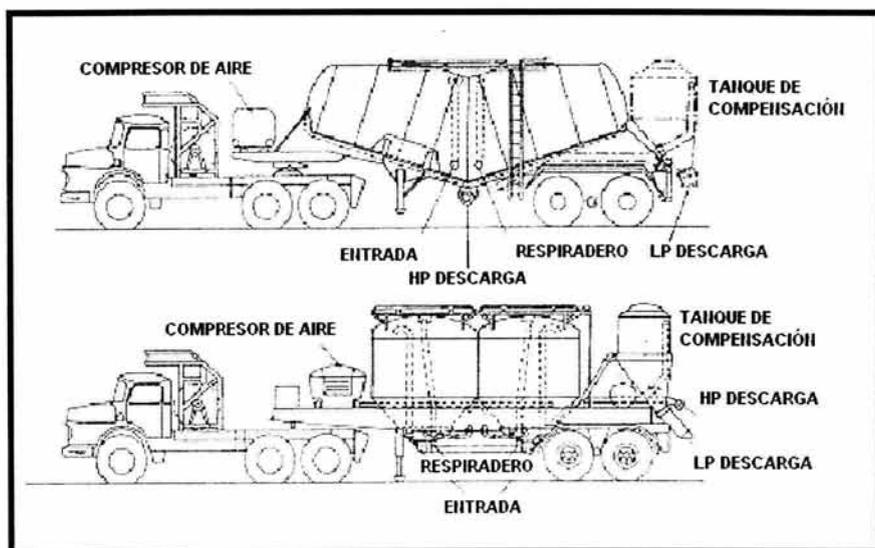


FIGURA II.2 UNIDAD TRANSPORTADORA DE CEMENTO

Así mismo deberá contarse con el volumen necesario en las presas, que las bombas estén en condiciones, que la unidad no este tapada y se debe verificar el gasto en la unidad.

II.4 CONEXIONES SUPERFICIALES.

La programación, instalación y prueba de líneas superficiales es de suma importancia para las diferentes operaciones que se llevan a cabo, no sólo en cementaciones forzadas, si no

que también en cementaciones de TR'S, tapones por circulación, pruebas a bocas de TR corta, estimulaciones y fracturamientos.

Para el caso de cementaciones forzadas se puede utilizar una tubería de 3 ½" previamente instalada expreso y probada con la presión máxima que se espera alcanzar en la operación, si por alguna circunstancia, el equipo de perforación o reparación no cuenta con dicha línea, se procurará que la unidad de alta presión quede instalada junto al equipo para evitar grandes longitudes de tubería de alta presión con diámetro reducido. Deberá utilizarse una sola pieza para ir del suelo al piso de la mesa rotaria, evitando que existan conexiones intermedias.

II.5 HERRAMIENTAS RECUPERABLES.

Estas herramientas removibles están diseñadas para permitir el forzar una o más zonas durante un solo viaje hacia adentro del pozo. Las cuñas son hidráulicas y/o mecánicas provistas para permitir grandes presiones de forzamiento. Estas herramientas permiten el probar a presión la tubería de producción, tubería de revestimiento, y el sello del empacador antes de la cementación, y permite circular a través o arriba del empacador, según se desee, algunas de estas herramientas son las siguientes:

II.5.1 CEMENTADOR RECUPERABLE RTTS (RETRIEVABLE TEST-TREAT-SQUEEZE).

Este empacador tiene mandril de diámetro amplio, diseñado para utilizarse en operaciones de cementación forzada, pruebas y tratamientos. También tiene una junta de seguridad tipo VR, para ayudar a sacar la tubería del pozo en el supuesto caso de que se quedara atorada o cementada la herramienta.

El mandril de la junta de seguridad opera antes de que sea aplicada suficiente tensión para que destrabe el seguro de la camisa de tensión. La herramienta (figura II.3) esta dotada de dos juegos de cuñas, uno mecánico y otro hidráulico, para evitar que el empacador se

desancla y sea levantado al estar bombeando a través de él cuando exista una presión diferencial. También va acompañada de una válvula de circulación arriba del empacador.

II.5.2 EMPACADOR CHAMP II.

Esta herramienta es capaz de operar en las más variadas y adversas condiciones que se presenten en un pozo. Su aplicación se extiende a pozos desviados o donde la manipulación de la tubería es un problema. Figura II.4. Esta herramienta es fácil de operar ya que la válvula de by-pass puede ser accionada por un esfuerzo de golpe (no requiere torque), nos ayuda a aislar tanta zonas como se requiera en un solo viaje para tratar, probar, forzar o



FIGURA II.3 HERRAMIENTA RTTS



FIGURA II.4 EMPACADOR CHAMP II

alguna combinación de estas; resulta ser versátil ya que puede ser empleada en combinación con un tapón puente recuperable para aislar zonas y poder realizar varias operaciones.

II.5.3 EMPACADOR MODELO 3 TIPO TAPÓN-PUENTE RECUPERABLE (MODEL 3 PACKER TYPE RETRIEVABLE BRIDGE PLUG).

Esta herramienta (figura II.5) resulta ser resistente y segura ya que esta equipada con unas cuñas sólidas, además no se tiene problemas con los fluidos pesados del pozo. Cuenta con amplio rango de operación ya que esta diseñada para ciertos rangos de presión y temperatura por esto es importante conocer mejor los requerimientos del pozo, sin tener en cuenta la localización o la condición; su fácil manejo consiste en manipular la tubería de producción y aplicando peso a la sarta de trabajo se puede colocar la herramienta.

II.5.4 BV TAPÓN-PUENTE RECUPERABLE (BV RETRIEVABLE BRIDGE PLUG).

El tapón puente recuperable con válvula equilibrada fue diseñado para ayudar a proveer un sello en algún procedimiento múltiple del pozo donde operaciones de prueba, tratamiento o de forzar son ejecutadas. Figura II.6.

II.5.5 TAPÓN PUENTE DE RÁPIDA RECUPERACIÓN (QUICK RETRIEVABLE BRIDGE PLUG).

Se emplea donde se requiera velocidad y eficiencia, esta puede ser corrida en el agujero, cambiando de zona o bien ser recuperada con línea de acero. Figura II.7.

II.6 HERRAMIENTAS MOLIBLES.

Este tipo de herramientas son usualmente empleadas en trabajos de forzamiento donde un tapón de cemento en el pozo es necesario para crear un sello más efectivo mientras que el cemento toma un fraguado permanente en la formación y/o en los disparos, o cuando se requiere una recementación atrás de la tubería de revestimiento. Estas herramientas se corren en la tubería de producción, tubería de perforación o con línea de acero, dentro de este tipo se encuentran:

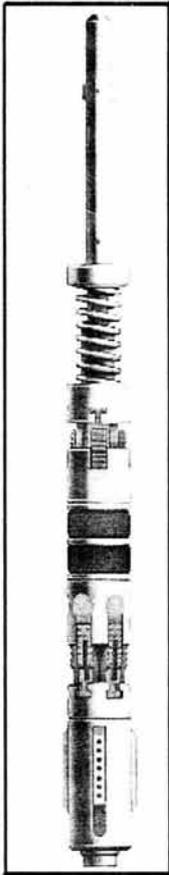


FIGURA II.5 EMPACADOR MODELO 3
TIPO TAPÓN-PUENTE RECUPERABLE

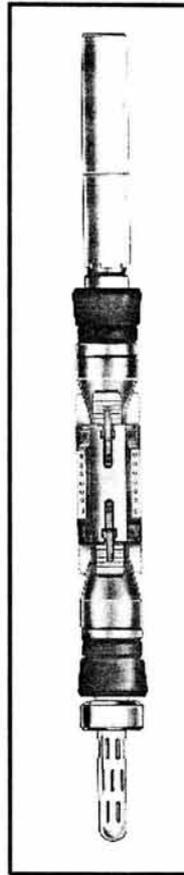


FIGURA II.6 BV TAPÓN-PUENTE
RECUPERABLE

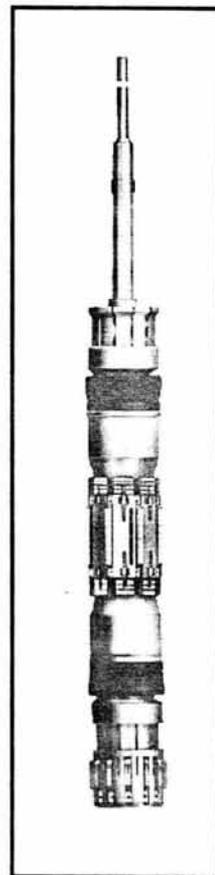


FIGURA II.7 TAPÓN-PUENTE DE
RÁPIDA RECUPERACIÓN

II.6.1 EZ EMPACADOR MOLIBLE SV (EZ DRILL SV SQUEEZE PACKER).

Es el más moderno y económico de los empacadores molibles que se encuentran en la industria. La herramienta está diseñada principalmente para cementaciones forzadas, algunas de sus otras funciones son:

- Mantener las presiones equilibradas,
- Puede ser empleada como un tapón puente, y
- Ser usada como probador de presión en la sarta de trabajo.

La válvula de circulación permite mantener la presión de forzamiento sobre los disparos de la zona de interés por medio de una presión equilibrada.

Esta herramienta (figura II.8) se presenta también para operar en agujero descubierto en donde se tiene problemas de pérdida de circulación, intrusión de agua de la formación y severos problemas de cavitación en el agujero. La herramienta es esencialmente la misma solo que difiere en que esta tiene el empacador de hule mas grande, esto es para proporcionar un mejor sello en agujero descubierto.

II.6.2 EZ EMPACADOR MOLIBLE (EZ DRILL SQUEEZE PARCKER).

Esta herramienta fue diseñada de acuerdo al conocimiento de los tres requerimientos de exploración, seguridad, versatilidad y funcionamiento en las herramientas de cementación de tipo permanente molibles. Figura II.9.

Así se inicio una línea de empacadores molibles que fueron colocados en la industria y llegaron a ser los más usados en todo el mundo. Todos los materiales empleados en el empacador son seleccionados para ser molibles, los componentes superiores están trabajados conjuntamente para ayudar a prevenir la rotación durante su remoción.

II.6.3 TAPÓN PUENTE DE LINEA VELOZ-E (SPEED-E LINE BRIDGE PLUG).

Este tipo de herramienta se recomienda su uso en pozos donde la presión no exceda de los 7,000 psi, resulta ideal para emplearse en tubería de revestimiento como un tapón temporal o permanente. Su aplicación se extiende donde las temperaturas sobrepasan los 250 °F. Figura II.10

II.6.4 EZ TAPÓN-PUENTE MOLIBLE (EZ DRILL BRIDGE PLUG).

Esta herramienta, ya sea que emplee para su instalación permanente o para ser molido posteriormente, en condiciones de alta temperatura y presión ofrece excelentes resultados

en su operación. Ayuda a prevenir el movimiento de fluidos en ambas direcciones. Figura II.11.



FIGURA II.8 EZ EMPACADOR MOLIBLE SV



FIGURA II.9 EZ EMPACADOR MOLIBLE

En este capítulo se mencionan algunas de las herramientas principales para una cementación forzada, se pone énfasis en los empacadores ya que ellos son parte fundamental para realizar una operación exitosa.



FIGURA II.10 TAPÓN-PUENTE LÍNEA VELOZ-E

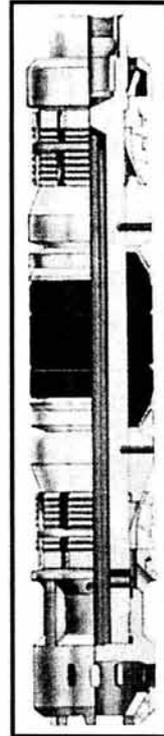


FIGURA II.11 EZ TAPÓN-PUENTE MOLIBLE

CAPÍTULO III.- CEMENTOS Y ADITIVOS.

III.1. INTRODUCCION

El concreto y el mortero ambos están basados de la cal que fueron empleados en la antigüedad. Los romanos reconocieron la importancia de la compactación al producir un material denso y durable. La cal hidratada fue íntimamente mezclada con arena y un material fino de origen volcánico. Este mortero endureció como una masa compacta en presencia de agua por medio de la interacción del material volcánico con la cal para formar silicatos de calcio hidratado similar a aquellos encontrados en la dureza de la pasta del cemento Pórtland. Materiales de origen natural o artificial los cuales experimentan reacciones con la cal son el Pozzolanic además del Pozzuoli en Italia donde es encontrado en forma natural.

La habilidad de los romanos se perdió en la época oscura y se olvidó el uso del mortero, el cual era endurecido principalmente por la carbonización de la cal que se empleaba. Eventualmente el efectivo empleo del Puzolana fue redescubierto en Holanda y se comenzó a utilizar en la región norte de Europa.

Los desarrollos modernos de la hidráulica de los cementos pueden expresarse o derivarse de los descubrimientos de Smeaton (1793) que la caliza contenía arcilla en la calcinación dando cal la cual endurecía al contacto con el agua. La hidráulica de la cal no desaparece en la hidratación como la hace la cal pura requerida en la industria metalúrgica y de vasos. Hacia finales del siglo XVII se observó que cuando algunas calizas arcillosas fueron calcinadas estas dieron un cemento hidráulico, formando naturalmente una mezcla de los materiales apropiados llegando a ser conocido como roca de cemento.

Joseph Aspdin, quien obtuvo la patente en 1824, es usualmente considerado como el inventor del cemento Pórtland, aunque su producto, se llevó a cabo por medio del calentamiento con arcilla en un horno y molido el producto sinterizado (clinker), resultó inferior al material utilizado hoy en día. Dos desarrollos fundamentales han mejorado los productos, la introducción del yeso, adicionado cuando se está moliendo el clinker y el empleo de altas temperaturas de calentamiento, necesarias para producir la mayor cantidad

de cal contenida en los silicatos los cuales son necesarios para generar mayores esfuerzos en el concreto. El avance se dio debido a la sustitución de los hornos verticales por los hornos rotatorios y la introducción de un molino de bola para la molienda del cemento.

Recientes desarrollos han involucrado el control instrumental para el análisis, mezclado y calentamiento de la materia prima para hacer un producto con una calidad (optimizado por medio de un incremento en la apreciación de la composición del clinker y microestructura) tan consistente como sea posible a partir de una materia prima. La mayor tendencia ha sido hacia el empleo de combustibles por medio de la introducción gradual del proceso en seco de la materia prima, en el cual la lechada empleada en viejos procesos es reemplazada por la pulverización como alimento para el horno.

Un cemento es un mineral el cual fragua conjuntamente con cuerpos sólidos (agregados) por medio del endurecimiento desde un estado plástico. Esta definición incluye cementos orgánicos base polímeros, de cualquier modo, el empleo de materiales orgánicos que son muy caros es limitado comparado a la cantidad que se emplea de cementos inorgánicos tales como el cemento Pórtland.

Una función del cemento inorgánico es que forma una pasta plástica cuando se mezcla con agua la cual desarrolla cierta rigidez (set) y luego incrementa lentamente sus esfuerzos compresivos (harden) por medio de las reacciones químicas que sufre con el agua (hidratación).

En el cemento Pórtland predominan, en su mayor parte componentes tipo silicatos di y tricálcicos. Todos los cementos son procesados esencialmente con los mismos ingredientes, pero en diferentes proporciones. Los requerimientos de agua para cada tipo de cemento varían con la fineza del molido y el área de superficie.

III.2 CEMENTO PORTLAND.

Una pasta de cemento desarrolla esfuerzos principales debido a la hidratación de los silicatos di y tricálcicos. Sin embargo, las reacciones químicas de esos compuestos con el agua son más complejas que las que se llevan a cabo con la pasta de yeso. Debido a que existen dos

productos en el proceso de la reacción (hidróxido de calcio y silicatos de calcio hidratados) que puede ser descrito más bien como hidrólisis que como hidratación.

Una pasta de cemento-agua (pasta dura) no es normalmente empleada por razones prácticas. El éxito del empleo del concreto depende especialmente de dos aspectos de la reacción del cemento Pórtland con el agua:

- a) Existe un periodo llamado DORMANT durante el cual los valores de hidratación son bajos y una parte sustancial de esta mezcla retiene la suficiente plasticidad para permitir su colocación y compactación;
- b) La hidratación de los productos formados después del fraguado progresivo que llena el espacio previamente ocupado por agua teniendo una estructura densa sin cambios indeseables por todas partes del volumen.

III.3 PROCESO DEL CEMENTO.

La materia prima básica empleada en la fabricación del cemento Pórtland es la caliza (CaCO_3) y arcilla o lutitas. El fierro y el aluminio son frecuentemente añadidos siempre y cuando no se encuentre presente una suficiente cantidad de arcilla o lutitas. Estos materiales se mezclan conjuntamente, en cualquiera de los dos procesos ya sea en seco o en húmedo, y luego esto alimenta a un horno rotatorio con el cual se funde la caliza a temperaturas de 2600 a 3000 °F formando un material llamado "clinker".

En la etapa de enfriado el "clinker" es pulverizado y mezclado con una pequeña cantidad de yeso del orden de 1.5 a 3.0% en peso en el cemento, el cual controla el tiempo de fraguado y de endurecimiento del cemento. La fabricación del cemento se inicia con la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo a la planta cementera.

En la Figura III.1 se presenta un diagrama generalizado del proceso de fabricación del cemento.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



FIGURA III.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

Podemos distinguir dos procesos fundamentales para la fabricación del cemento: proceso por vía seca (proceso seco), en el cual se tratan los componentes del crudo por molienda en seco (observar Figura III.2); proceso por vía húmeda (proceso húmedo), en el que se prepara una pasta de materias primas con contenidos del 18 al 45 % de agua por sedimentación o por molienda, en presencia de agua o por combinación de ambos procesos (observar Figura III.5). En ambos procesos la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo, son similares, continuando otras etapas durante la fabricación, las cuales difieren en dichos procesos en algunos aspectos, los cuales se describen a continuación.

PROCESO SECO.

Trituración.- Las materias primas se trituran en varias etapas en una serie de máquinas que están adaptadas al tamaño descendente de las partículas en proceso. La reducción de tamaño va desde las grandes piezas de cantera (1 a 1.5 m de tamaño), hasta partículas de unos 13 mm de tamaño.

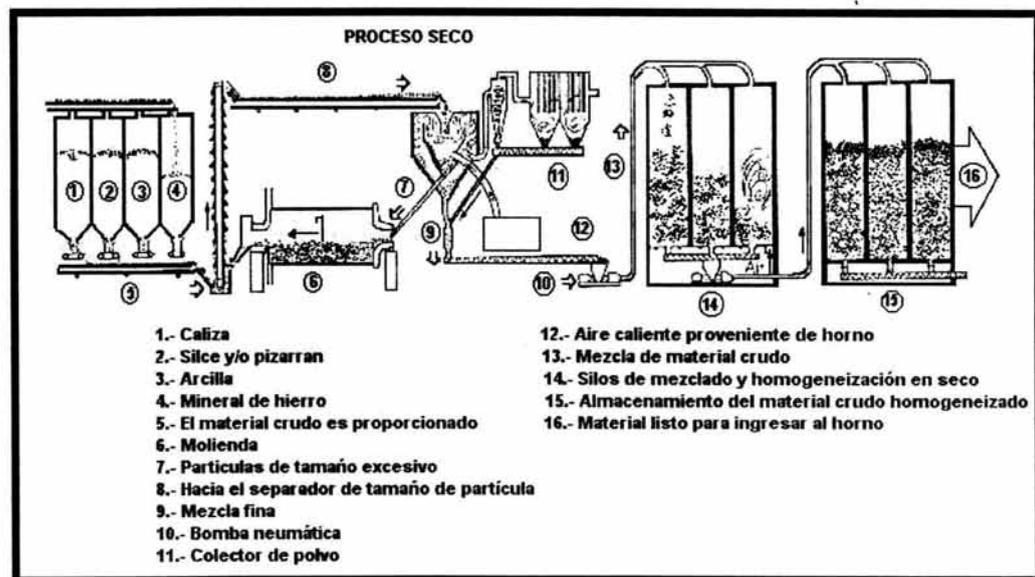


FIGURA III.2 PROCESO SECO

Secado.- Una vez alcanzado el tamaño de partícula en la trituración de las materias primas, éstas se introducen por la parte superior en los secadores rotatorios, los cuales, son tubos largos de acero, ligeramente inclinados, de 2 a 3 metros de diámetros y de 18 a 30 m de largo en cuya parte inferior entran gases calientes.

Molienda.- El material recuperado de los secadores, es molido finamente para asegurar la homogeneización de los componentes de la mezcla, facilitando las reacciones químicas durante la calcinación. La molienda de las materias, se realiza en los molinos de bolas, los cuales constan de un cuerpo cilíndrico rotatorio de acero llenado en aproximadamente 30 % de su volumen interior de bolas de acero, las cuales por impactos al caer en cascada debido

a la rotación del molino, llevan a cabo el molido del material. El material posteriormente es llevado a un separador, donde la parte más fina, considera como producto terminado, se separa para continuar el proceso, en cambio la que aún es demasiado gruesa, regresa al molino.

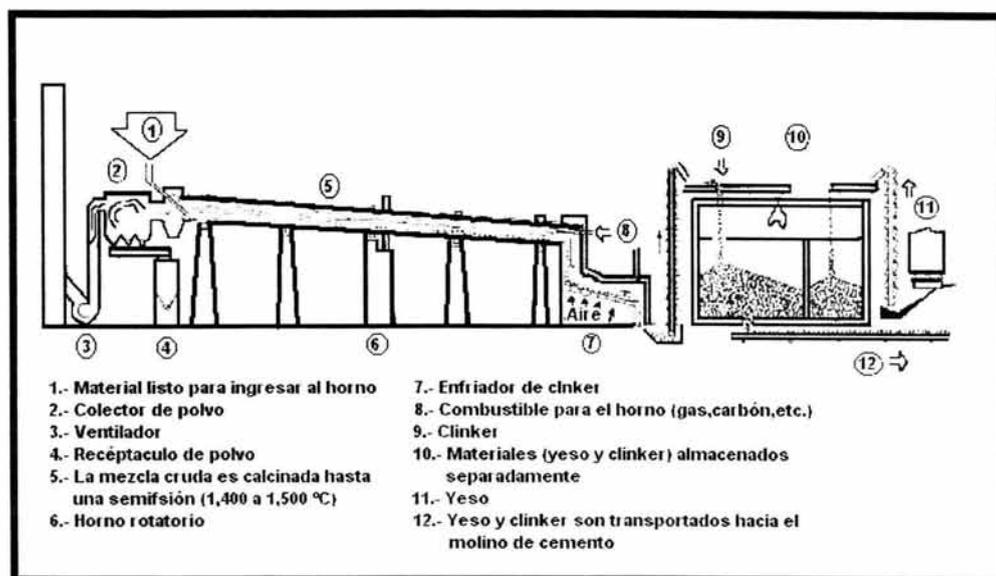
Homogeneización.- El producto resultante de la molienda conocido como "crudo" o "mezcla cruda", en envía a los silos de crudo en donde se homogeneiza y se mezcla entre sí para obtener una composición uniforme, manteniendo de esta forma una mezcla homogénea entrando a los hornos de calcinación.

Calcinación. La mezcla cruda es introducida en la parte superior del precalentador, que consiste de cuatro etapas de ciclones. Los gases calientes que salen del horno, entran en la parte inferior del precalentador y salen por la parte superior, intercambiando su calor durante el recorrido con el material que llega al precalentador. En la parte inferior del precalentador se tiene una etapa adicional llamada "precalcación". El propósito del precalcador es preparar todavía más la mezcla cruda antes de entrar al horno.

Los hornos son tubos cilíndricos que giran y presentan una inclinación con respecto a la horizontal. El material dentro del horno avanza hacia el quemador debido a la inclinación y rotación que es de 1 a 4 rpm. La temperatura máxima de calcinación de la mezcla cruda es de 1,400 a 1,500 °C. En el horno de cemento no se funden completamente los materiales, sino que se llega a una semifusión o estado pastoso, durante el cuál se forman aglomerados cuya forma se aproxima a la esférica (0.25 a 4 cm de diámetro), que recibe el nombre de "Clinker". La calcinación de las materias primas en el horno debe ser perfecta para garantizar que toda la cal libre (óxido de calcio), producida por la descomposición de la caliza, alcance a combinarse con los óxidos de fierro, aluminio y silicio de la arcilla. Esta parte es importante en el proceso de fabricación, como se puede observar en la figura III.3.

Enfriamiento. Debido a que el clinker sale del horno a una temperatura alta, éste debe enfriarse mediante un proceso adecuado que permita perfeccionar las propiedades del

cemento, lo cuál se logra por medio de un enfriador de parrilla inclinada, con barras oscilantes sobre las cuales se forma un manto de clinker caliente que va descendiendo, enfriándose al contacto con el aire que entra por la parte inferior. El aire al pasar por el clinker que va sobre las parrillas se calienta y se aprovecha en el horno o en el precalentador. El clinker, ya frío, es transportado a los patios de clinker donde es almacenado. El enfriamiento del clinker es necesario por los siguientes motivos: el clinker al rojo vivo no es transportable; el clinker caliente influye desfavorablemente en la molienda del cemento; el aprovechamiento del contenido térmico del clinker caliente disminuye los costos de producción; un proceso de enfriamiento adecuado perfecciona las propiedades del cemento.



III.3 PROCESO DE CALCINACIÓN

Molienda del cemento. Del patio de almacenamiento del clinker, éste pasa a los molinos de cemento, donde con adición de aproximadamente 5 % de yeso es molido en un molino de bolas parecido al de crudo y el producto terminado es el cemento. El cemento es molido más fino que la mezcla cruda (80 % de las partículas con diámetro menor que 0.045 mm). En la figura III.4 presentada continuación se muestra la molienda y almacenamiento del cemento en envase y despacho. No obstante que el proceso de fabricación del cemento termina cuando el cemento sale de los molinos se considera el envase y despacho de cemento como parte

integral del proceso. Quedando ciertas maniobras por realizar, como son la conducción del cemento a los silos de almacenamiento, y finalmente su envasado y despacho en diferentes formas: en sacos de 50 Kg. cargados en camiones y furgones de ferrocarril; a granel tolvas de ferrocarril y en pipas sobre neumáticos.

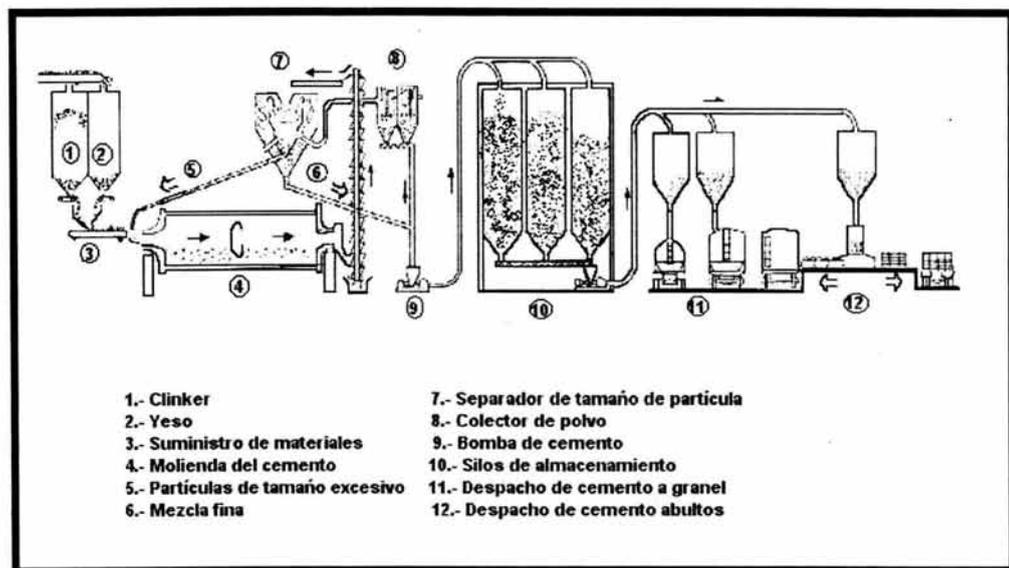


FIGURA III.4 MOLIENDA Y ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO

PROCESO HÚMEDO.

El procedimiento de fabricación por vía húmeda, difiere del procedimiento anterior en algunos aspectos, los cuales se describen a continuación:

1. La arcilla no se tritura sino que se descarga en un molino de rastrillos que la desmenuza y la mezcla con agua para producir una lechada bastante fluida (65% de agua), la cual, es bombeada hasta descargarla en un tanque de concreto provisto de agitadores.
2. Esta lechada dosificada junto con la caliza previamente triturada, se alimenta a los molinos de crudo donde se añade agua para facilitar la molienda, manejo y mezclado de los materiales, que representa a cambio un mayor consumo de combustible para evaporar el agua en el horno.

3. De los molinos, la mezcla cruda pasa a unos tanques correctores y de ahí a otros mezcladores, de donde a su vez pasa al horno.

4. En este proceso el secado se realiza en el horno.

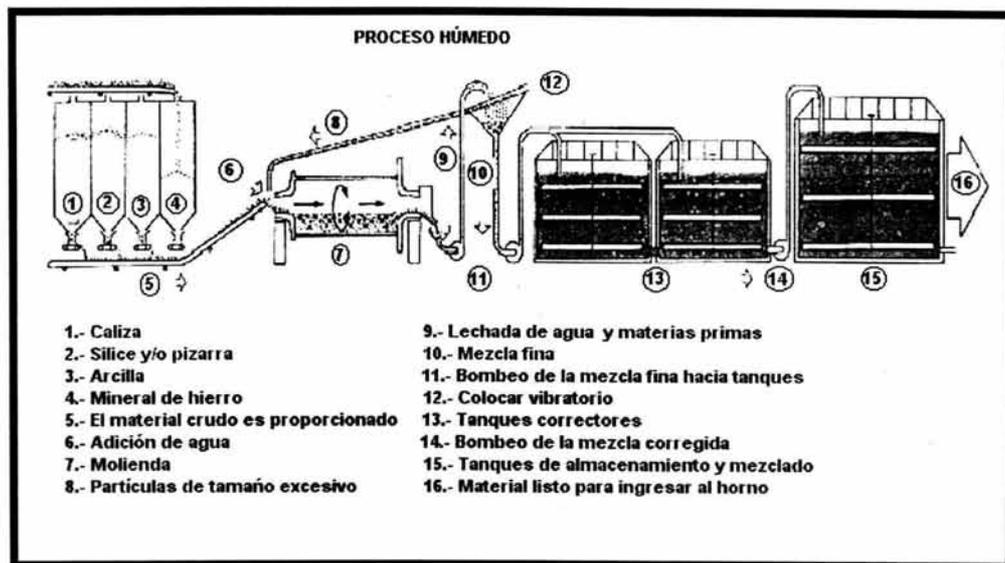


FIGURA III.5 PROCESO HÚMEDO

Los siguientes pasos en este proceso de fabricación son los mismos que se siguen en el proceso por vía seca. Anteriormente se tenía la opinión de que el clinker del horno, obtenido por vía húmeda, debido a la mejor homogeneización de las materias primas componentes del crudo en forma de pasta, era más regular y poseía mejor calidad. Sin embargo, los métodos y dispositivos actuales, desarrollados para satisfacer las más altas exigencias, hacen posible la fabricación de crudos, por vía seca, con el mismo grado de uniformidad que las pasta elaboradas por vía húmeda. En la calidad del clinker no existe diferencia.

REACCIONES EN EL HORNO.

Siendo la calcinación en los hornos un proceso medular de la fabricación del cemento, es conveniente conocer aunque sea brevemente, las reacciones que se llevan a cabo dentro del horno para la formación de los distintos compuestos óxidos que constituyen al clinker. Dentro del horno tenemos, de acuerdo al rango de temperaturas que se manejan, seis zonas en las cuales suceden distintas reacciones, como se muestra en la tabla I.1.

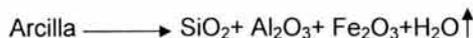
ZONA	RANGO DE TEMP (°C)	REACCIÓN
I	200 máximo	Evaporación
II	200 a 800	Pre calentamiento
III	800 a 1100	Decarbonación
IV	1100 1250	Reacción
V	1250 a 1500 a 1250	Exotérmica
VI	1250 a 1000	Aglomeración Enfriamiento

La evaporación del agua libre contenida en la mezcla cruda ocurre en la zona de entrada del material crudo. La eliminación del agua ocurre de forma muy rápida durante el proceso seco; sin embargo, el proceso húmedo la longitud del horno en que ocurre ésta reacción será mayor que en el proceso seco, y consecuentemente también mayor el tiempo de evaporación.

En el primer tramo del horno, es decir, la zona más cercana a la entrada del material crudo, éste es calentado a unos 700 °C aproximadamente (zona de pre calentamiento); en seguida se descompone la caliza a una temperatura de unos 900 °C, desprendiéndose gas carbónico que es arrastrado hacia la chimenea, de donde sale junto con los gases de combustión quedando óxido de calcio (cal) libre:

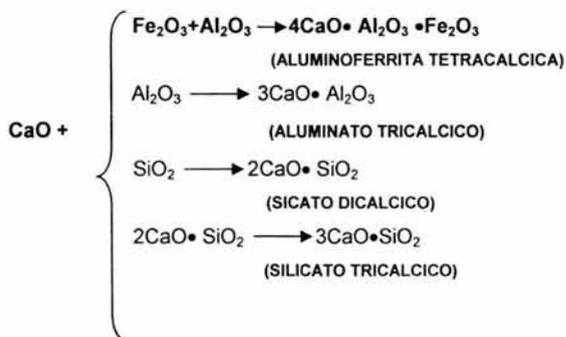


En la siguiente zona del horno se lleva a cabo la descomposición de la arcilla en sus óxidos principales: sílice, alúmina y óxido férrico, desprendiéndose también su agua de hidratación.



Iniciándose a sí la combinación de la cal (CaO) proveniente de la caliza con los óxidos de hierro (Fe₂O₃) y aluminio (Al₂O₃) formando primeramente, la aluminoferrita tetracálcica y enseguida el aluminato tricálcico; esto se efectúa a temperatura de 1,250 °C aproximadamente. Posteriormente se lleva a cabo la combinación de la cal (CaO) con la

sílice (SiO_2) formándose el silicato dicálcico, en el cual en presencia de más cal, forma el silicato tricálcico:



Como se mencionó anteriormente, en el horno no se lleva a cabo una fusión completa, sino que sólo se alcanza una semifusión o estado pastoso entre los 1,250 y 1,500 °C (en esta parte se funde aproximadamente del 20 al 30 % de la materia cruda), durante el cual se forman aglomerados de cristales y vidrios cálcicos, de forma aproximadamente esférica y con un diámetro que varía de 0.5 cm hasta unos 4 cm, al que se conoce con el nombre de clinker.

III.3.1 QUÍMICA DEL CEMENTO.

La química del cemento es muy compleja y su realización en los pozos está usualmente definida por un simple análisis de óxidos y de pruebas basadas sobre la capacidad de bombeo, los esfuerzos, la reología, etc. un análisis típico de óxido de los cementos API empleados en pozos se tiene en la tabla III.1.

Cuando la lechada se encuentra en el pozo la función del agua es como transporte para ello se emplea silicato reactivo producido en el proceso de fabricación. Una vez colocada, se forma una estructura de red plástica desarrollando esfuerzos de gel, resultando un fraguado de masa sólida.

TABLA III.1 OXIDOS TÍPICOS EN EL ANÁLISIS DEL CEMENTO PORTLAND. (CEMENTOS BÁSICOS API CLASE G o H)	
OXIDO	%
DIOXIDO DE SILICIO (SiO_2)	22.43
OXIDO DE CALCIO (CaO)	64.77
OXIDO DE FIERRO (Fe_2O_3)	4.10
OXIDO DE ALUMINIO (Al_2O_3)	4.76
OXIDO DE MAGNESIO (MgO)	1.14
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO_3)	1.67
OXIDO DE POTASIO (K_2O)	0.08

Cuando los productos del "clinker" se hidratan con agua en el proceso de fraguado, estos forman más de cuatro fases cristalinas de las cuales su fórmula química y su designación estándar se encuentran en las tablas III.2 y III.3.

TABLA III.2 COMPUESTOS QUÍMICOS ENCONTRADOS EN EL CEMENTO PORTLAND.		
COMPUESTOS	FÓRMULA	DESIGNACIÓN ESTANDAR
ALUMINATO TRICÁLCICO	$(3\text{CaOAl}_2\text{O}_3)$	C_3A
SILICATO DICALCICO	(2CaOSiO_2)	C_2S
ALUMINIO FERRITO TETRACÁLCICO	$(4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3)$	C_4AF
SILICATO TRICÁLCICO	(3CaOSiO_2)	C_3S

III.3.2 COMPUESTOS FORMADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN.

El Clinker contiene cuatro componentes, estos se cree que son los principales materiales cementantes y que al hidratarse ayudan a la formación de una estructura rígida.

TABLA III.3 COMPOSICIÓN TÍPICA Y PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND EN LA CLASE API					
API (CLASES)	COMPONENTES %				FINESA WATNER (CM ² /GR)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
A	53	24	8	8	1500 a 1900
B	47	32	5	12	1500 a 1900
C	58	16	8	8	2000 a 2800
D & E	26	54	2	12	1200 a 1600
G & H	50	30	5	12	1400 a 1700
PROPIEDAD		COMO CONSEGUIRLO			
RESISTENCIA PREMATURA ALTA		POR INCREMENTO DEL CONTENIDO DE C ₂ S, REFINADA MOLIENDA			
MEJOR RETARDACIÓN		POR CONTROL DEL CONTENIDO DE C ₂ S Y C ₃ A Y BURDA MOLIENDA			
BAJO CALENTAMIENTO DE HIDRATACIÓN		POR LIMITACIÓN DEL CONTENIDO DE C ₂ S Y C ₃ A			
RESISTENCIA AL ATAQUE DE SULFATO		POR LIMITACIÓN DEL CONTENIDO DE C ₃ A			

ALUMINATO TRICÁLCICO (3CaOAl₂O₃).

Es el compuesto que provoca una rápida hidratación y es el que controla el fraguado y el tiempo de espaciamento de la lechada. Éste es también el responsable de la susceptibilidad del ataque químico de los sulfatos sobre los cementos, clasificándose estos en moderados y de alta resistencia al ataque químico. Conteniendo entre un 3 % o menos de aluminato tricálcico.

ALUMINIO FERRITO TETRACÁLCICO ($4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3$)

Compuesto de bajo valor de hidratación que no influye en el fraguado inicial. Este material es el que le da el calor al cemento. Un exceso de óxido de fierro incrementará la cantidad de aluminio ferrito tetracálcico y reducirá la cantidad de aluminato tricálcico en el cemento.

SILICATO TRICÁLCICO (3CaOSiO_2)

Es el compuesto de mayor proporción en la mayoría de los cementos y es el factor principal que produce la consistencia temprana o inmediata. Además, es responsable de la alta resistencia inicial que varía de 1 a 28 días.

SILICATO DICÁLCICO (2CaOSiO_2)

Este es un compuesto de hidratación lenta que proporciona la ganancia gradual de resistencia, la cual ocurre en un periodo largo de tiempo. El requerimiento de agua es función de la finura o área de superficie, donde los cementos de alta resistencia inicial tienen una área de superficie alta (molido fino). Los cementos retardados tienen una área de superficie baja. Ahora bien, los cementos comunes Pórtland tienen una área de superficie ligeramente superior a los cementos retardados y el cemento básico está ubicado entre el común y el retardado. El desarrollo del cemento que se tiene para pozos profundos y temperaturas altas están normalmente juzgadas en algunas pruebas físicas estándar definidas por la API.

III.4 CLASIFICACIÓN API DEL CEMENTO

La industria petrolera en sus operaciones de cementación, utiliza en su mayoría cementos tipo Pórtland. Estos cementos se producen a partir de mezclas pulverizadas, parcialmente fundidas, compuestas de caliza con materiales como arcillas, arena, escoria, arenas silíceas, mineral férrico y carbón.

Los procedimientos y especificaciones para el comportamiento de algunos tipos de cementos Pórtland en el trabajo de la construcción son desarrollados por la American Society of Testing

Materials (ASTM). Esta institución provee especificaciones para cinco tipos de diferentes de cementos Pórtland I, II, III, IV y V.

Los cementos manufacturados para uso en los pozos están sujetos a amplios rangos de temperaturas y presiones, y difieren considerablemente de los del tipo ASTM que están manufacturados para condiciones atmosféricas. Por tanto, el American Petroleum Institute (API) provee especificaciones que cubren ocho clase de cementos para pozos de aceite y gas, designados con las letras A, B, C, D, E, F, G y H. Los cementos A, B y C corresponden a los tipos I, II y III; los tipos IV y V no tienen su correspondiente en las clases API.

La primera tentativa de estandarización designada API Std 10A, fue titulada estandarización API de cementos para pozos de aceite (Specification API for Oilwell Cements). La industria petrolera compra en su mayoría cementos manufacturados de acuerdo con las clasificaciones API, quien desde 1953 ha publicado estándares que se revisan año con año de acuerdo con las necesidades de la industria.

Las diferentes clases de cementos API para uso a temperaturas y presiones de fondo del pozo se definen a continuación:

CLASE A. Para usarse desde la superficie hasta una profundidad no mayor a los 6,000 pies (1,830 m), siempre y cuando no se requiera de propiedades especiales. Disponible solo en tipo ordinario (similar al C 150 Tipo I de ASTM).

CLASE B. Para uso desde superficie hasta una profundidad de 6,000 pies (1,830 m) y requerimientos de moderada a alta resistencia a los sulfatos. Disponibles en ambos tipos: moderada y alta resistencia a los sulfatos (similar al C 150ASTM, tipo II).

CLASE C. Para uso desde la superficie hasta 6,000 pies (1,830 m) donde las condiciones requieran de una alta y pronta resistencia (similar al C 150ASTM, tipo III).

CLASE D. Para usarse a profundidades entre 6,000 y 10,000 pies (1,830 a 3,050 m) y temperaturas y presiones moderadamente altas.

CLASE E. Para uso en profundidades entre 10,000 y 14,000 pies (3,050 a 4,270 m) donde se requiera de una alta resistencia a grandes presiones y temperaturas.

CLASE F. Para uso en profundidades de 10,000 a 16,000 pies (3,050 a 4,880 m) y condiciones extremadamente altas de presión y temperatura.

CLASE G. Para uso como cemento básico tal como se fabrica desde la superficie hasta profundidades no mayores a los 8,000 pies (2,400 m). Con aceleradores o retardadores puede ser usado en un amplio rango de presiones y temperaturas.

CLASE H. Para uso como cemento básico tal como se fabrica desde la superficie hasta profundidades de 8,000 pies (2,440 m). Los mismo que el cemento clase G puede, con la adición de aceleradores o retardadores utilizarse en una gran variedad de condiciones de presión y temperatura.

La tabla III.4 enlista las clases de cementos API y la profundidad de su aplicación.

TABLA III.4 APLICACIONES DE LAS CLASES DE CEMENTOS API

CLASF. API	AGUA DE MEZCLADO Gal/saco	PESO DE LECHADA Lbm / gal	PROFUND. PIES	TEMPER. ESTÁTICA ° F
A (PORTLAND)	5.2	15.6	0 a 6,000	80 a 170
B (PORTLAND)	5.2	15.6	0 a 6,000	80 a 170
C (RÁPIDO DESARROLLO)	6.3	14.8	0 a 6,000	80 a 170
D (RETARDADO)	4.3	16.4	6,000 a 12,000	170 a 260
E (RETARDADO)	4.3	16.4	6,000 a 14,000	170 a 260
F (RETARDADO)	4.3	16.2	10,000 a 16,000	230 a 320
G (BÁSICO) *	5.0	15.8	0 a 8,000	80 a 200
H (BÁSICO) *	4.3	16.4	0 a 8,000	80 a 200

* Puede ser acelerado o retardado para una gran variedad de condiciones.

III.5 CEMENTOS ESPECIALES.

Un número de materiales cementantes, usados considerablemente en la cementación de pozos, no cae dentro de alguna clasificación de especificaciones API o ASTM, por tanto, pueden o no ser vendidos bajo una especificación reconocida, así que su calidad y uniformidad son responsabilidad del fabricante. Estos materiales incluyen:

1. Cementos Pórtland Puzzolánicos
2. Cementos Puzolánicos-Cálcicos
3. Cementos plásticos o con resinas
4. Cementos base Yeso
5. Cementos para Diesel
6. Cementos Expansivos
7. Cementos Refractarios
8. Cementos con Látex

III.6 ADITIVOS PARA CEMENTO.

Los pozos en la industria petrolera de hoy cubren rangos más amplios de condiciones de profundidad y temperatura que en cualquier otro tiempo, por lo tanto, las composiciones de los cementos deben ser diseñadas bajo parámetros tan diferentes como: Temperaturas tan bajas como las existentes en las zonas de hielo permanente (Alaska, Canadá), temperaturas de más de 500 °F en los pozos profundos de aceite, temperaturas de (450 °F – 500 °F) en pozos de vapor y temperaturas de (1500 °F a 2000 °F) en trabajos de combustión in-situ; además deben soportar presiones que se encuentran en un rango entre la atmosférica y 30,000 (lb/pg²) en pozos extremadamente profundos. Ha sido posible acomodar tal variedad de condiciones solo a través del desarrollo de los aditivos a fin de modificar el cemento Pórtland disponible a los requerimientos individuales de cada pozo. Hoy día existen al rededor de 40 aditivos para cemento que se usan con varias clases de cemento API.

Con el advenimiento del cemento básico (API clases G y H) y el equipo mezclado a granel, el uso de aditivos se ha hecho más fácil y flexible. Las lechadas de cemento pueden ahora ser hechas a la medida de los requerimientos que cada trabajo tiene.

Prácticamente todos los aditivos para cemento en uso corriente se encuentran en forma de polvo y pueden mezclarse en seco con el cemento a granel antes de ser transportados hacia el pozo, empero, en caso de hacerse necesario, la mayoría de ellos pueden también ser dispersados en agua en el lugar que se realiza la cementación.

Dependiendo de como sean usados, los aditivos pueden modificar, considerablemente las características de la lechada de cemento. Los siguientes son algunos ejemplos:

- El esfuerzo a la compresión puede variarse en un rango entre 200 lb/pg² y 20,000 lb/pg².
- El fraguado puede acelerarse o retardarse, dando como resultados: Un cemento que fragüe en apenas unos segundos, o bien, uno que después de 36 horas se mantenga aún fluido.
- El filtrado a la formación puede disminuirse a valores tan bajos como 25 cm³/30 min cuando se mide usando una malla de 325 y una presión diferencial de 1,000 lb/pg².
- Las propiedades de flujo pueden variarse en un amplio rango.
- El cemento ya fraguado puede ser resistente a la corrosión, ya sea densificando la lechada, o bien, variando su composición química mediante aditivos.
- Mediante el uso de agentes sustentantes (en forma de fibra, hojuelas o gránulos) o gelatinas (en forma de gel), se puede controlar la pérdida de lechada de cemento hacia las formaciones.
- Puede dotarse de elasticidad a las lechadas mediante la incorporación de fibras finas en su composición.

Los aditivos para cementos pueden clasificarse como:

1. Aceleradores,
2. Retardadores,
3. Extendedores (reductores de peso),
4. Densificantes,
5. Agentes para control de pérdida de circulación
6. Agentes para control de filtrado,
7. Reductores de fricción, y
8. Aditivos especiales.

III.6.1 ACELERADORES.

Disminuyen el tiempo de espesamiento y aceleran una temprana resistencia, en lechadas de cemento que se usan en pozos someros y a bajas temperaturas de formación. Es un material químico que actúa sobre la velocidad de reacción entre el cemento y el agua pues incrementa el desarrollo de la reacción de la resistencia a la compresión temprana y disminuye el tiempo de espesamiento. Entendiéndose como tiempo de espesamiento el tiempo requerido por el cemento para alcanzar un grado establecido por el API de consistencia, o espesamiento. El tiempo de espesamiento comienza cuando la lechada se mezcla.

Los compuestos inorgánicos particularmente los CaCl_2 y el NaCl toman parte en la hidratación del cemento acelerándola. El grado de aceleración es influenciado por cualquier factor que tenga efecto sobre la velocidad de reacción química, y son presión, temperatura, concentración de aditivo a partículas ionizadas presentes y a la naturaleza química de la mezcla. Tabla III.5.

TABLA III.5 ACELERADORES EMPLEADOS EN EL CEMENTO

Aplicación cortos tiempos de espesamiento, reducción del tiempo de fraguado, temprano incremento de esfuerzos, ampliamente usados en tuberías superficiales en pozos someros y tapones de cemento. Pueden ser usados en seco o en mezcla de agua en cementos API clases A, B, C, G o H.

Tipo	Cantidad usual por Saco de cemento En % en peso	Tipo de cemento	Como emplearlo
1. Cloruro de calcio (CaCl_2)	3 a 4	Cualquier clase API	Seco o agua
2. Cloruro de sodio	3 a 10 (agua) 1.5 a 5 (cemento)	Cualquier clase API	Seco o agua
3. Yeso	20 a 100	Clase A, B, C, G o H	Solo seco
4. Silicato de Sodio (Na_2SiO_2)	1 a 7.5	Clase A, B, C, G o H	Seco o agua
5. Cementos con dispersantes y agua reducida	0.5 a 1.0	Clase A, B, C, G o H	Seco o agua
6. Agua marina	-	-	-

III.6.2 RETARDADORES.

Su principal objetivo es de aumentar el tiempo de bombeabilidad del cemento, controlando la hidratación. Siendo a base de lignosulfonato. Su finalidad primordial es alargar el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.

Su mecanismo de acción es aún una controversia. Dos factores principales deben ser considerados: la naturaleza química del retardador, y la fase del cemento (silicato o aluminato) sobre la cual el retardador actúa.

En las perforaciones de hoy, temperaturas de fondo estáticas (BHST) de 170 °F a 500 °F son cada vez más comunes en profundidades de 6,000 a 25,000 pies. El aumento de la temperatura acelera el espesamiento más que la profundidad. El retardador debe ser compatible con otros empleados en cementos así como en el cemento.

Los retardadores para cementos comerciales son compuestos del tipo de las ligninas (sales de ácido lignosulfónico), gomas, féculas, ácidos orgánicos y derivados de celulosa (ver tabla III.6).

TABLA III.6 RETARDADORES PARA EL CEMENTO COMUNMENTE USADOS.	
Material	Cantidad Usual Empleada *
Retardadores Lignin	0.1 a 1.0 %
Lignosulfonato de Calcio Ácido orgánico	0.1 a 2.5 %
Carboximetil hidroxietil Celulosa	0.1 a 1.5 %
Sal	14 a 16 lbm/saco de cemento
Borax	0.1 a 0.5 %
* Por ciento en peso de cemento	

III.6.3 EXTENDEDORES.

Son agentes que incrementan el rendimiento de la lechada tienen la habilidad de manejar grandes volúmenes de agua y esta característica es la que se aprovecha cuando se desean cubrir columnas largas donde el cemento no rebase la presión de fractura, pues al usar grandes volúmenes de agua se reduce la densidad de la lechada; además de ser mezclas mas económicas. Los aditivos son usados para reducir el peso de la lechada, los cuales la hacen más barata, incrementan el punto de cedencia y en ocasiones reducen las pérdidas

del filtrado. Hay tres formas para reducir el peso de la lechada y son: por adición de sólidos de baja densidad relativa, por adición de agua o por adición de ambos.

Los materiales comúnmente usados como aditivos reductores de peso son mostrados en la tabla III.7 en orden descendente de su eficiencia general.

TABLA III.7 RESUMEN DE ADITIVOS EXTENDEDORES PARA EL CEMENTO.	
Tipo de material	Cantidad usual empleada
Bentonita	2 a 6 % *
Cemento mezclado con bentonita	
Cemento con bentonita prehidratado	
Cemento mezclado con bentonita modificado	
Cemento con sal	
Diatomáceas	10, 20, 30, o 40 %
Hidrocarburo natural	
Gilsonita	1 a 50 lbm/ saco de cemento
Hulla	5 a 50 lbm/ saco de cemento
Perlita expansora	5 a 20 lbm/ saco de cemento
Nitrógeno	0 a 70 % (dependiendo de la densidad, T y P)
Microesferas	1 a 104 lbm/ saco de cemento
Otros	
Puzzolana artificial	74 lbm/ saco de cemento
Puzzolana-Cemento bentonítico	Variable
Silicato de sodio	1 a 7.5 lbm/ saco de cemento
*Porcentaje por peso de cemento	

III.6.4 DENSIFICANTES.

Para balancear las altas presiones frecuentemente encontradas en los pozos profundos, se requiere de lechadas de altas densidades. A fin de incrementar la densidad de la lechada un aditivo debe:

1. Tener una gravedad específica en un rango entre 4.5 a 5.0.
2. Tener un bajo requerimiento de agua.
3. No reducir significativamente la resistencia a los esfuerzos del cemento.
4. Tener un efecto pequeño sobre el tiempo de bombeo.
5. Mostrar un tamaño de partículas grupo a grupo.
6. Ser químicamente inerte y compatible con otros aditivos.
7. No interferir con los registros de pozo.

Los materiales mas comúnmente usados para densificar los cementos se muestran en la tabla III.8. De todos ellos, la hematita es la más usada, ya que es la que mejor se ajusta a los requerimientos físicos y además, tiene mayor densidad relativa efectiva.

Material	Cantidad empleada (% en peso de cemento)
Hematita	4 a 104
Ilmenita	5 a 100
Barita	10 a 108
Arena	5 a 25
Sal	5 a 16
Cementos con dispersantes	
Y agua reducida	0.05 a 1.75

III.6.5 AGENTES PARA EL CONTROL DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN.

Howard, G. C. define una pérdida de circulación como “ *La pérdida del fluido de perforación o terminación o de la lechada de cemento usados en la perforación o terminación de un pozo hacia fracturas inducidas* “. Esta no debe confundirse con el decremento de volumen de fluido debido al filtrado, o el volumen que se requiere para llenar el agujero a la nueva profundidad de perforación.

Usualmente existen dos etapas en el combate de un problema de pérdida de circulación. La primera es reducir la densidad del fluido en cuestión; la segunda es añadir un agente sustentante o taponante. Otra técnica consiste en añadir nitrógeno al sistema del fluido.

III.6.6 AGENTES PARA EL CONTROL DE FILTRADO.

La pérdida de filtrado de una lechada de cemento se disminuye con aditivos para dos fines principales:

- 1) Prevenir de una deshidratación prematura o de una pérdida de agua cuando atraviese por zonas porosas, particularmente en la cementación de liners.
- 2) Proteger las formaciones susceptibles de daño.

En el caso de una cementación forzada, el uso de una lechada con poca pérdida de filtrado aumenta las probabilidades de éxito. Una lechada a base de cemento API clases G o H puro y agua, tendrá una pérdida de filtrado máxima de $1,000 \text{ cm}^3$ en 30 min.

Las principales funciones de un aditivo para control de pérdida de filtrado son:

- a) La formación de películas o micelas las cuales controlarán el flujo de agua de la lechada hacia la formación y previenen su deshidratación.
- b) Mejorar la distribución de los tamaños de partícula, la cual determina como el líquido es retenido en la lechada.

Los dos materiales para el control de pérdida de filtrado más ampliamente usados son: los polímeros orgánicos (celulosa) y los reductores de fricción.

III.6.7 REDUCTORES DE FRICCIÓN.

Agentes dispersantes se añaden a las lechadas de cemento para mejorar sus propiedades de flujo. Este acondicionamiento provoca una disminución de la viscosidad y permite que las lechadas puedan ser bombeadas en régimen turbulento a presiones bajas, decreciendo de paso, la potencia necesaria así como las probabilidades de pérdida de circulación y deshidratación prematura (ver tabla III.9.a). La tabla III.9.b muestra el efecto de los dispersantes sobre el gasto crítico de flujo- el gasto requerido para lograr flujo turbulento-.

III.6.8 ADITIVOS ESPECIALES

Existen otros productos que ayudan a resolver algunas dificultades en los pozos, aumentando la resistencia del cemento, que pueden adicionarse en el cemento como yeso, resinas, látex, trazadores radiactivos, etc. Agentes antiespumantes (eliminan la mayor parte de burbujas de aire); agentes reductores de fricción (con los que se obtiene régimen turbulento a bajos gastos de bombeo, reduciendo la fricción entre granos y entre estos y las paredes de la formación); agentes expandidores de fraguado (dilatan el producto hidratado sin que esto sea originado por efecto de temperatura).

III.7 MATERIALES PARA UNA CEMENTACION FORZADA.

La lechada ideal de una cementación forzada es diseñada para permitir un tiempo adecuado de espesamiento, para producir la suficiente resistencia a la compresión con un mínimo tiempo de espera para la cementación.

III.7.1 ADITIVOS PARA LA BAJA PÉRDIDA DE FLUIDOS.

Estos aditivos ayudan a prevenir la rápida pérdida de fluido (deshidratación) bajo condiciones forzadas de alta presión. Esto ayuda a colocar el cemento contra la formación y los disparos, forzar con el tiempo suficiente y sacar el excedente de la lechada de cemento. Algunos aditivos son: Halad-22 A, Halad-11, Halad-9, CFR-2, Diacel LWL, y LA-2 Latex. Todos son diseñados para condiciones específicas de presión y temperatura.

III.7.2 DISPERSANTES.

Algunos dispersantes son añadidos a la lechada de cemento para reducir la fricción e incrementar el peso de la lechada en situaciones de presiones anormales. El lignosulfonato usado normalmente como un retardador es un dispersante. Otros que se utilizan son: Alquil aril sulfonatos, Polifosfatos, Lactones, Gluconatos, Polímeros sintéticos y Ácidos orgánicos.

TABLA III.9.a EFECTOS DE DISPERSANTE POLIMÉRICOS SOBRE EL TIEMPO DE ESPESAMIENTO Y EL ESFUERZO COMPRESIVO EN CEMENTOS API CLASE G.

Dispersante (%)	Tiempo de espesamiento (hora:min)		Esfuerzo Compresivo					
	Para Pruebas API en la TR a profundidad del pozo de (pies)		Después de 24 horas de cura a temperatura (°F) de					
	6,000	8,000	80	80*	95	110	140	140 °F
Cemento API Clase G Puro								
0.0	2:16	1:08	1,480	2,700	1,405	2,375	5,200	2,780
0.5	1:55	1:23	1,425	2,375	1,795	2,350	5,285	2,875
0.75	2:12	1:55	1,565	2,575	1,810	2,775	4,600	2,965
1.0	3:00+	3:00	1,410	2,440	1,920	2,285	2,595	2,405
1.25	3:00+	3:00	1,350	2,480	1,895	2,025	2,345	2,260
Cemento API Clase G con 18% de Agua Salada								
0.5	2:05	1:23	--	--	3,265	3,925	4,220	3,995
0.75	2:35	2:10	--	--	2,880	3,595	3,820	3,580
1.0	3:00	3:00	--	--	2,555	3,295	3,425	3,285
1.25	3:00	3:00	--	--	2,290	2,925	3,125	2,975
La lechada contiene 2% de cloruro de calcio								

TABLA III.9.b EFECTOS DEL DISPERSANTE SOBRE GASTOS CRÍTICOS DE LA LECHADA EN TURBULENCIA EN VARIOS CEMENTOS API

Turbulencia en TR de 5 ½ pg. en agujero de 8 ½ pg.								
Dispersante (%)	n	k	Peso (lbm/gal)	Volumen (pie ³ /saco)	Gasto (bbl/min)	Velocidad anular (pie/seg)	Número de Reynolds	Pérdida de Presión por Fricción (psi/1000 pies)
Cemento API Clase A Agua 5.2 gal/saco								
0.0	0.30	0.19500	15.600	1.180	28.71	10.64	3,000	176.6
0.5	0.43	0.06700	15.600	1.180	23.41	8.67	3,000	117.3
0.75	0.67	0.00700	15.600	1.180	11.65	4.32	3,000	29.1
1.0	0.79	0.00230	15.600	1.180	7.51	2.78	3,000	12.1
Cemento API Clase C Agua 6.3 gal/saco								
0.0	0.25	0.14410	14.800	1.320	21.12	7.83	3,000	90.6
0.5	0.34	0.06440	14.800	1.320	17.47	6.47	3,000	62.0
0.75	0.44	0.02570	14.800	1.320	13.57	5.03	3,000	37.4
1.00	0.60	0.00670	14.800	1.320	9.20	3.41	3,000	17.2
Cemento API Clase G Agua 5.0 gal/saco								
0.0	0.20	0.37840	15.800	1.150	29.94	11.09	3,000	194.4
0.5	0.70	0.00503	15.800	1.150	10.01	3.71	3,000	21.7
0.75	1.17	0.00015	15.800	1.150	2.08	0.77	3,000	0.9
Cemento API Clase H Agua 4.3 gal/saco								
0.0	0.25	0.28283	16.400	1.060	29.28	10.85	3,000	193.1
0.5	0.91	0.00115	16.400	1.060	6.17	2.29	3,000	8.6
0.75	1.09	0.00029	16.400	1.060	30.13	1.16	3,000	2.2

III.7.3 ACELERADORES.

Un acelerador hace que el cemento adquiera rápidamente su resistencia y reduce el tiempo de bombeabilidad. En zonas poco profundas donde las temperaturas son bajas, la adición de un acelerador es efectiva al hacer que el cemento desarrolle resistencia sin usar grandes cantidades de dinero, equipo y tiempo para desarrollarla. La tabla III.10 muestra el efecto de distintos aceleradores.

TABLA III.10 ACELERADORES Y TIEMPO DE ESPESAMIENTO EN CEMENTOS DE BAJA PÉRDIDA DE AGUA CLASE A, G Y H*

Polímero Orgánico (%)	Acelerador (%)		
	Sin Acelerador	Cloruro de Calcio 2%	Mezcla de Cloruros Inorgánicos 3%
0.6	2:52	1:44	1:37
0.8	4:03	2:10	1:10
1.0	4:14	2:04	1:58
1.2	5:40	2:05	2:15

*Todas la pruebas hechas a 4000 pies con una temperatura de fondo estática de 140 °F, tiempo de espesamiento mostrado en horas:minutos.

Los aceleradores mas comúnmente usados son compuestos de calcio (CaCl_2). En la planeación de una operación acelerada de forzamiento, la prueba usual del comportamiento de bombeabilidad debe ser hecha con anterioridad. El CaCl_2 debe ser añadido primeramente al agua para asegurar que no se exceda la porción de cemento y que pueda provocar un fraguado prematuro del cemento. Durante el desluzamiento, es recomendable colocar un bache de agua salada entre el agua con CaCl_2 y el cemento.

La sal (NaCl) es un ligero acelerador en bajas concentraciones y puede llegar a ser un retardador en altas concentraciones.

III.7.4 RETARDADORES.

Los retardadores son necesarios para retrasar el tiempo de espesamiento de una lechada de cemento y además satisfacer las condiciones de temperatura en un pozo profundo. El tiempo de bombeabilidad es normalmente considerando el tiempo API de espesamiento o tiempo de una mezcla inicial hasta alcanzar una viscosidad limitada (600 poises) en una celda de prueba. Los retardadores incluyen celulosa, ligninas, y otros compuestos orgánicos e

inorgánicos. El efecto de los agentes retardadores del cemento puede ser predicho efectivamente solo con pruebas hechas controladas bajo condiciones simuladas cercanas al fondo del pozo. Los lignosulfonatos son los retardadores más comúnmente empleados en cementaciones forzadas por que son consistentes en el comportamiento.

III.7.5 CEMENTOS.

Las operaciones de cementación forzada usualmente son realizadas con cementos clase B, C, y H, los cementos clase A y E, comúnmente usados en el pasado, están limitados en sus usos.

SISTEMA DE CEMENTOS ESPECIALES

CEMENTO DE ACEITE DIESEL.

Está formado por una mezcla de cemento seco con aceite diesel (y usualmente un surfactante) en lugar de agua.

CEMENTO RADIATIVO

Formulado con partículas trazadoras especiales para auxiliar en la localización de secciones forzadas cementadas con herramientas.

CEMENTO RESINA.

Es una mezcla de agua, resina y cemento. Tiene baja presión forzada, fragua formando un gel resinoso en la formación y como un tapón de cemento en el agujero. Así como se fue incrementando la profundidad de perforación de los pozos, se requirió un mejor desempeño de los cementos, para ello se implementó el Comité de Estandarización API y se desarrollaron más y mejores cementos. Hoy en día, existen ocho tipos de cementos API disponibles, cada uno con características particulares, para mejorar los resultados que se obtienen en la actualidad en la cementación de pozos petroleros.

CAPITULO IV. DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO.

IV.1 INTRODUCCIÓN

Los factores más delicados en el diseño de una lechada para un trabajo de forzamiento son la temperatura y el control de pérdida de fluidos. La temperatura determinará el tiempo de espesamiento de la lechada. La temperatura de circulación usada en el laboratorio será más alta que la esperada a la profundidad equivalente para la cementación, esto se debe a que el tiempo de circulación, el volumen y gastos son menores que los necesarios en una cementación de la TR. Es importante tener una temperatura de circulación adecuada, por que una variación de 20 °F puede cambiar el tiempo de espesamiento hasta en un 50%.

Antes que el tiempo de espesamiento sea determinado, un factor de seguridad (20%) debe ser añadido. Este tiempo de espesamiento es el tiempo en el cual la cementación forzada debe ser terminada y el exceso de cemento sacado.

La cantidad de aditivos para el control de la pérdida de fluidos, variará con el tipo de forzamiento y las propiedades de la formación. Por ejemplo, un intervalo amplio o una zona múltiple requerirá una lechada con baja de pérdida de fluidos; en cambio, el forzamiento para abandonar un intervalo corto requiere una lechada con poco o ningún control sobre la pérdida de fluidos.

IV.2 FACTORES DE DISEÑO DE LA LECHADA.

Al diseñar una cementación forzada deben tomarse en consideración la profundidad, la temperatura del pozo, las condiciones del pozo y los problemas de perforación. Los siguientes factores deben ser considerados en el diseño de una lechada de cemento para realizar una operación de forzamiento.

IV.2.1 PRESION Y TEMPERATURA.

En esta operación como en el caso de una cementación primaria, tanto la temperatura como la presión tienen influencia en el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.

La tabla IV.1 ilustra al tiempo que demora el primer saco de cemento para alcanzar las condiciones de fondo en un trabajo de presión y la temperatura estática vs la temperatura de circulación a varias profundidades según las pruebas API. La tabla IV.2 compara los tiempos de espesamiento de una determinada lechada para casos de cementaciones de TR o de cementación forzada.

TABLA IV.1 CONDICIONES DE CIRCULACION EN EL FONDO DURANTE UNA CEMENTACION DE TR Y UNA FORZADA.				
PROFUNDIDAD DEL POZO (PIES)	TEMPERATURA ESTATICA DE FONDO (°F)	TEMPERATURA DE CIRCULACION DE FONDO (°F)		
		TR	FORZADA	LINER
2000	110	91 (9)*	98 (4)*	91 (4)*
6000	170	113 (20)	136 (10)	113 (10)
8000	200	125 (28)	159 (15)	125 (15)
12000	260	172 (44)	213 (24)	172 (24)
16000	320	248 (60)	271 (34)	248 (34)
20000	380	340 (75)		

* Los valores en paréntesis indican el tiempo en minutos para que el primer saco de cemento alcance las condiciones de fondo.

Un forzamiento a baja presión requiere una bombeabilidad de 4 a 6 horas. La lechada de cemento debe permanecer fluida el tiempo necesario no solo al considerar el tiempo de operación sino también el de regreso.

TABLA IV.2 TIEMPO DE ESPESAMIENTO DEL CEMENTO EN CEMENTACIÓN DE TR Vs. CEMENTACIÓN FORZADA		
Profundidad : 8,000 pies		
Temperaturas		
Cementación TR: 125 °F		
Forzada : 159 °F		
Cemento: API clase H		
Relación de agua: 4.3 Gal. / saco		
AGENTE PARA PERDIDA DE FLUIDO (%)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (HORAS :MINUTOS)	
	CEMENTACIÓN TR	CEMENTACIÓN FORZADA
0.0	2:16	1:15
0.4	4:00	2:16
0.6	5:32	4:15
0.8	6:15	4:58

IV.2.2 TIPOS DE CEMENTOS.

Para la mayoría de las operaciones de forzamiento, se pueden usar las clases A, G o H por que dichos cementos han sido manufacturados para condiciones de hasta 6,000 pies y profundidades donde las temperaturas estáticas no exceden los 170 °F (ver tabla IV.3). Para pozos más profundos las clases G o H deben ser retardadas adecuadamente sobre la base del tiempo estimado para la operación.

IV.2.3 CONTROL DE FILTRACIÓN.

La filtración es importante en el diseño de una lechada para un trabajo de presión. Cuando la lechada es inyectada a través de un medio poroso, la presión diferencial obliga al agua a separarse de las partículas sólidas, formando un enjarre. Este enjarre o torta es mas bien blando y puede ser eliminado con un chorro, pero no es bombeable y se requiere una presión considerable para inyectarlo a través de una pequeña abertura. El espesor del enjarre dependerá de la permeabilidad de este o de la formación (la que sea menor), de las

características de pérdida por filtrado de la lechada, de la presión diferencial, y del tiempo que esa presión es mantenida.

TABLA IV.3 TIEMPO DE ESPESAMIENTO-CEMENTACION DE UNA TR VS FORZAMIENTO		
PROFUNDIDAD: 8000 PIES (2438 M)		
TEMPERATURAS:		
CEMENTACION EN TR 125 °F (52 °C)		
FORZAMIENTO 159 °F (71 °C)		
CEMENTO: CLASE H API		
RELACION DE AGUA: 4.3 GAL/SACO (16.3 LITROS/SACO)		
AGENTE PARA LA PERDIDA DE FLUIDO (%)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO (HR:MIN)	
	CEMENTACION TR	FORZAMIENTO
0.0	2:16	1:15
0.4	4:00	2:16
0.6	5:32	4:15
0.8	6:15	4:58

El enjarre es un material compacto sólido o semisólido, que queda en un filtro (formación permeable) después de someterlo a presión, como el lodo o la lechada de cemento en un equipo de filtrado o en el pozo. El espesor del enjarre se reporta en milímetros o en 32avos de pulgadas, o bien, también se puede definir como la capa de sólidos concentrados, de la lechada de cemento o lodo de perforación, que se forma en las paredes del pozo en las formaciones permeables.

La pérdida por filtrado API de cemento puro varía entre 600 a 2500 cm³ en 30 minutos. En algunos casos la deshidratación ocurre tan rápidamente que es difícil medirla, ese valor debe ser reducido a valores de 25 a 100 cm³ en 30 minutos (por medio de adición de bentonita y agentes dispersantes o polímeros), Ver figura IV.1 y tabla IV.4.

La pérdida por filtrado a través de un medio permeable puede causar un aumento de la viscosidad de la lechada y una rápida depositación del enjarre por filtrado, restringiendo el flujo. Los factores que influyen en la pérdida por filtrado son: el tiempo, la presión, la temperatura, y la permeabilidad. El API ha especificado un ensayo para medir la filtración en 30 minutos con 100 a 1000 psi de presión en un aparato llamado filtro prensa.



FIGURA IV.1 CONTROL DE LA FILTRACIÓN DURANTE CEMENTACIONES FORZADAS (Pérdida de fluido en $\text{cm}^3/30 \text{ min.}$ a 1,000 psi)

TABLA IV.4 COMPARACIÓN DE LA PÉRDIDA DE FILTRADO, PERMEABILIDAD DEL ENJARRE Y EL TIEMPO DE FORMACIÓN DEL ENJARRE DE UNA LECHADA DE CEMENTO.

PÉRDIDA DE FILTRADO A 1,000 PSI ($\text{cm}^3/30 \text{ min.}$)	PERMEABILIDAD DEL ENJARRE A 1,000 PSI (mD)	TIEMPO PARA FORMAR 2 pg. DE ENJARRE (min.)
1200	5.00	0.2
300	0.54	3.4
100	0.09	30.0
50	0.009	100.0

El procedimiento API emplea un equipo filtrante que contiene un soporte, un cilindro y una malla protectora numero 325 soportada por una malla 60 como medio de filtración para simular la colocación.

La pérdida por filtrado que presentan las lechadas de cemento sin aditivos es muy elevada, más de 1000 ml. Cuando todo el filtrado se recibe de la celda de ensayo en un tiempo menor

a 30 minutos, la siguiente ecuación se utiliza para calcular un valor hipotético de filtrado a los 30 minutos (se extrapola).

$$F_{30} = F_t \frac{5,477}{\sqrt{t}}$$

Donde F_{30} es el filtrado en 30 minutos y F_t es el filtrado en un tiempo t de ensayo. El control de la filtración normalmente se obtiene agregando aditivos para esta finalidad y que son polímeros en las lechadas en concentraciones de 0.6 a 1.0% por peso de cemento. Un valor óptimo de pérdida de filtrado en 30 minutos y 1000 psi de presión es 100 cm^3 .

IV.2.4 CANTIDAD DE CEMENTO.

La cantidad de cemento a ser usada en una operación de cementación forzada puede variar de pocos sacos a varios cientos de ellos. El volumen promedio varía entre 100 y 200 sacos, sin embargo, este volumen dependerá de la cantidad de disparos o canales que serán inyectados a presión.

Si aplicamos una presión de forzamiento con la cual la formación es fracturada, un mayor volumen de lechada será necesario. El volumen requerido será una función de la amplitud y profundidad de las fracturas creadas. Se ha reportado que en algunas operaciones de forzamiento, las grietas generadas aceptaron volúmenes por más de 100 bls. de lechada. El volumen puede ser minimizado, si existe fracturamiento, por un bajo gasto de bombeo y manteniendo la presión de inyección abajo de la presión de propagación de las fracturas. Si el forzamiento es ejecutado a altas presiones y altos gastos, la fractura se propagará, y será necesario bombear grandes cantidades de lechada a la formación.

El volumen de la lechada no puede ser determinado con precisión y la experiencia en un trabajo vecino puede darnos una aproximación. Sin embargo, hay algunas reglas que podemos citar:

1. El volumen no debe exceder la capacidad de la sarta corrida.
2. Deben usarse dos sacos de cemento por pie de intervalo perforado.
3. El volumen mínimo puede ser de 100 sacos si el gasto de inyección es de 2 bls/min. después de fracturar, de otra manera deben ser 50 sacos.
4. El volumen no debe ser tan grande como para formar una columna que no pueda ser sacada.

La presión hidrostática y superficial debe ser controlada durante la operación. Una alta columna de cemento durante el desplazamiento podría causar la fractura de la formación. Cuando grandes cantidades de cemento son necesarias (fracturas naturales), el uso de lechadas de baja densidad es recomendada.

IV.2.5 FLUIDOS DE REPARACION.

Donde las condiciones del pozo lo permitan agua salada o agua dulce son los fluidos de reparación preferidos tanto para los trabajos de baja presión como de alta presión. Sin embargo, aún usando fluidos limpios y con presiones suficientes para fracturar la formación, si el pozo ha sido perforado con lodo, o si las perforaciones de los disparos están llenas o parcialmente taponadas por lodo, uno de los mejores caminos para asegurar una depositación uniforme del cemento es circular una solución de ácido clorhídrico (HCL) débil o ácido acético. El ácido contrae las partículas de arcilla y permite el ingreso de la lechada de cemento.

IV.2.6 EQUIPO SUPERFICIAL.

El equipo superficial debe ser diseñado para poder aplicar la máxima presión de trabajo (forzamiento). Aun siendo este un procedimiento básico es raramente denotado y es un descuido común. La presión necesaria para desplazar la lechada no debe exceder la capacidad de trabajo del equipo superficial así como las limitaciones de presión máxima de la TR durante la operación. Al presentarse un esfuerzo prematuro o cualquier otro no previsto, el exceso de lechada, al finalizar la operación, no se saca de inmediato. Esto necesitaría un tiempo de circulación mas prolongado lo cual sería extremadamente peligroso, porque excedería el tiempo de bombeo de la lechada. Una consideración básica es que el volumen

de la lechada no debe exceder el volumen del espacio anular; para prevenir un esfuerzo prematuro.

IV.2.7 CONDICIONES DEL AGUJERO.

El agujero debe circularse hasta limpiarlo y estabilizado. Si el agujero no está estabilizado, se agravaría el procedimiento de trabajo. Si suficiente gas como para desestabilizar el sistema queda atrapado, el pozo trataría de cabecear causando falla en la cementación forzada. Un gas no previsto dentro de la formación, delante de la lechada, podría colapsar el cemento y dejarlo carcomido, (formando canales).

IV.2.8 RESISTENCIA DEL CEMENTO.

La resistencia a la compresión requerida para un trabajo exitoso de cementación requiere de mucho cuidado. El aspecto de la cavidad típica de los disparos tiende a hacer que la colocación del cemento actúe como una válvula check en ambas direcciones. Una fractura inducida por el llenado de cemento tiene mayor área de adherencia. Por tal motivo esta es capaz de resistir mayor presión diferencial que la cavidad de un disparo. La contaminación por lodo en el cemento puede reducir grandemente el esfuerzo compresivo, tanto que podría ser muy significativo. (Tabla IV.5). Un forzamiento exitoso está directamente relacionado a la apropiada colocación de la lechada.

IV.2.9 DENSIDAD DE LA LECHADA.

La densidad de una lechada en todos los trabajos de cementación, excepto en las cementaciones a presión, debe ser lo suficientemente elevada para controlar el pozo. Existen varias formas de controlar la densidad. La tabla IV.6 muestra los aditivos que se utilizan para controlar la densidad. Para bajas densidades, 10.8 a 15.6 lb. /gal se utilizan materiales que requieren mucho volumen de agua. Para densidades elevadas, 15.6 a 22.0 lbm/gal se utilizan dispersantes y aditivos densificantes, tales como barita, hematita, etc.

TABLA IV.5 COMPARACION DE ESFUERZOS DE UN CEMENTO FRAGUADO Y UN CEMENTO DESHIDRATADO EN NUCLEOS (PSI)				
Agente de Pérdida de Fluido (%)	Esfuerzo de cemento Fraguado después de 24 horas de cura		Esfuerzos de núcleos deshidratados después de 8 horas de cura.	
	800 psi 95 °F	3000 psi 140 °F	800 psi 95 °F	3000 psi 140 °F
Cemento API clase G				
0.0	2085	4545		
0.8	980	3515	2400	12400
1.0	800	3440	2080	12200
1.2	580	3525	400	12100
Cemento Pórtland con 2% de cloruro de calcio				
0.8	2075	4000+	3160	12000+
1.0	1975	4000+	3400	12000+
1.2	1920	4000+	3280	12000+

TABLA IV.6 ADITIVOS PARA CONTROLAR LA DENSIDAD DE LA LECHADA			
Densidad (lbm/gal)	Agua (gal/saco)	Aditivos	Concentración del aditivo (lb./saco)
11.0	25	Tierras de diatomea	40
12.0	13	Bentonita + dispersante	12 + 1
13.0	10.5	Bentonita	8
14.0	6.0	Puzolanas	50
15.0	5.8	Ninguno	--
16.0	4.4	Ninguno	--
17.0	4.0	Dispersante	1
18.0	4.0	Dispersante + densificante	1 + 12
19.0	4.0	Dispersante + densificante	1 + 28
20.0	4.0	Dispersante + densificante	1 + 46
21.0	4.0	Dispersante + densificante	1 + 71

En las operaciones de campo, la densidad se controla con una balanza de lodos estándar. Figura IV.2.

Para corregir los defectos de medición de densidad, se fabrican balanzas presurizadas (figura IV.3), las cuales al presurizar la lechada 30 psi aproximadamente, reducen las burbujas de aire entrampadas en la mezcla a un mínimo espacio.

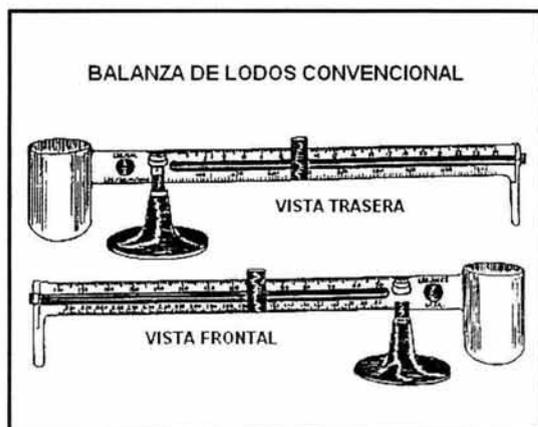


FIGURA IV.2 BALANZA DE LODOS CONVENCIONAL

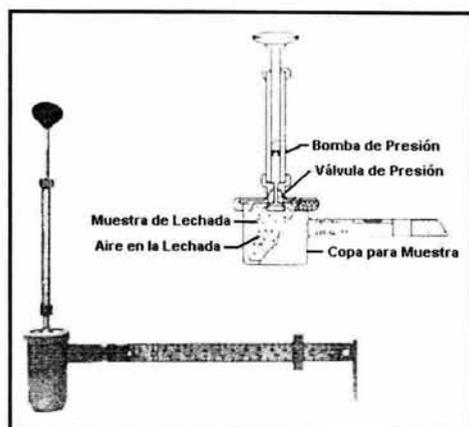


FIGURA IV.3 BALANZA DE LODOS PRESURIZADA

DENSIMETRO NUCLEAR BJ.

Tiene una fuente radioactiva y está conectada a la descarga de las bombas triplex, la medición es instantánea y continua a través de un visor digital. El densímetro nuclear BJ es una unidad monitor liviano y portátil para controlar la densidad, capaz de exhibir y de registrar la densidad de lechadas de cemento, continuamente en cualquier trabajo de cementación. La densidad de la lechada es exhibida en una pantalla digital de cristal líquido, y se registra en un registrador integral a cinta. La unidad tiene una fuente radioactiva de Cesium - 137, la cual está fijada a una unión corta colocada en la línea de descarga; una robusta unidad detectora; una unidad portátil monitor y registradora, y una unidad opcional de lectura remota con pantalla de cristal líquido. La calibración del sistema electrónico es muy simple. El punto cero es fijado con una perilla con respecto al agua dulce, y la luz con una segunda perilla con respecto a una fuente conocida, la cuál es por lo general una barra de metal calibrada.

Al controlar la línea de descarga presurizada, el Densímetro Nuclear nos da una determinación exacta y continúa de la densidad real de la lechada. La unidad puede ser alimentada con 12 voltios DC o con 115 voltios AC/ 60 Hz.

VENTAJAS.

Exactitud – Debido a que el Densímetro Nuclear controla la lechada altamente presurizada en la línea de descarga, el aire atrapado es minimizado, y se obtiene una determinación exacta de la lechada.

Control continuo y al instante - El Densímetro Nuclear controla la descarga de las bombas triplex de alta presión, y no una línea de muestro o una copa presurizada; por lo tanto, provee una presentación continua e instantánea de la densidad de la lechada de cemento.

Facilidad de calibración – Este densímetro es muy fácil de calibrar. El punto cero es fijado con una perilla con respecto al agua dulce, y la luz con una segunda perilla con respecto a una fuente conocida.

Confiabilidad – Sus componentes resistentes y de estado sólido hacen del Densímetro Nuclear un confiable trabajador en el campo.

La tabla IV.7 muestra diferentes valores de densidad obtenidos con diversos métodos de medición.

IV.2.10 RESISTENCIA AL ATAQUE DE LAS SALMUERAS DEL POZO.

Las salmueras de las formaciones que contienen sulfato de sodio, sulfato de magnesio y cloruro de magnesio, son consideradas entre los agentes más destructivos para los cementos en el fondo del pozo.

Densidad de Lechada Calculada (lbs/gal)	Medición con balanza de lodos (lbs/gal)	Balanza presurizada (lbs/gal)	Densímetro Nuclear (lbs/gal)
11.1	9.9	10.9	11.2
13.3	12.8	13.2	13.4
19.0	18.2	18.7	19.1
19.5	18.3	19.2	19.6
19.5	18.5	19.3	19.5

Los sulfatos generalmente son considerados como los productos químicos más corrosivos con respecto al cemento fraguado en el fondo del pozo. Ellos reaccionan con los cristales de calizas y de aluminato tricálcicos. Estos cristales requieren un mayor volumen que el provisto por el espacio poral en el cemento fraguado, y dan por resultado una excesiva expansión y deterioro del cemento.

IV.2.11 PRESION FINAL DE FORZAMIENTO.

La selección de la presión final a alcanzar en una operación de forzamiento es muy importante por que ello define cuando el trabajo se ha completado. Hay muchas maneras de estimar la presión final pero la experiencia en un determinado yacimiento es probablemente la mejor, especialmente cuando zonas de extremadamente altas o bajas presiones se encuentran en un pozo a determinada profundidad.

Si el cemento se deshidrata dentro de la TR, la presión aplicada se ejerce solamente en la TR. Si la operación es exitosa y la presión aplicada es alta para esa profundidad, hay una tendencia a considerar esa presión como la mínima presión final requerida para un buen trabajo. Sin embargo, un trabajo exitoso puede a menudo ser obtenido con una presión considerablemente menor. Por seguridad se asume que cualquier presión ejercida debajo del empacador es aplicada al exterior de la TR, debido a que puede existir un canal que permita que esa presión sea transmitida a través de la TR por arriba del empacador, se debe

considerar siempre la máxima presión de colapso que la TR puede soportar con seguridad. La diferencia entre esta presión y la máxima de trabajo es la cantidad de presión que debemos aplicar al anillo para proteger la TR. Esta presión debe ser calculada sobre la base de la presión de tratamiento en el fondo del pozo. La siguiente figura IV.4 ilustra el mecanismo de colapso de la TR en una operación de este tipo.

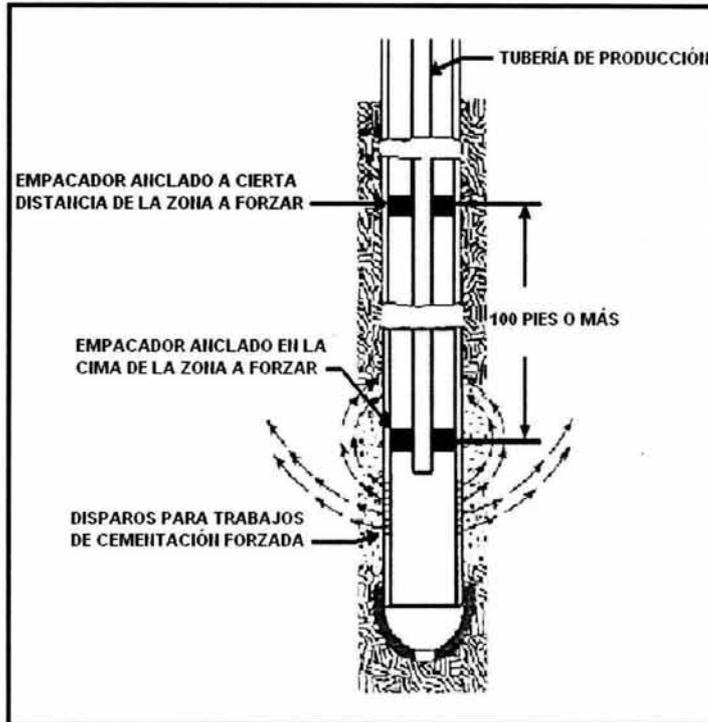


FIGURA IV.4 MECÁNICA DE UN TRABAJO DE CEMENTACIÓN FORZADA

IV.2.12 TIEMPO DE ESPESAMIENTO.

Como en una cementación primaria, la temperatura y la presión son factores importantes que influyen en el tiempo de colocación de la lechada de cemento. En una cementación forzada las temperaturas encontradas pueden ser más altas que en una cementación primaria, por lo tanto la lechada debe ser diseñada para prevenir fraguados prematuros.

En un pozo somero la lechada debe ser diseñada para un corto tiempo de bombeo (2 horas). Los aceleradores son comúnmente usados. Por otro lado, un trabajo forzado dudoso podría requerir un tiempo largo de bombeo como de 6 horas. Por consiguiente, uno debe añadir suficiente retardador para asegurar la colocación de la lechada, y regresar el exceso de lechada.

IV.2.13 ESPACIADORES Y LAVADORES.

Hay dos principales puntos para el éxito de colocación del cemento.

- Limpiar las perforaciones y vacíos en los alrededores. Sólidos acarreados por fluidos con lodo de perforación deben ser removidos de los canales de las perforaciones y la cara de la formación, para permitir un apropiado proceso de deshidratación y completo llenado.
- Evitar la contaminación de la lechada de cemento. Las propiedades de la lechada, tales como pérdida de fluido, tiempo de espesamiento y viscosidad pueden ser modificadas por el contacto del cemento con los fluidos de terminación. Una pequeña cantidad de lechada contaminada, tiene un alto rango de pérdida de fluido o alta viscosidad, podrían fácilmente bloquear los canales y evitar la óptima colocación de la lechada.

En bajas presiones de forzamiento, los tratamientos descritos para el primer punto son cumplidos como una etapa separada. Usualmente, la contaminación de la lechada de cemento es evitada al bombear un volumen espaciador compatible delante y detrás de este mismo. Si el cemento no es contaminado, un fluido lavador de ácido débil en solución se utiliza como frente de la lechada y separados por un fluido compatible.

IV.2.14 VISCOSIDAD.

La habilidad de la lechada para fluir dentro de los canales estrechos es proporcional a su fluidibilidad. Lechadas espesas, aunque usuales en cementación de grandes vacíos, no fluirán dentro de pequeñas restricciones y en ellas son sometidas a altas presiones

diferenciales, las cuales son limitadas por la presión de fractura de la formación. Por ello, en lechadas con baja viscosidad es común usar dispersantes.

IV.2.15 RELACION AGUA-CEMENTO.

La correcta relación agua-cemento que se debe tener en cuenta al preparar una lechada lo cual es de gran importancia para obtener una buena cementación. Al preparar la lechada, es necesario usar la cantidad de agua suficiente para asegurar una completa hidratación de los constituyentes del cemento.

El cemento común requiere aproximadamente 20% de su peso en agua para lograr una hidratación completa, pero por pruebas de laboratorio se ha experimentado, que se necesita casi el doble de esta cantidad de agua para que la mezcla sea bombeable. En ocasiones es conveniente usar lechadas espesas, utilizando poca cantidad de agua. Estas mezclas ayudan a desplazar el lodo por delante, teniendo menos peligro de contaminación, pero también se corre el riesgo de que el cemento fragüe antes de haberse bombeado al lugar programado.

La cantidad correcta de agua que se debe emplear se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$AR = \frac{P - (D \times V)}{D - 1}$$

Donde:

AR = Agua requerida (lt/saco)

P = Peso total de los productos (kg)

D = Densidad de lechada requerida (kg/lt)

V = Volumen total de los productos (lt)

Cabe mencionar que para calcular el volumen total de la mezcla se obtiene primeramente el volumen de cada producto con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\text{Peso del producto}}{\text{Densidad del producto}}$$

El rendimiento de lechada (R) en lt/saco se calcula como:

$$R = AR + V$$

El peso y volumen de la lechada de cemento producida por las diversas relaciones agua/cemento se pueden determinar con la gráfica de Peso de lechada-Peso específico de la figura IV.5, siempre y cuando se trate de cementos sin modificar.

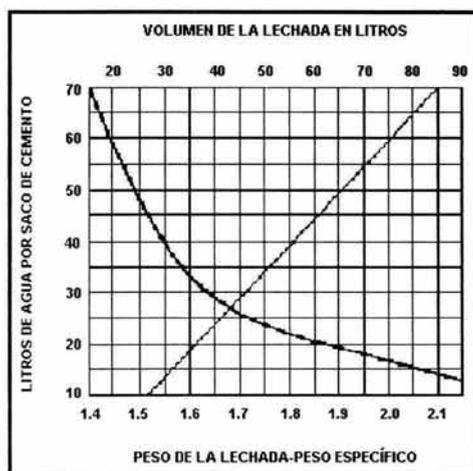


FIGURA IV.5. GRÁFICA PESO LECHADA – PESO ESPECÍFICO.

IV.3 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO.

La caracterización de los cementos y materiales de cementación en el laboratorio involucra la aplicación de técnicas específicas para una apropiada descripción química o física. Esta identificación físico-química puede incluir una determinación cualitativa de los elementos

químicos presentes y una medición cuantitativa de uno o más de estos elementos además de una determinación de las propiedades físicas de uno o más de estos componentes.

IV.3.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND.

El análisis químico al cemento en polvo es realizado a sus cuatro principales componentes (silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y aluminato ferroso tetracalcico), yeso y óxidos. La difracción de rayos x (XRD) es comúnmente usada en el laboratorio para determinar sus componentes cualitativamente. Un análisis cuantitativo es obtenido por métodos químicos y algunos de estos son de absorción atómica (AA) o emisión de plasma (ICP/DCP), y rayos x fluorescentes (XRF).

IV.3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA PUREZA DEL CEMENTO.

La caracterización física de la pureza del cemento en el laboratorio usualmente incluye medición de las partículas y su distribución, área de superficie y gravedad específica. La determinación del área superficial es frecuentemente realizada usando un permeámetro Blaine (ASTM C 204). El aparato es usado para medir la permeabilidad del aire a través de la muestra y el resultado es usado para evaluar el área de superficie. Otra técnica para determinar el área de superficie utiliza el turbidímetro, en el cual el cambio de la intensidad del rayo de luz pasando a través de las partículas en suspensión puede determinar el tamaño de las partículas, el turbidímetro Wagner es usado comúnmente para determinar el tamaño de las partículas por este principio (ASTM C 115). Una limitación de este método es que asume que la partícula es esférica. Un método común para la determinación de la gravedad específica del cemento en el laboratorio es el uso del matraz Le Chatelier (ASTM C 188). El procedimiento es simple. El uso de un picnómetro es preferible (ASTM C 128).

IV.3.3 ANÁLISIS QUÍMICO DEL CEMENTO SECO

Los análisis químicos del cemento seco, proveen una indicación exacta de la homogeneidad de la mezcla. Algunos análisis involucran técnicas de separación para aislar algún material de interés. Retardadores y dispersantes son estructuras químicas que pueden absorber la radiación ultravioleta, por lo tanto estos materiales pueden ser determinados por

espectrofotometría de absorción UV (ASTM C 114). Esta técnica puede ser aplicada a aditivos para pérdida de fluidos.

IV.4 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA LECHADA DE CEMENTO

Las pruebas de laboratorio efectuadas a una determinada mezcla de cemento, se realizan tratando de encontrar la concentración óptima de cada uno de los aditivos requeridos conforme a las normas API y a la vez no alterando las condiciones ideales de viscosidad de la lechada y la compatibilidad de los retardadores de fraguado con otros aditivos como son: Reductores de pérdida de fluido, reductores de pérdida de presión por fricción, Antiespumantes, y otros que dependen de las condiciones de temperatura y presión a las cuales vaya a ser sometida la lechada. La norma API RP 10B delinea las prácticas recomendadas para las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para pozos de petróleo así como sus aditivos.

Estas pruebas se describen a continuación:

1. Determinación del contenido de agua de la lechada.
2. Determinación de la densidad.
3. Prueba de resistencia a la compresión.
4. Determinación del tiempo de bombeabilidad.
5. Determinación del filtrado.
6. Pruebas de permeabilidad.
7. Determinación de las propiedades reológicas.

PREPARACION DE LECHADAS EN EL LABORATORIO.

Aparatos y equipo adicional empleado.

- Balanzas para medir cantidades exactas de cemento y aditivos sólidos.
- Recipientes de vidrio graduados para medir los volúmenes exactos de agua y aditivos líquidos.
- Mezclador, similar a una batidora de cocina.

IV.4.1 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA.

Agua normal.

El contenido de agua normal de una lechada de cemento es lo que cede una lechada que tiene 11 unidades de consistencia luego de haber sido agitada durante 20 minutos, a 27 °C de temperatura en un consistómetro a presión atmosférica. Las unidades Bearden de consistencia son adimensionales, pero a veces se refiere a ellas como poises por costumbre. Para determinar el contenido normal de agua de una lechada a veces hay que hacer muchas pruebas con diferentes porcentajes de agua.

Agua mínima.

El mínimo contenido de agua de una lechada es aquel que hace lograr a la misma una consistencia de 30 unidades luego de haber sido agitada durante 20 minutos en un consistómetro a presión atmosférica y 27 °C de temperatura.

Agua libre.

Una vez que se ha preparado una lechada en el mezclador se le agita en un consistómetro a presión atmosférica, se le vuelve a pasar por el mezclador y luego se le deja en un cilindro de vidrio graduado de 250 ml, perfectamente tapado para evitar la evaporación. Al cabo de 2 horas de reposo se habrá acumulado agua en la parte superior del recipiente, ese volumen de agua, expresado en milímetros, es el contenido de agua libre de la lechada.

IV.4.2 DENSIDAD DE LA LECHADA.

Se utiliza una balanza de lodos que puede ser presurizada o no. En el laboratorio se pondrá cuidado especial en eliminar todo el aire contenido en la muestra de cemento.

IV.4.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA.

Se vierte la lechada de cemento en estudio en una serie de moldes, cubos de 5 cm. de lado y se le coloca en un baño de agua corriente a la temperatura requerida por la prueba. Estos pueden ser.

- a) Un recipiente a presión atmosférica para muestra a temperaturas de hasta 82 °C.
- b) Un recipiente presurizable para muestras a temperaturas de hasta 193 °C y presiones de hasta 210 Kg. /cm².

El segundo método es mejor que el primero, ya que nos permite simular las condiciones que se presentan en el pozo con más exactitud.

Los tiempos que se recomiendan para sacar las muestras son 8, 12, 18, 24, 36, 48 y 72 horas. Por lo general las pruebas a las 8, 24, 48 y 72 horas son suficientes, aunque a veces se necesita más información para los tiempos de espera de fraguado u otros datos.

Una vez que se retiran los cubos de baño, se les coloca inmediatamente en una prensa hidráulica que incrementa la carga entre 70 y 280 Kg./cm² por minuto. Cuando se rompe el cubo se lee la máxima presión obtenida en la escala y éste será el valor de la resistencia a la compresión. Se deberá repetir la operación con varias muestras y luego sacar el promedio.

IV.4.4 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD.

Tal vez sea esta la prueba de laboratorio más usada en el campo. Determina cuanto tiempo la lechada permanece en estado fluido (y por consiguiente bombeable) bajo una serie de condiciones dadas en el laboratorio (presión y temperatura).

El aparato que se usa para determinar el tiempo de bombeabilidad es el consistómetro, que puede ser atmosférico o presurizable.

El recipiente con la lechada a probar gira a velocidad constante (movido por un motor eléctrico) dentro de un baño de aceite través del cual se le aplica la temperatura y presión deseada. Dentro del recipiente aislado hay una paleta conectada a un resorte. A medida que la lechada gira, trata de arrastrar la paleta en el sentido de la corriente. Una lechada más viscosa ejercerá una fuerza mayor en la paleta, lo cual a su vez transmitirá mayor torque al resorte y esto se mide por medio de un potenciómetro del que está dotado el aparato. El consistómetro está calibrado para poder leer directamente las unidades Bearden de

consistencia (Bc). Cuando la lechada alcanza 100 unidades se torna imbombeable. Así el tiempo de bombeabilidad reportado por el laboratorio será el transcurrido desde que se introduce la mezcla en el consistómetro hasta que el aparato marca 100 Bc. La presión y temperatura aplicada son aquellas que indican la norma API RP 10B. Especifica la forma en que se debe desarrollar la prueba que corresponderá a las condiciones aproximadas que se tendrán en el campo cuando se cimente a una determinada profundidad.

Los programas están especificados separadamente para cementaciones primarias, liners y cementaciones a presión. El procedimiento consiste en preparar la lechada a probar, colocándola en su lugar en el consistómetro, aplicar presión y temperatura de acuerdo a lo que especifiquen la cédulas y obtener en el aparato la gráfica de la variación de la viscosidad de la lechada en función del tiempo.

Al finalizar la prueba la lechada debe eliminarse de inmediato, sacándola del instrumento antes de que fragüe por completo, ya que de no hacerse así podría dañarse el aparato.

La gráfica tiene marcada en el eje de las el voltaje que va de 0 a 15 volts, con divisiones de 2.5 volts y en el eje de las ordenadas el tiempo en horas, con divisiones de 10 minutos (Figura IV.6). En el margen izquierdo del eje de las ordenadas, están marcados los periodos de tiempo en los cuales la lechada permanece estática.

La gráfica va mostrando a partir del origen como va aumentando la viscosidad o sea el fraguado de la lechada. Cuando la gráfica alcanza 8.8 volts, la lechada deja de ser bombeable, y convirtiendo a UC (unidades que sustituyen al poise) por medio de una tabla de equivalencia, se obtiene que a este voltaje corresponden 70 UC.

El fraguado de la lechada se tiene en el punto en donde la gráfica alcanza los 12 volts y equivale a 100 UC.

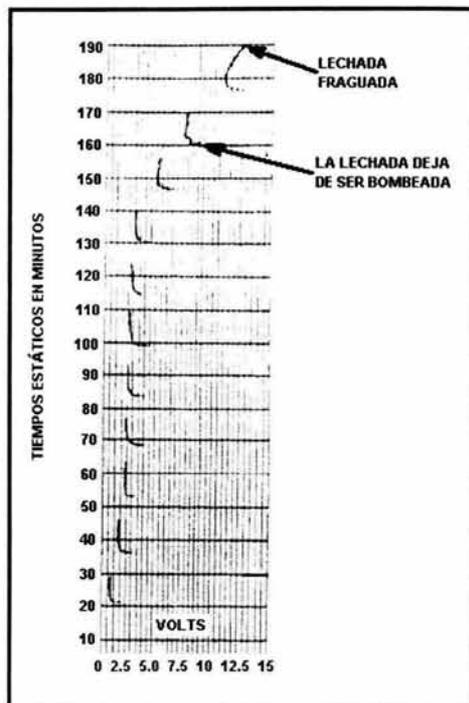


FIGURA IV.6 GRÁFICA DE VISCOSIDADES VS. TIEMPO DEL CONSISTOMETRO.

IV.4.5 DETERMINACION DEL FILTRADO.

APARATOS

Filtro prensa para alta o baja presión.

Balanzas para medir las cantidades exactas de cemento y aditivos sólidos.

Mezclador similar a una batidora de cocina.

Filtro # 325 (45 micrones) de la U. S. Standard Sieve Screen., deberá estar sostenido por una malla más fuerte para soportar la presión diferencial.

Recipientes de vidrio graduados para medir los volúmenes exactos de agua y aditivos líquidos.

El medio de presión es aire comprimido, nitrógeno o CO_2 .

Una vez que se ha mezclado la lechada correctamente, se le vierte en el filtro prensa, se le tapa y aplica presión.

Filtrado de baja presión: Se aplica presión de 7 Kg./cm^2 , y se va leyendo la cantidad de líquido que cae en el cilindro graduado a los $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 2 y 5 minutos de iniciada la prueba y luego a intervalos de 5 minutos. Si la muestra se deshidrata totalmente antes de media hora, se registra el tiempo en que tardó en hacerlo, el filtrado se reporta en $\text{cm}^3/30$ minutos a una presión de 7 Kg./cm^2 .

Filtrado de alta presión: La presión aplicada será de 70 Kg. /cm^2 , y las lecturas se efectuarán de la misma manera. Si la muestra se deshidrata antes de los 30 minutos se extrapola para reportar en $\text{cm}^3/30$ minutos. Así durante el ensayo para la determinación del filtrado se supone que hay más lechada presente que lo que realmente se tiene en el recipiente, que por otro lado es lo que sucede en el pozo.

El filtro prensa de alta presión incorpora también un daño a una temperatura controlable a fin de simular las condiciones reales. La temperatura a la cual se hizo la prueba deberá estar registrada en el reporte.

Debido a esta ventaja el filtro de alta presión se utiliza más que el de baja y los resultados obtenidos son expresados como $\text{cm}^3/30$ minutos a una presión de 1000 lb./pg^2 .

IV.4.6 PERMEABILIDAD.

Se utiliza un aparato llamado permeámetro que mide la permeabilidad de las muestras de cemento fraguado de acuerdo a la ley de Darcy.

IV.4.7 PROPIEDADES REOLOGICAS.

El viscosímetro de Fann es un aparato de tipo rotatorio movido por un rotor sincronizado a dos velocidades diferentes, que permite obtener velocidades de 3, 6, 100, 200, 300, y 600 RPM.(Figura IV.7). Un cilindro exterior o rotor, gira a una velocidad constante para cada ajuste de RPM, que es transmitido a la lechada de cemento que lo rodea y esta a su vez, produce un cierto torque en el cilindro interior sobre el que actúa un resorte. La torsión que adquiere el resorte puede relacionársela con la viscosidad de la lechada y medirla de esta manera. Las lecturas obtenidas se emplean para la determinación de las propiedades reológicas (n' y k') que son de fundamental importancia para el cálculo de caudales críticos y determinación del régimen de desplazamiento (turbulento o laminar) de las cementaciones.

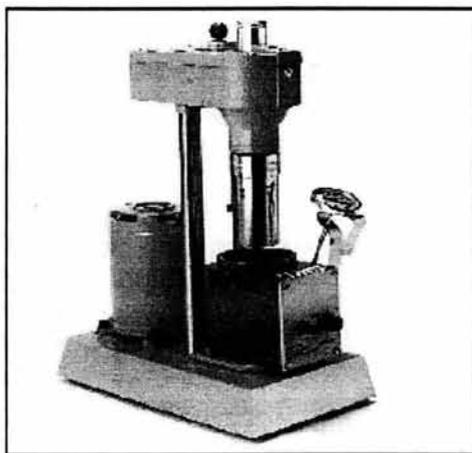


FIGURA IV.7 VISCOSIMETRO FANN

Donde:

n' = Índice de comportamiento.

k' = Índice de consistencia.

Las pruebas que se han visto están determinadas por la norma API RP 10B, pero a veces se necesita información específica para un cemento especial o para una lechada en particular. En estos casos se hacen pruebas para determinar compresibilidades del cemento y del espaciador con el lodo, análisis de agua, granulometría, etc.

IV.5 REOLOGIA.

La reología es ciencia a la que concierne el estudio de la fluidez de la materia y la deformación de los cuerpos bajo la acción de fuerzas externas. Las ecuaciones que describen el flujo de algún fluido son las ecuaciones de conservación de masa, movimiento y energía. Estas no pueden por si solas ayudarnos, sin que se tengan que considerar una o más ecuaciones las cuales relacionen la deformación del fluido con la fuerza aplicada.

IV.5.1 MODELOS REOLOGICOS.

Dentro de los modelos reológicos existen dos categorías: aquellos cuyo comportamiento no depende del transcurso del tiempo y los que si varían su comportamiento durante el paso del tiempo. Para fluidos tales como la lechada de cemento, la viscosidad no es solo función del valor del esfuerzo cortante que está siendo aplicado. Estos fluidos exhiben un comportamiento dependiente del tiempo los cuales son aun más difíciles de caracterizar. Sin embargo, para propósitos de prácticas de campo, las lechadas de cemento son representadas por medio de modelos independientes del tiempo.

IV.5.2 MODELOS REOLOGICOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

MODELO NEWTONIANO

En este modelo, el esfuerzo cortante es proporcional al valor de corte; por lo que la viscosidad es una constante (η) la cual es usualmente expresada en cp.

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

Donde:

η = Viscosidad dependiente del valor de corte.

τ = Esfuerzo de corte.

$\dot{\gamma}$ = Valor de corte.

Los fluidos newtonianos usados en las operaciones de cementación son agua, algunos lavadores químicos, gasolina y aceite ligero.

MODELO NO-NEWTONIANO

La mayoría de las lechadas de cemento exhiben un comportamiento no-newtoniano. Generalmente su viscosidad es función del valor del esfuerzo cortante, y también de la historia de esfuerzo. Una distinción es hecha usualmente entre fluidos adelgazadores para los cuales la viscosidad decrece con el valor del esfuerzo cortante y para fluidos espesores es a la inversa. Generalmente hablando las lechadas de cemento caen dentro de la primera categoría, y los modelos más populares que describen las propiedades reológicas de las lechadas son el modelo de ley de potencia y el modelo plástico de Bingham.

La ecuación del modelo de ley de potencias puede ser escrita como:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Donde n es llamado el índice de ley de potencia, es un parámetro adimensional el cual cuantifica el grado de comportamiento no-newtoniano del fluido (para fluidos adelgazadores $n < 1$).

El valor k , se expresa en $\text{lbf seg}^n / 100 \text{ pies}^2$, es conocido como el índice de consistencia debido a que este proporciona la viscosidad aparente de un fluido.

La curva del modelo de ley de potencias es la línea que pasa a través del origen. La correspondiente viscosidad aparente decrece con el valor del esfuerzo. Esto no es físicamente razonable sin alguna restricción, debido a que existirá un límite finito en la viscosidad a altos valores de corte para algún tipo de fluido; no obstante, el modelo de ley de potencias ha sido encontrado para representar el comportamiento de muchos tipos de fluidos, incluyendo las lechadas de cemento, sin tener un límite en el valor del esfuerzo cortante.

El modelo de plástico de Bingham está representado por la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Sí } \tau &\geq \tau_y \\ \tau &= \tau_y + \mu_p \cdot \gamma \\ \text{Sí } \tau &\leq \tau_y \\ \gamma &= 0 \end{aligned}$$

Este es el modelo más simple que describe el comportamiento de un tipo de fluido en especial el cual no fluye a menos que sea sometido a un mínimo esfuerzo, llamado esfuerzo de cedencia (τ_y). El esfuerzo de cedencia está expresado en unidades de fuerza lbf / 100 pies².

Arriba del esfuerzo de cedencia, el modelo plástico de Bingham asume que el esfuerzo cortante es linealmente relacionado al valor de la velocidad de corte. Este modelo sufre de serias limitaciones

Como se discutió anteriormente, las propiedades de una lechada de cemento deben ser de acuerdo a las características de la formación a forzar, y la técnica a ser usada. Esto es generalmente convenido tal que una lechada debe ser diseñada para tener los siguientes atributos generales:

- Baja viscosidad- esto permite que la lechada penetre en las pequeñas grietas.
- Bajo esfuerzo gel- un sistema de gel restringe el movimiento de la lechada y causa incremento en la presión de superficie.
- Sin agua libre
- Apropiado control de pérdida de fluidos- para asegurar un óptimo llenado de las grietas o los disparos, y
- Apropiado tiempo de espesamiento- para asegurar con anticipación el tiempo de trabajo.

Las especificaciones para probar una lechada de cementación forzada son establecidas en el API especificación 10 (1988).

CAPITULO V. METODOS DE EVALUACIÓN PARA LA CEMENTACIÓN FORZADA.

V.1 INTRODUCCIÓN.

La cementación exitosa de las tuberías de revestimiento y tuberías cortas es una operación difícil que requiere de una planeación apropiada del trabajo en función de las condiciones del pozo y de un acondicionamiento de los mecanismos de presión involucrados durante la colocación de la lechada de cemento. Las causas de los malos trabajos de cementación pueden ser clasificadas en dos grandes categorías.

1. Problemas de flujo de origen mecánico.

- Tuberías mal centralizadas en pozos desviados
- Agujeros derrumbados
- Preflujo ineficiente
- Régimen de flujo incorrecto

Estas condiciones se caracterizan por una remoción incompleta del lodo en el espacio anular del cemento.

2. Degradación de la lechada de cemento durante la etapa de curado.

Experimentos de laboratorio confirmados por pruebas de campo han demostrado que la presión diferencial entre la presión de poro del cemento y la presión de formación es la causa de muchas fallas en las cementaciones.

Medidas de laboratorio han demostrado que un cemento bien fraguado tiene una permeabilidad del orden de 0.001 md, y una porosidad de al rededor de 35 %. Sin embargo cuando se permite que el gas migre dentro de la lechada antes de complementarse el fraguado, la estructura de poros es parcialmente destruida y el gas genera una red de poros

tubulares los cuales pueden alcanzar hasta 0.1 mm de diámetro y crear permeabilidades tan altas como 1 a 5 md. Este cemento "gaseoso", a pesar que soporta la TR, no es capaz de proporcionar un sello apropiado para el gas de la formación. Se tienen disponibles ciertos aditivos que previenen este mecanismo y aseguran un aislamiento apropiado de la zona en intervalos que contienen gas.

Un programa de evaluación de la cementación deberá ser capaz de determinar no solo la calidad de la operación de cementación o la necesidad de trabajos de reparación, sino también analizar las causas de las fallas con el fin de mejorar el programa de cementación de futuros pozos en el mismo campo.

V.2 EVALUACIÓN DE UNA CEMENTACIÓN

Cuando las operaciones de cementación primaria han sido terminadas, debe establecerse el grado de adherencia del cemento con la tubería y la formación.

Antes de correr los registros para evaluar la adherencia del cemento, se prueba el aislamiento hidráulico o la localización de la cima del cemento. El primer tipo de prueba requiere casi siempre disparar la TR o disparos adicionales. En casos donde solo el soporte de la tubería es requerido, la localización de la cima del cemento es suficiente. En otros casos donde el aislamiento de una zona es requerido, métodos más sofisticados deben ser empleados. El método de evaluación debe ser seleccionado de acuerdo al objetivo que se desea alcanzar. Las técnicas normalmente utilizadas para la localización de cemento detrás de las tuberías son las siguientes.

- Registro de temperatura
- Registros de medición de adherencia del cemento CBL-VDL
- Registros de evaluación del cemento (Densidad Variable)
- Trazadores radioactivos
- Pruebas de producción
- Empacador, tapón puente y presión de bombeo

V.3 EVALUACIÓN DE LOS TRABAJOS DE CEMENTACIÓN FORZADA

Es común la práctica de pruebas de presión a trabajos de cementación forzada después de que el tiempo de espera del cemento ha transcurrido. La última prueba para una exitosa operación de forzamiento es la evaluación. Un método de evaluación del forzamiento es la aplicación de presión diferencial. Esta práctica es aceptada en campo y en investigaciones es una prueba de éxito, aunque la evaluación completa de los efectos de la colocación del cemento, son obtenidos por diagnósticos de evaluación que determinan la colocación del cemento, si esta es donde se requería originalmente. Isótopos radioactivos pueden ser agregados a los fluidos que serán bombeados dentro del pozo, o mezclados en la lechada de cemento durante su colocación. Los trazadores indican si el cemento está en la posición deseada y la efectividad del aislamiento. Dos materiales radioactivos de uso común son Yodo ($I-131$) e Iridio ($Ir-192$). La vida media de estos materiales es de ocho días y 75 a 85 días respectivamente.

El registro de temperatura mide el cambio en el incremento de la temperatura al aumentar la profundidad, esta herramienta es bajada al interior del pozo. Una anomalía en la temperatura puede indicar la posición donde el cemento está colocado.

Registros de adherencia de un microsismograma, pueden ser usados para evaluar el éxito de la colocación de la lechada de cemento pero el método más efectivo para evaluar la colocación del cemento es la herramienta de evaluación de cemento (CET), desarrollada por Schlumberger. La CET evalúa los esfuerzos compresivos del cemento en el espacio anular.

La necesidad de evaluar una cementación forzada es determinar los requerimientos de las operaciones subsecuentes en el pozo.

V.4 PRUEBAS HIDRÁULICAS

La prueba hidráulica consiste principalmente en probar el aislamiento provisto por el cemento. Esta puede aplicarse después de los trabajos de cementación primaria, donde la zona de agua es localizada cerca de la zona de aceite o gas a ser producida. Puede ser

ejecutada después de una cementación secundaria para observar si los disparos han sido sellados correctamente.

Existen muchas técnicas usadas para evaluar el grado de aislamiento provisto por el cemento. Las técnicas más comunes son la prueba de presión y la prueba seca. En algunas ocasiones la calidad del cemento es establecida a través de una prueba de producción o de una prueba de comunicación a través de los disparos.

V.4.1 PRUEBA DE PRESIÓN

La prueba de presión es el método más común. Esta es aplicada generalmente después de la cementación de una TR superficial o intermedia, una vez que la zapata de la TR ha sido disparada. La presión dentro de la TR es incrementada hasta que la presión en la zapata es mayor que la presión que se espera aplicar en este punto durante la próxima fase de perforación. Una zapata que no soporta la presión indica una pobre cementación, y un trabajo de cementación forzada es requerido.

V.4.1.a PRUEBA DE PRESIÓN DIFERENCIAL POSITIVA

Después que el tiempo de espera del fraguado (WOC) ha finalizado, es común practicar la prueba a los disparos taponados. De cualquier forma, no debe ser considerada una prueba de habilidad del cemento para contener los fluidos de la formación en su lugar; mejor dicho, la prueba sirve como un método para diagnosticar las fallas del tratamiento forzado.

La presión aplicada en la cara de los disparos es predeterminada en la etapa de diseño del trabajo. Esto podría ser la presión de yacimiento, pero sin exceder la presión de fractura de la formación.

El enjarre de lodo se mantiene sobre 5000 psi (34.5 MPa) de presión diferencial cuando se aplica del pozo hacia la formación. Pero aún el mismo enjarre no puede soportar una significativa presión diferencial cuando es aplicada de la formación hacia el pozo.

V.4.1.b PRUEBA DE PRESIÓN DIFERENCIAL NEGATIVA

La universalidad de la reconocida técnica para confirmar si el cemento colocado mantendrá los fluidos de la formación bajo condiciones de producción consistente en aplicar una presión diferencial negativa en la cara de los disparos taponados. Esta es complementada por los siguientes pasos:

- Circulando un fluido ligero (a través de una tubería concéntrica),
- Sondear el pozo, y
- Correr una prueba seca (Figura V.1)

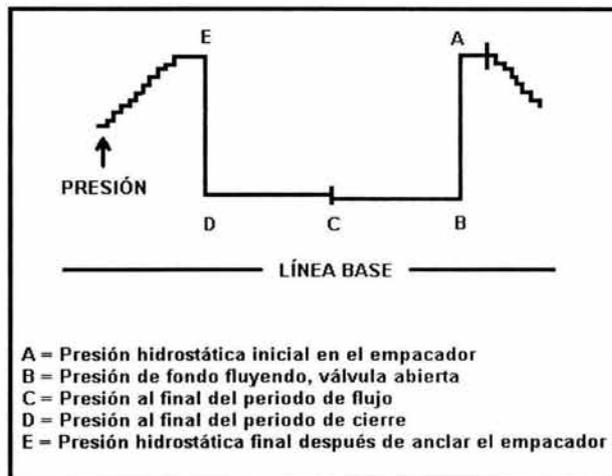


FIGURA V.1 PRUEBA SECA

Si el sello en los disparos es completo, sin flujo debe ser registrado en la gráfica de prueba de presión (Figura V.2).

V.4 2 PRUEBA SECA

La prueba seca es de hecho una prueba de formación (DST) especialmente aplicada para evaluar el aislamiento del cemento. La prueba seca es particularmente utilizada para probar la cementación forzada o el sellado del cemento en la cima de un liner. El objetivo de un DST es evaluar los parámetros de la formación para una afluencia dentro del pozo y elevar la

presión, el objetivo de una prueba seca es probar que cuando la presión es reducida dentro de la TR, nada entra al pozo. El éxito de una prueba seca es que no muestra cambios en la presión de fondo durante la apertura de la válvula de fondo, o durante el siguiente periodo de cierre. (Figura V.1). La prueba seca puede ser usada para probar el sellado del cemento al rededor de la TR, una vez que la TR ha sido disparada a través de un intervalo impermeable, o después de disparar fuera de la zapata en un intervalo impermeable.

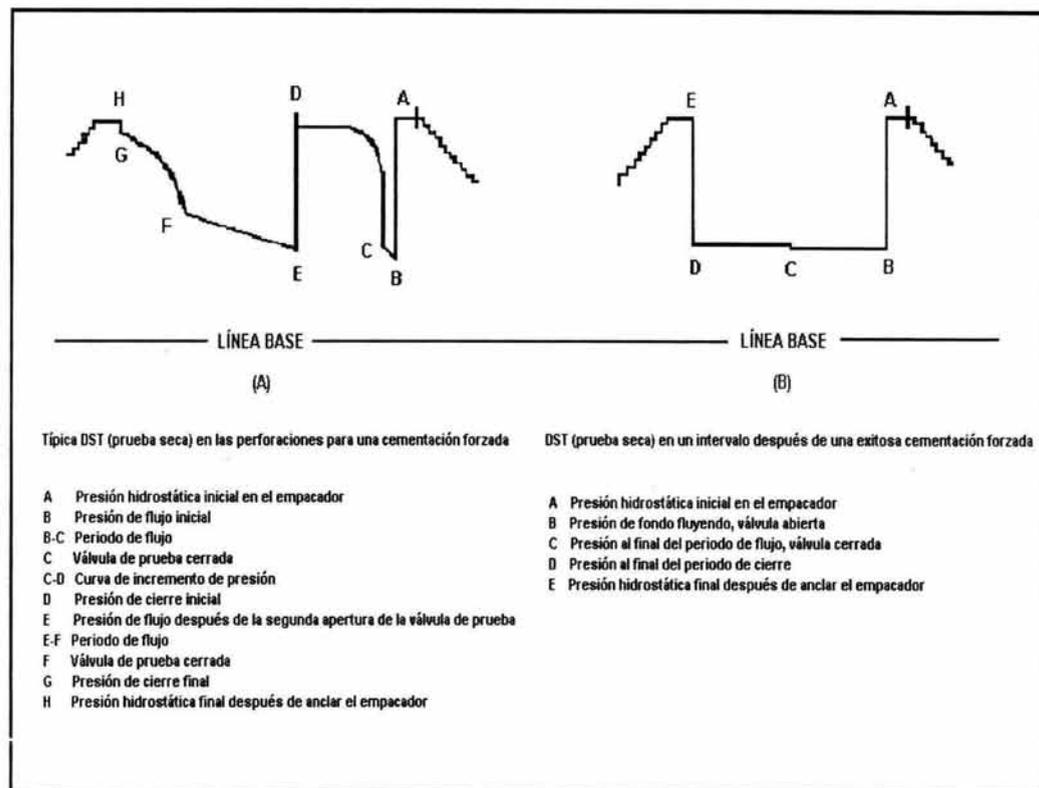


FIGURA V.2 PRUEBA DE PRESIÓN NEGATIVA

V.4.3 PRUEBA A TRAVÉS DE LOS DISPAROS (PERFORACIONES EN LA TR)

En algunas áreas, especialmente cuando el intervalo productor tiene baja permeabilidad, el aislamiento provisto por el cemento es evaluado después de disparar el o los intervalos a producir. El pozo produce a través de los disparos y la producción es analizada. Cuando el

agua corta la producción indica una comunicación anular y la necesidad de una cementación forzada. En otros casos, esencialmente cuando los registros de adherencia del cemento (CBL) muestran pobres resultados, o cuando la efectividad del aislamiento es requerida sobre intervalos cortos, la TR es disparada en dos diferentes localizaciones. Un empacador es colocado entre ambas zonas de disparos y la presión es aplicada sobre los disparos inferiores; esto es una prueba de comunicación. Si es observado transmisión de presión al espacio anular, hay una definida falla de aislamiento hidráulico en el espacio anular, y una cementación correctiva es necesaria.

V.5 CONSIDERACIONES DE ADHERENCIA

Las consideraciones para la cementación son realizadas basándose en los esfuerzos de tensión y compresión del cemento fraguado, asumiendo que el material satisfaga los requerimientos de esfuerzo proveerá una adecuada adherencia. Experiencias de campo muestran que esta suposición no siempre es válida.

En un agujero, la adherencia por esfuerzos de corte y la adherencia hidráulica son las dos fuerzas consideradas para un efectivo aislamiento de la zona a lo largo de las interfaces cemento / TR y cemento / formación (Figuras V.3 y V.4). Esfuerzos de corte dan soporte a la tubería dentro de la TR y esto determina la medida de la fuerza requerida para iniciar el movimiento de la tubería en el seno del cemento. Esta fuerza se divide en la superficie de contacto cemento/TR y produce una adherencia por esfuerzo cortante.

La adherencia hidráulica bloquea la migración de fluidos o gas en el cemento del anular y es usualmente medida para aplicar presión en la interfase tubería/cemento.

V.5.1 ADHERENCIA ENTRE EL CEMENTO Y LA TUBERÍA

Para aislar una zona, la adherencia hidráulica es de gran importancia tanto como la adherencia por esfuerzo cortante. Los esfuerzos de adherencia cortante, hidráulico y del gas son directamente afectados por la superficie de la tubería donde el cemento es colocado (Tabla V.1).

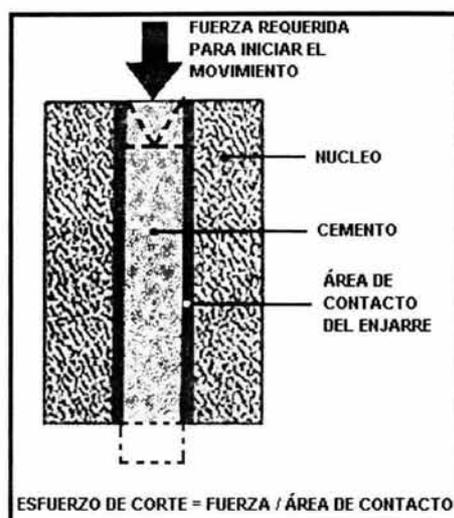


FIGURA V.3 ESFUERZO DE CORTE

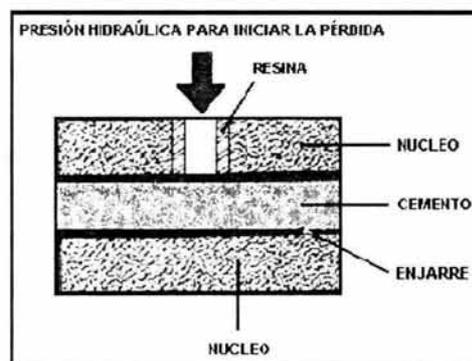


FIGURA V.4 ADHERENCIA HIDRÁULICA

Para determinar el esfuerzo del cemento o la altura de la columna de cemento que se requiere para soportar la sarta de tuberías de revestimiento, se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$S_i = \frac{(C_L)(C_W)}{9.69 (d_0)(h_c)}$$

Donde:

S_i = Esfuerzo del cemento a la tensión, psi

C_L = Longitud de la sarta de Tuberías de Revestimiento en pies

C_W = Peso de la sarta de Tuberías de Revestimiento en lbs/pie

d_0 = Diámetro exterior de la TR en pulgadas

h_c = Altura de la columna de cemento en pies

TABLA V.1 PROPIEDADES DE ADHERENCIA DE VARIAS TUBERÍAS			
CEMENTO API CLASE A CONTENIDO DE AGUA 5.2 GAL/SACO TEMPERATURA 80 °F TIEMPO DE FRAGUADO 24 HORAS TAMAÑO DE LA TR 2 PG. DENTRO DE 4 PG.			
TIPO DE TERMINACIÓN	ESFUERZOS DE ADHERENCIA		
	CORTE (PSI)	HIDRÁULICO (PSIG)	GAS (PSIG)
TUBERÍA DE ACERO			
NUEVA (CUBIERTA TRATADA)	74	220 A 250	15
NUEVA (CUBIERTA QUÍMICA)	104	300 A 400	70
NUEVA (LIMPIA A CHORRO DE ARENA)	123	500 A 700	150
NUEVA (LIMPIA A CHORRO DE ARENA Y CUBIERTA CON RESINA)	2400	1100 A 1200	400
TUBERÍA DE PLÁSTICO			
FILAMENTOS ENROLLADOS (USA)	79	210	-
(ÁSPERA)	99	270	-
APARIENCIA CANTRÍFUGA (USA)	81	220	-
(ÁSPERA)	101	310	-

Factores que afectan la adherencia del cemento con la TR es la dirección en que la presión es aplicada y el tiempo que la presión es aplicada en la interfase de adherencia. Durante la colocación del cemento, el calor de hidratación puede producir un efecto similar a una presión interna en la TR y causa la expansión de la tubería. Después de la colocación del cemento, esta temperatura decrece causando la contracción de la TR. Esta expansión y contracción durante la colocación del cemento produce esfuerzos adicionales entre éste y le

TR, lo cual puede hacer decrecer los esfuerzos de adherencia de corte e hidráulicos. Considerando la adherencia tubería-cemento se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1. Un cambio en la presión interna de la TR causa un cambio correspondiente en los esfuerzos de adherencia hidráulica y de corte. Si la sarta de TR's es cerrada durante el fraguado del cemento, el calor de hidratación causa un incremento en la presión que hará disminuir el esfuerzo de adherencia y se pueden crear microanillos a través de los cuales el gas puede migrar fácilmente.
2. Los esfuerzos de adherencia hidráulica y de corte se incrementan en superficies rugosas.
3. Como con la presión la viscosidad del fluido se incrementa, falla la comunicación del fluido donde el cemento y la tubería entran en contacto.
4. En tuberías con su superficie mojada de aceite, se reducen los esfuerzos de adherencia cemento-tubería.
5. Fallas en los esfuerzos de adherencia hidráulica son función principalmente de la expansión y la contracción de la tubería.

V.5.2 ADHERENCIA ENTRE EL CEMENTO Y LA FORMACIÓN

La adherencia entre el cemento y la formación es quien normalmente determina si existe comunicación con gas o algún fluido en el espacio anular. El fraguado del cemento es mejor en formaciones limpias que en formaciones cubiertas con enjarre. Lo siguiente debe ser aplicado para una adherencia cemento-formación.

1. Una buena adherencia hidráulica de la formación depende del contacto entre el cemento y la formación.
2. Una capa de enjarre de lodo entre el cemento y la formación reduce la adherencia hidráulica.

3. Altos esfuerzos de adherencia pueden ser esperados en las formaciones más permeables si el lodo del enjarre tiene un espesor uniforme.
4. El esfuerzo de adherencia que se alcanza en una formación seca o en una formación libre de enjarre de lodo alcanzará o excederá el esfuerzo de la formación.
5. Fallas en remoción de lodo pueden ser más dañinas para la adherencia a la formación que para la adherencia a la tubería.

V.6 MÉTODOS PARA LA LOCALIZACIÓN DEL CEMENTO DETRÁS DE LA TUBERÍA

Tres métodos usados comúnmente para localizar el cemento detrás de la tubería son registrar la temperatura, evaluar los trazadores radioactivos y los registros acústicos de adherencia. Aunque los registros de temperatura y los trazadores radioactivos no son utilizados comúnmente, porque no proveen datos cuantitativos como los registros de adherencia.

V.6.1 EL REGISTRO DE TEMPERATURA

El registro de temperatura mide el calor generado durante la colocación del cemento detrás de la tubería (Figura V.5). Este calor de hidratación levanta la temperatura en el pozo lo suficiente para detectar la zona donde se ha colocado el cemento y se registra este incremento en la temperatura. Este registro es usado para localizar la cima del cemento con una exactitud razonable. Algunas causas de un pobre registro en el incremento de la temperatura son (1) el cemento presente un bajo calor de hidratación, (2) el registro de temperatura es corrido muy pronto o muy tarde, y (3) existe una excesiva contaminación y dilución de la lechada de cemento. Para obtener los mejores resultados, el registro de temperatura debe ser corrido entre las 12 y las 24 horas después de haber colocado la lechada de cemento.

La cantidad de calor liberada durante la colocación de la lechada de cemento depende de las condiciones existentes dentro del pozo, del sistema de cementación y de las condiciones de superficie durante el proceso de mezclado. Temperaturas típicas en el fondo del pozo

durante la colocación del cemento son mostradas en las figuras V.6 y V.7. Un registro de temperatura de mala calidad puede ocurrir debido a que después que el cemento es colocado existe alta disipación del calor en los alrededores de la formación.

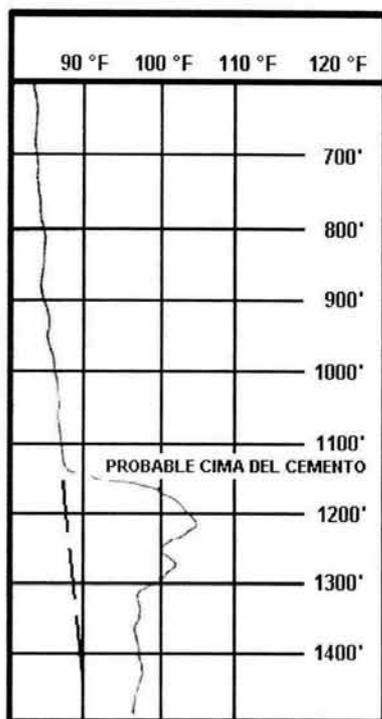


FIGURA V.5 EJEMPLO DE REGISTRO DE TEMPERATURAS

V.6.2 REGISTRO CON TRAZADORES RADIOACTIVOS

El empleo de trazadores radioactivos en estudios geofísicos, se inicia al rededor de 1939 en los Estados Unidos. Los primeros trabajos se planearon con el fin de estudiar la distribución del cemento en los pozos petroleros, para evaluar la eficiencia en las operaciones de cementación. Existen tres series principales de elementos radioactivos que se encuentran naturalmente en todas las rocas, los cuales son: Uranio-Radio, Actinio y Torio, todos estos emiten partículas alfa (α), beta (β) y gamma (γ), ya que de una manera podemos decir que sus principales fuentes son el Uranio, Torio y Potasio⁴⁰, que son los elementos que encontramos en casi todas las rocas.

Los métodos del registro trazador radioactivo algunas veces son usados para establecer los perfiles de flujo, principalmente en pozos inyectores de agua. Pueden detectar el movimiento de flujo dentro y fuera de la tubería, canalización en empacadores etc. El trazador radioactivo es uno de los métodos de registro más comúnmente usado en la actualidad para la evaluación cuantitativa de los perfiles de inyección. El registro de tratador radioactivo se considera dentro del grupo de herramientas efectuadas a condiciones dinámicas.

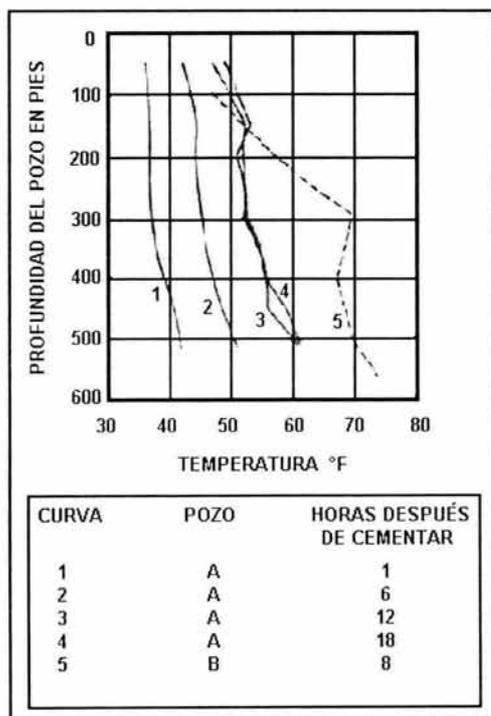


FIGURA V.6 TEMPERATURAS EN EL FONDO DEL POZO DURANTE LA COLOCACIÓN DEL CEMENTO

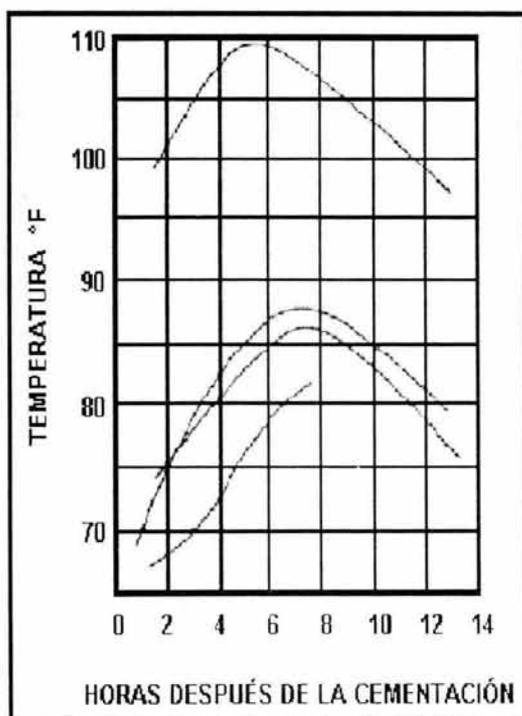


FIGURA V.7 CALOR DE HIDRATACIÓN EN CUATRO POZOS DIFERENTES A 400 PIES DE PROFUNDIDAD

V.6.2.1 CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La configuración de esta herramienta es la siguiente: está constituida por un dispositivo denominado inyector del material radioactivo, cuya función es proporcionar una muestra a la profundidad de interés, en seguida se ubican dos detectores de tipo Geiger-Muller, los que

Falta página

N° 146

los empacadores. El método de los trazadores radioactivos para detectar el cemento detrás de la TR emplea material radioactivo que tiene una vida media. Los dos trazadores más comúnmente usados son el Yodo 131 y el Scandium 46, los cuales tienen una vida media de 8 y 84 días, respectivamente. Con este método la cima del cemento puede ser determinada si la porción más alta es dejada con material radioactivo (Figura V.9). El trazador es adicionado como una sal soluble en el agua y mezclado con el cemento para mejores resultados, en toda la lechada.

V.6.3 REGISTROS GEOFÍSICOS DE ADHERENCIA

Los registros nos auxilian para evaluar la calidad de la cementación y determinar las técnicas para efectuar una cementación, así como para analizar las causas que provocaron una mala cementación de la TR. La evaluación consiste en medir el tiempo tarda en viajar una onda acústica generada por un transmisor hacia la tubería/cemento y la formación y en regresar al receptor.

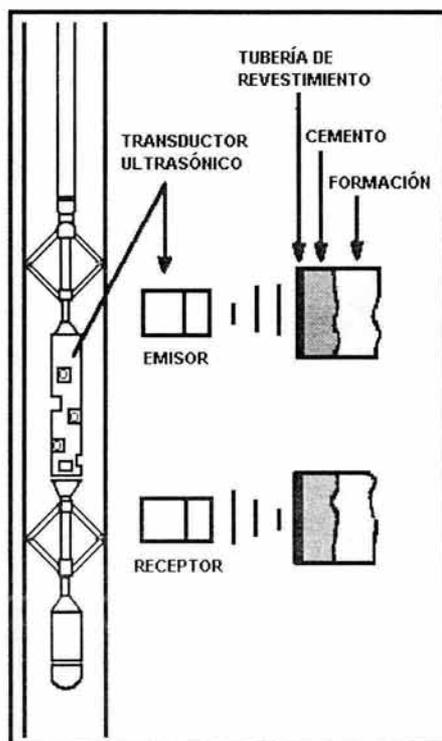
V.6.3.1 REGISTRO DE EVALUACION DEL CEMENTO CET

La herramienta CET evalúa la distribución del cemento alrededor de la tubería y formación, obteniendo curvas de resistencia del cemento a la compresión y un análisis visual de la capa de cemento detrás de la tubería. La condición geométrica de la tubería también se puede evaluar e indicar la presencia de canalizaciones.

La herramienta cuenta con ocho transductores colocados en forma helicoidal a 45° uno del otro sobre la sonda, ocupando así un sector angular de la tubería cada uno.

Cada transductor ocupa un espacio vertical de 2" y opera con el rango de frecuencia de resonancia de la mayoría de las tuberías en uso. Figura V.10. La distancia entre transductores y tubería es de 2" y se ajusta si está vacía. Los transductores actúan en forma simultánea como emisores de pulsos ultrasónicos y receptores del eco resultante. Se emplean sondas de 3 3/8" y 4" para tuberías de 4 1/2" a 7" y de 7" a 10 3/4" respectivamente.

La herramienta CET proporciona información sobre el espesor y condiciones externas de la TR permitiendo el conocimiento de corrosión en tuberías, detecta la presencia de canales mediante un análisis circular del medio que rodea la tubería, obtiene curvas de resistencia del cemento a la compresión y un análisis visual de la capa de cemento detrás de la tubería y evalúa la condición geométrica de la tubería auxiliada por cuatro calibradores acústicos. La naturaleza del fluido y su densidad influyen en la atenuación de las ondas por su contenido de sólidos. Fluidos con densidades mayores a 1.6 gr/cm^3 no son adecuados para el correcto funcionamiento de la herramienta. Se recomienda emplearse lodos base agua con 1 a 1.4 gr/cm^3 de densidad para la operación normal de la herramienta.



.FIGURA V.10 PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE LA HERRAMIENTA CET

Los trenes de ondas de la herramienta CET (Figura V.11) primero se normalizan los parámetros para la evaluación de la calidad del cemento se obtienen de cada transductor i ($i = 1$ a 8) donde:

W_2Ni = energía integrada y normalizada en el intervalo de tiempo W_2

W_3Ni = energía integrada y normalizada en el intervalo de tiempo W_3

Con la herramienta CET se puede estimar el espesor de la tubería con gran precisión considerando su diámetro exterior constante. Un péndulo integrado nos da a conocer la posición de cada transductor con respecto al lado alto de la tubería en pozos desviados. La figura V.12 representa la respuesta de la relación entre W_2Ni y W_3Ni , dicha relación es independiente de las condiciones ambientales (es decir, fluido en el pozo, tipo de TR y medio detrás de la TR). Dicha relación es llamada F_1 :

$$W_2Ni = F_1 (W_3Ni)$$

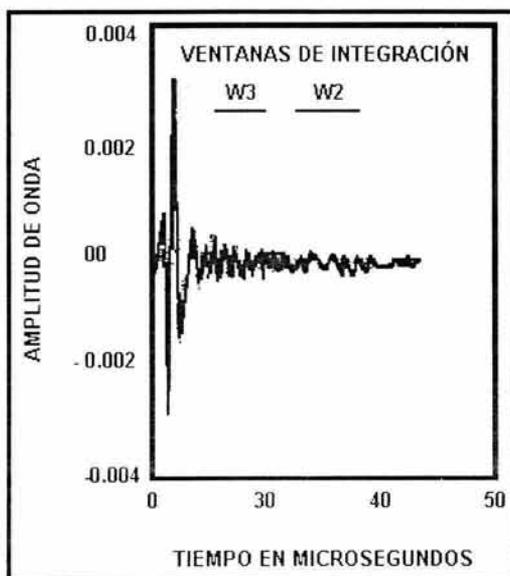


FIGURA V.11 TREN DE ONDAS CET

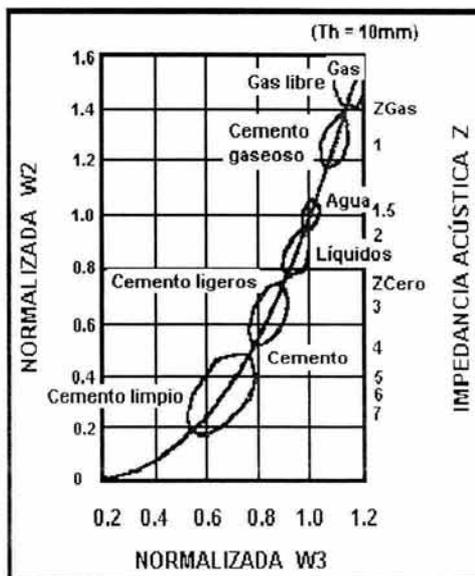


FIGURA V.12 FORMA DE INTERPRETAR LA HERRAMIENTA CET

La computadora permite obtener la impedancia acústica Z (producto de la velocidad por la densidad) del medio detrás de la TR. Además esta herramienta es sensible a la respuesta tanto al espesor Th de la pared de la TR como a la impedancia acústica Z del anular. Esta relación se denomina F_2 . De esta forma la respuesta de cada transductor puede relacionarse

con la impedancia acústica detrás de la TR. Así como F_1 y F_2 se calculan dos impedancias acústicas:

$$Z_1 = F_2(Th, W_2Ni) \text{ y } Z_2 = F_2(Th, F_1(W3Ni))$$

Donde:

$$Z_1 = Z_2 \text{ en condiciones normales}$$

Con el fin de relacionar la importancia acústica con la resistencia a la compresión del cemento y en base a pruebas de laboratorio se obtuvieron dos relaciones lineales: una para los cementos normales y otra para los ligeros; esta relación se denomina F_3 . Entonces:

$$CS = F_3(Z_1 \text{ tipo de cemento})$$

Donde:

$$CS = \text{Esfuerzo Compresivo}$$

El primer paso para evaluar la calidad de la cementación es determinar si existe o no cemento en el espacio anular, considerando la mayor impedancia acústica del fluido Z_f , presente en el espacio anular y deducir que cualquier material que tenga una Z mayor que Z_f es cemento. Un lodo de 1.6 gr/cm^3 de densidad tiene una Z de $2.4 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\text{-seg}$, que es inferior a la de cualquier cemento normal.

En casos de cementos ligeros la Z es más baja; además se puede identificar el gas bajo presión ($Z = 0.1 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\text{-seg}$)

APLICACIONES DEL REGISTRO CET

Microespacios llenos de gas-. La figura V.13 presenta un registro CET corrido en una TR de 5 pulgadas. Debido a los rastros de gas, una capa uniforme de cemento y el valor de WWM (relación entre W_2/W_1 sobre los 360°) entre 0.8 y 1.6 se puede concluir que existe una contaminación del cemento por gas, y se podría predecir la zona problema.

Identificación de una canalización.- El registro presentado en la Figura V.14 indica extremadamente buena adherencia en el intervalo de 1,622 pies a 1675 pies. La atenuación es menor a los 30 decibeles por metro a través de este intervalo. El registro VDL está dominado por una fuerte señal de la formación y existe una pequeña presencia de TR o coples.

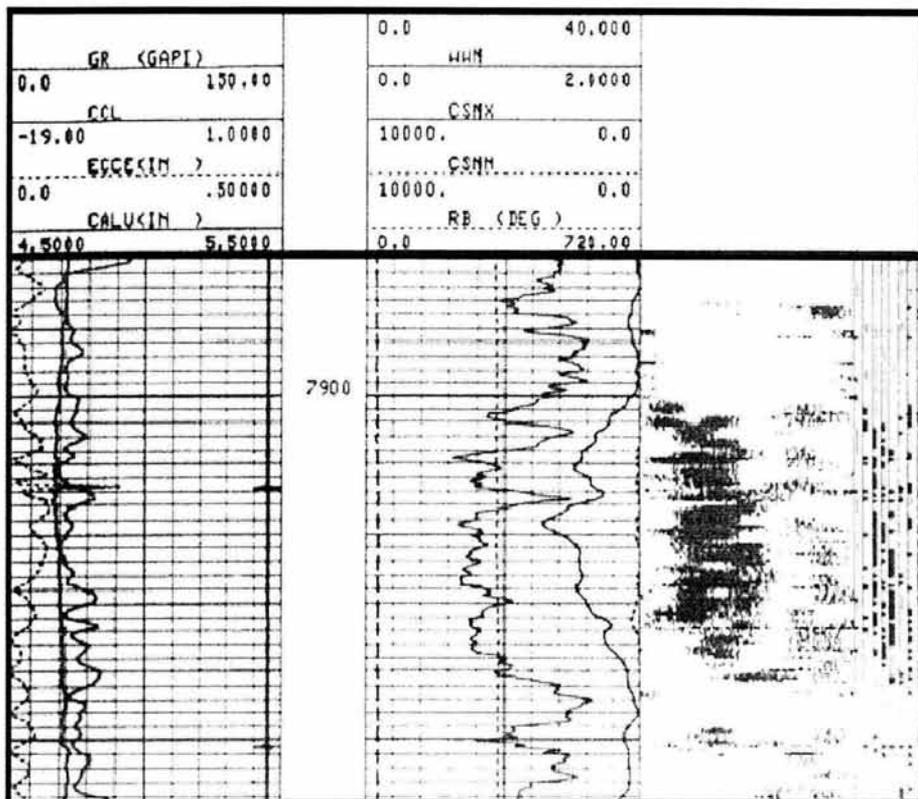


FIGURA V.13 EJEMPLO QUE MUESTRA MICROESPACIOS LLENOS DE GAS

Pero existe, el hecho de que grandes canales de lodo se encuentran detrás de la tubería, esto puede verse claramente en el plano del cemento mostrado en el CET (Figura V.15). Observe que el valor de WWM es mayor en donde el tamaño de la canalización se incrementa.

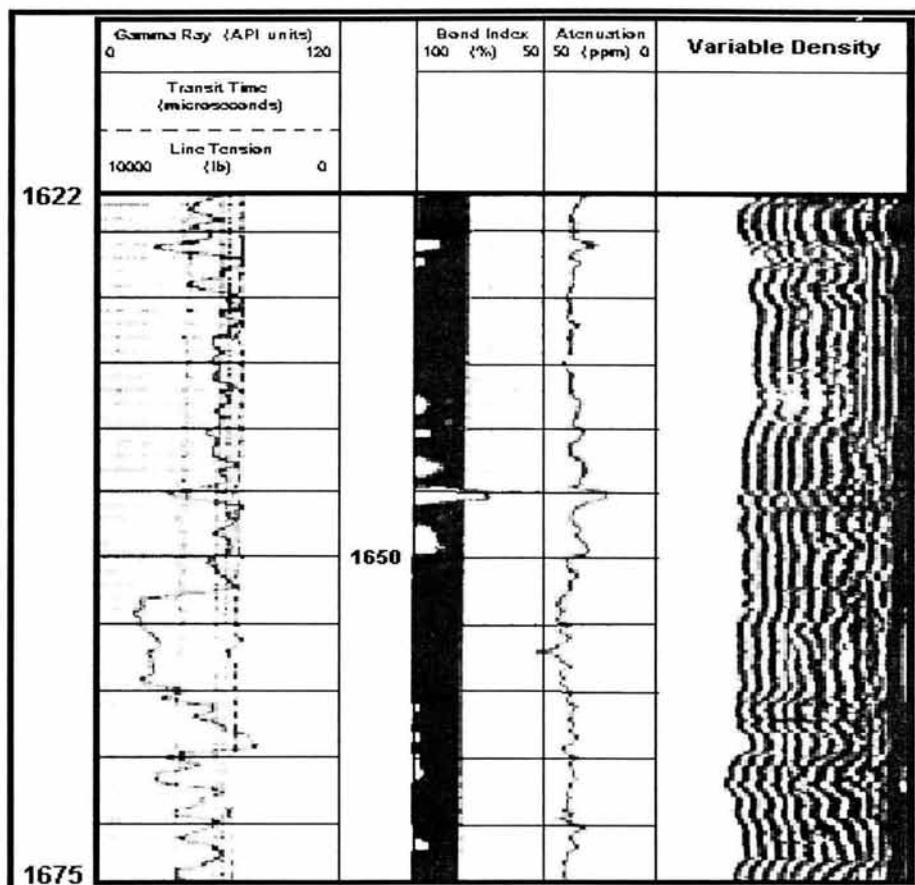


FIGURA V.14 CANALIZACIÓN MOSTRADA EN UN CBL

Registros a través de formaciones rápidas.- Este intervalo de registro es en medio de formaciones masivas de calizas que son generalmente compactas, pero altamente fracturadas. La curva de amplitud en el registro de adherencia (Figura V.16) está fuertemente influenciada por formaciones rápidas. Toda interpretación del registro CBL debe hacerse cualitativamente a partir de la información de la herramienta VDL. Observe también que la curva en el tiempo de tránsito es irregular con valores inferiores en la zona de baja de amplitud. La señal de VDL no muestra señales fuertes de la TR, pero esta es confusa debido a las fracturas en la formación o en el cemento.

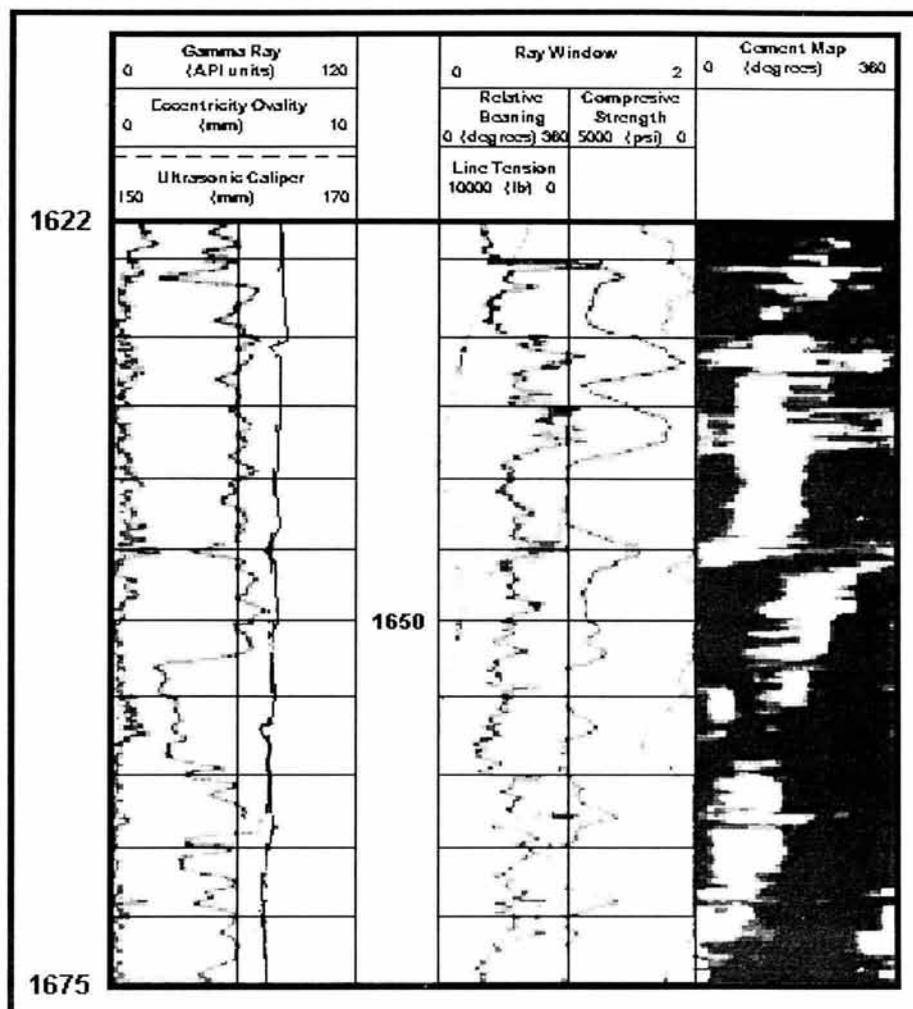


FIGURA V.15 CANALIZACIÓN MOSTRADA EN UN CBL (COMPARE CON V.14)

La herramienta CET (Figura V.17) muestra una gran cantidad de cemento, pero con canalizaciones en el intervalo disparado en forma descendente cerca de los 50 pies (15 m).

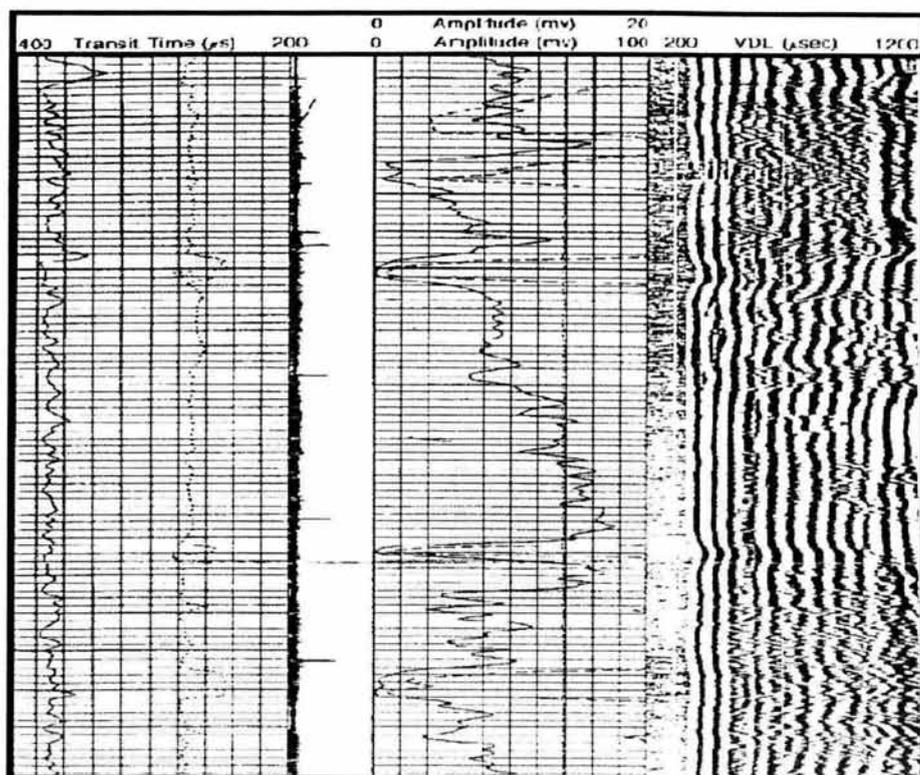


FIGURA V.16 EFECTO QUE CAUSA UNA FORMACIÓN RÁPIDA EN UN CBL

V.6.3.2 REGISTRO ACÚSTICO DE CEMENTACIÓN (CBT)

Esta herramienta acústica fue diseñada para evaluar exclusivamente la calidad del cemento en la tubería. El CBT aminora los efectos de una mala centralización. La herramienta consta de dos transmisores T_1 y T_2 separados 5.8 pies entre si y tres receptores, (Figura V.19) con los siguientes modos de operación.

Modo N° 1 R_3 a 3.4 pies del T_1

Modo N° 2 R_3 a 2.4 pies de T_1

Modo N° 3 R_2 a 3.4 pies de T_2

Modo N° 4 R_3 a 2.4 pies de T_2

Modo VDL R_1 a 5 pies del T_2

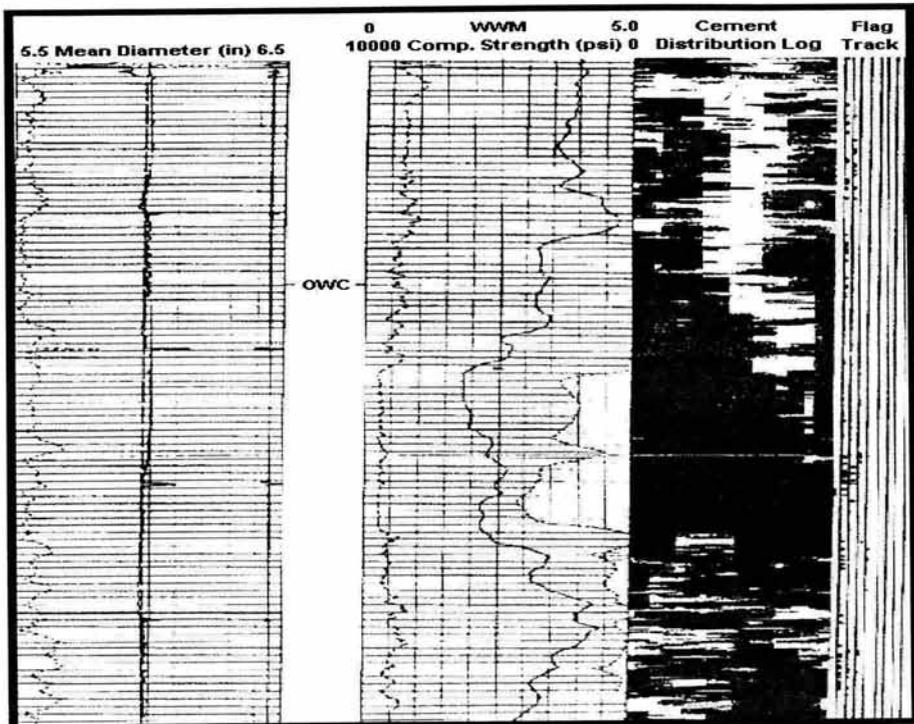


FIGURA V.17 CANALIZACIONES EN EL INTERVALO DISPARADO

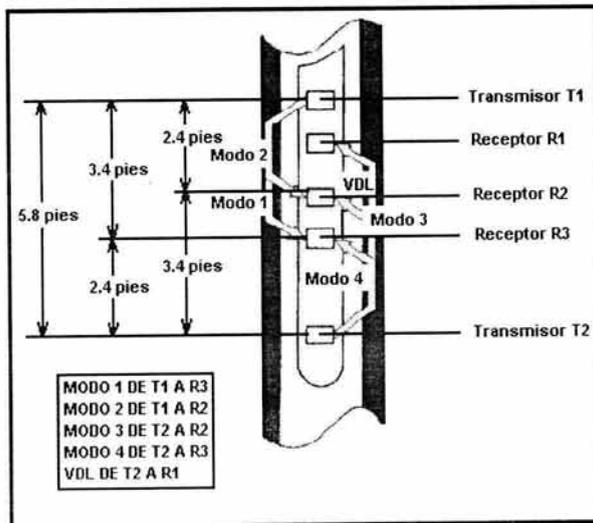


FIGURA V.18 HERRAMIENTA CBT (CEMENT BOND TOOL)

Esta herramienta cuenta con características muy especiales como son: una medición autocalibrada, Tmax en formación-pozo igual a 350 °F (117 °C) y Pmax de 20000 lb/pg² (1406 Kg/cm²).

V.6.3.3 PRESENTACIÓN DEL CBT

Carril 1

Curva de coples, tiempos de tránsito TT₁, TT₂, ΔT.

Rayos Gamma

Carril de profundidad

Profundidad real del pozo

Curva de tensión del cable

Carril 2.- Atenuación de la onda acústica en cada receptor (dbs/pie)

T1 – R1, SATN

T1 – R1, NATN

T1 – R3, DATN

Carril 3.- Presenta la amplitud de la onda acústica en cada receptor (milivolts)

T1 – R1, SCBL

T1 – R2, NCBL

T1 – R3, DCBL

Observe la figura V.19

V.6.3.4 APLICACIONES DEL CBT

La amplitud de una onda acústica se comporta inversamente proporcional a su atenuación.

Tubería libre.- La respuesta de la onda acústica da valores altos de amplitud (CBL) y valores bajos de atenuación (ATN)

SCBL = NCBL = DCBL

SATN = NATN = DATN

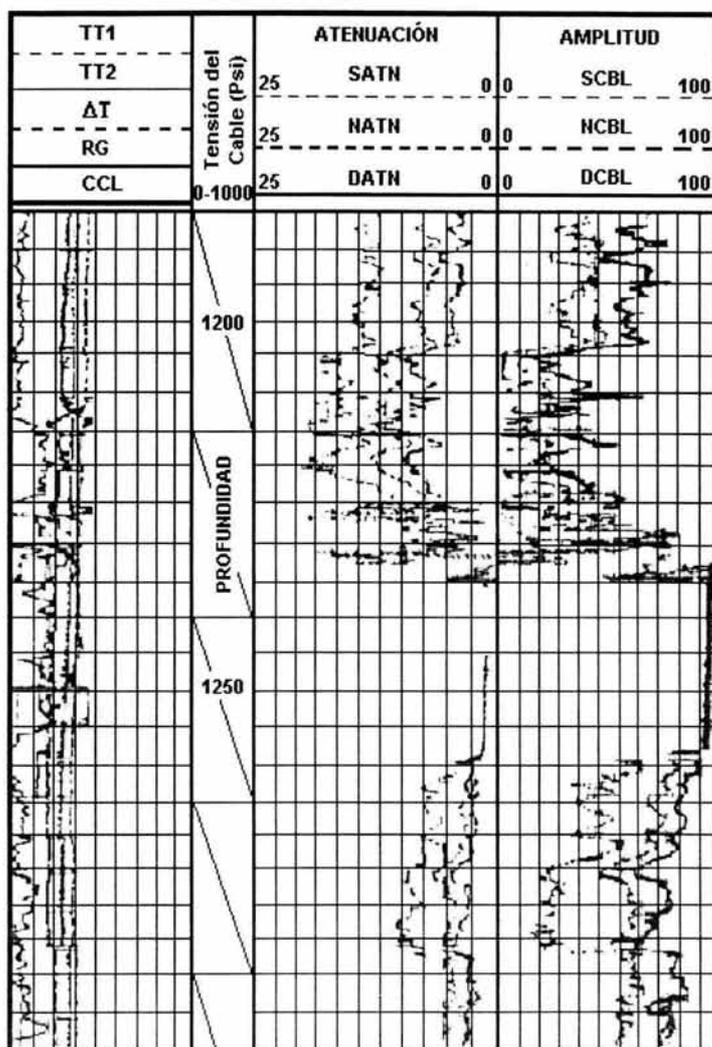


FIGURA V.19 PRESENTACIÓN DEL REGISTRO CON CBT

Tubería cementada en forma homogénea.- Los valores son bajos en la amplitud y altos en la atenuación.

Formaciones rápidas.- En los receptores de espaciamiento largo (3.4 y 5 pies) su respuesta se ve afectada, mas no en los receptores de espaciamiento corto (0.81 y 2.4 pies).

SCBL < NCBL > DCBL

SATN < NATN > DATN

Canalización.- Su efecto dependerá de la distribución del cemento alrededor de la tubería de revestimiento, si esta distribución es en forma homogénea:

SATN = NATN = DATN

Si no existe canalización se obtiene:

SATN < NATN < DATN

V.6.3.5 REGISTROS CBL, VDL Y CET

Para hacer una comparación de los registros CBL y CET, se calcula el porcentaje de circunferencia de tuberías cementadas, tal como detecta el CET y se compara con la evaluación similar mencionada del CBL. Esta aproximación ha sido probada ampliamente en condiciones donde la teoría prevé diferencias tales como:

Microanillo lleno de líquido.- Generalmente, una tubería de 7" y 23 lb/pie se expande alrededor de 0.004 pg para una presión añadida de 1000 psi. El CBL es mucho más sensible a tal diferencia que el CET, la razón principal reside en el modo de operación de las herramientas. El impulso del CBL actúa a lo largo de la interfase revestimiento/ánulo en una configuración de cizallamiento, mientras que el impulso CET se dirige perpendicularmente a esta interfase.

Cemento alrededor de la TR.- La amplitud E_1 del CBL depende del espesor del cemento, cuando esta es menor a $\frac{3}{4}$ de pulgada. El CBL indica un canal, mientras que el CET detecta cemento debido a su profundidad de investigación más pequeña.

Adherencia del cemento a la formación en forma deficiente.- La calidad de la interfase cemento-formación no es accesible al CET, ni la amplitud E_1 del CBL, pero puede conocerse cualitativamente con el VDL en agujeros lisos.

Formaciones rápidas.- En formaciones compactas tales como dolomías de baja porosidad, el sonido viaja más rápido que en el acero. Esto afecta la medición del E_1 del CBL, pero el VDL puede identificarlo. Esta situación se controla mejor con el CET usando Z_2 en vez de Z_1 .

Corrosión de la tubería o defectos internos.- Cuando la longitud de onda del CET y el tamaño de las irregularidades en la cara interna del revestimiento son comparables, el registro CET puede ser afectado a tal punto que la información sobre la cementación pueda no revelarse. El CBL con mayor longitud de onda es casi insensible a esta rugosidad.

Presencia de gas en la zona anular.- La presencia de gas aparece muy claramente en el CET, como "puntos brillantes" sobre un mapa sísmico. El CBL no es tan sensible y con el VDL puede detectarse el gas cuando las trazas se vuelven más tenues y ruidosas debido a la absorción de la señal. El CET puede hacer la distinción entre gas libre y cemento contaminado con gas. Para esto se utiliza el CBL, puesto que el cemento contaminado con gas provee normalmente un buen soporte de la tubería.

Microanillo con gas.- Teóricamente un microanillo lleno con gas no afecta al CET siempre que su tamaño sea inferior a 0.001 pg. Cuando el fluido en el interior del revestimiento contiene demasiadas partículas reflectoras, como puede ser el caso de lodos pesados, la absorción de la señal del CET aumenta. En estas condiciones, la distinción puede volverse marginal y el CET debe ser verificado con un CBL.

V.7 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CEMENTO

Los materiales en el espacio anular son:

- ✓ Cemento normal
- ✓ Líquido, incluyendo lechada que no fraguó.
- ✓ Cemento contaminado con gas
- ✓ Gas libre en la interfase del revestimiento.

La información más útil que aporta el CET es la distribución radial y vertical del cemento.

Esta información provee:

- ✓ Identificación de la causa más probable de una cementación deficiente.
- ✓ Estimación del aislamiento hidráulico de zonas. Adaptación de los procedimientos para la cementación correctiva.

La cementación debe evaluarse en sus dos funciones:

Soporte de la tubería.- Esta función se refleja por la resistencia del cemento a la compresión, una resistencia de compresión de 500 psi es suficiente para soportar la tubería. Con el CET, esta evaluación se realiza mediante la relación F3 y el análisis de la distribución.

- 1) Aislamiento hidráulico de zonas.- esta función se encuentra asociada con el camino más corto por el cual el fluido se desplaza, entre dos puntos dados. El fluido tiene que abrirse camino a través de varios sólidos. Un criterio representativo será la relación más alta de la permeabilidad entre la longitud sobre la sección de los sólidos. Si entre los dos puntos existe una trayectoria abierta sin sólidos, un criterio representativo será la sección más corta de esta trayectoria. El análisis de las propiedades del cemento y su distribución permiten estimar los criterios siguientes:

Patrones de distribución del cemento.- Se presenta una clasificación de los patrones típicos de distribución y su correlación con otras indicaciones provistas por los registros litológicos y por el calibre del agujero. Esto puede considerarse como una guía en la interpretación del CET, CBL y VDL.

Lechadas deficientes

- Descentralización de la tubería.- Canales verticales de lodo no desplazado, muy pocos puentes de cemento, en el lado inferior de la tubería en los pozos desviados no existe correlación con litología.

- Volumen de limpieza deficiente.- Masas de líquido distribuidas aleatoriamente en la parte inferior de la tubería en los pozos desviados. Canales con puente. No existe correlación con la litología.
- Régimen de flujo incorrecto.- Sin canales verticales claros. Cementación todavía más deficiente enfrente de las secciones derrumbadas o de las cavernas donde el régimen de fluido puede haber cambiado a laminar.

Lechadas mal adaptadas

- Contracción alta y microanillo.- Indicaciones generalizadas de cementación deficiente. Mejor adherencia en arcillas. Resistencia a la compresión normal. Indicaciones de cementación todavía más deficientes en doble revestimiento debido a una contracción no compensada.
- Contenido de agua alto.- Masas de líquidos aleatorias o conglutinadas en el lado superior de la tubería en los pozos desviados. Separación entre el agua y el cemento enfrente de las arcillas, mejor comportamiento en zonas permeables.
- Absorción del gas en la formación.- Distribución en capas del buen cemento, del cemento contaminado con gas y el gas libre. Presencia de formaciones portadoras de gas.
- Interacciones con la formación.- Correlaciones específicas con ciertos tipos de litología (dilatación de las arcillas, disolución de la sal).

2) Permeabilidad del cemento.- Con el CET, el problema de la detección de cemento contaminado con gas se simplifica debido a una amplia caracterización de los tipos de cemento que detecta, normal o contaminado con gas. Las investigaciones de laboratorio efectuadas mostraron que un cemento estándar fraguado correctamente presenta permeabilidades del orden de 0.001 milidarcy. El tamaño del poro es menor a un micrón y la porosidad de 30 a 35%. Sin embargo investigaciones recientes han demostrado que si se permite que el gas se desplace en la lechada antes de terminar el fraguado, la estructura de los poros se destruye parcialmente y aparece una configuración de tipo tubo. Los diámetros de los tubos pueden alcanzar 0.004 de pulgada y la permeabilidad resultante del cemento puede ser de 1 a 5 milidarcies.

La combinación de registros CET, CBL y VDL pueden detectar el cemento contaminado con gas. Este cemento puede soportar bien a la tubería (adherencia adecuada probada por el CBL) pero no se debe confiar en sus capacidades de sellador del paso de gas.

Aislamiento hidráulico de zonas.- Con el fin de mejorar la cementación de los pozos en el futuro y determinar una posible intercomunicación de zonas es muy importante definir porqué quedaron fluidos en el anular mediante el análisis de patrones de distribución del cemento. Si el problema es una operación incorrecta de la lechada, probablemente se debe a que el cemento ha conservado sus propiedades originales y solamente ocurrirán comunicaciones si hay canales sin puente. Cuando el problema se atribuye a una absorción del fluido de la formación durante el periodo de fraguado, es posible que la estructura de los poros del cemento esté alterada y que su permeabilidad haya aumentado.

También es importante notar que el CET no provee información sobre el espesor del cemento ni sobre la interfase cemento/formación. Para obtener esta información se debe recurrir al análisis VDL.

V.8 CEMENTACIÓN CORRECTIVA

Cuando existe una comunicación entre zonas, se debe considerar que los líquidos que el CET detecta tal vez estén altamente cargados con partículas sólidas, como materiales de cementación no fraguados. La lechada que se inyecta para corregir esta comunicación tendrá propiedades bastante diferentes que las del fluido (agua, aceite o gas), para fluir naturalmente por la intercomunicación. Se debe procurar utilizar la técnica de inyecciones de lechada en un punto.

El trabajo de evaluación de la cementación consiste en comprobar que todos los objetivos hayan sido alcanzados después de que el trabajo ha sido ejecutado. Para cementaciones de reparación (secundarias), los objetivos están en función de la calidad de la cementación primaria, sello de los disparos, reparación de fugas de la TR, aislamiento de intervalos productores, etc. Es importante e indispensable utilizar toda la tecnología que tengamos a nuestro alcance, así como la opinión de los expertos para evaluar el problema en una cementación primaria y de esta manera dar la mejor solución posible a dicho problema.

CAPITULO VI. TAPONES DE CEMENTO

VI.1 INTRODUCCION

Casi siempre en algún momento de la vida de un pozo productor de hidrocarburos, se necesita colocarle un tapón de cemento. En muchas ocasiones la razón por la cual se realiza el taponamiento de un pozo perforado es para su abandono. Algunas veces se colocan hasta 15 tapones entre el fondo del pozo y la superficie.

Cada operación de taponamiento presenta un problema debido a un volumen relativamente pequeño de lechada de cemento, que es colocado en grandes volúmenes de fluido dentro del pozo. El lodo puede contaminar el cemento y el resultado, aún después de un razonable tiempo de espera del fraguado, es un frágil, diluido o no consolidado tapón. Por ello es necesario aplicar adecuadamente un método de colocación del tapón.

VI.2 USO DE LOS TAPONES DE CEMENTO.

Existen muchas causas por las que se emplea un tapón de cemento, algunas de las cuales se explican a continuación.

VI.2.1 ABANDONO.

Para sellar un intervalo seleccionado de un pozo seco o agotado, un tapón de cemento se coloca a la profundidad deseada para evitar la comunicación con una zona y una migración de fluidos que podrían infiltrarse subterráneamente a fuentes de agua dulce. En muchos países, cuando se desea abandonar un pozo, existen procedimientos para hacerlo y estos son dictados por las autoridades gubernamentales (Figura VI.1).

VI.2.2 AISLAMIENTO DE ZONAS.

Una de las razones más comunes para taponar es para aislar una zona específica. El propósito podría ser detener agua, para terminar en una zona más somera, o para proteger una zona de baja presión en agujero descubierto antes de efectuar una operación de forzamiento. En un pozo que tiene dos o más intervalos productores, colocar un tapón es benéfico para abandonar una zona agotada o una zona improductiva, se coloca el tapón de cemento permanente para aislar esta zona, esto ayuda a prevenir una posible pérdida en la producción o la migración de fluidos a otro intervalo. (Figura VI.2)

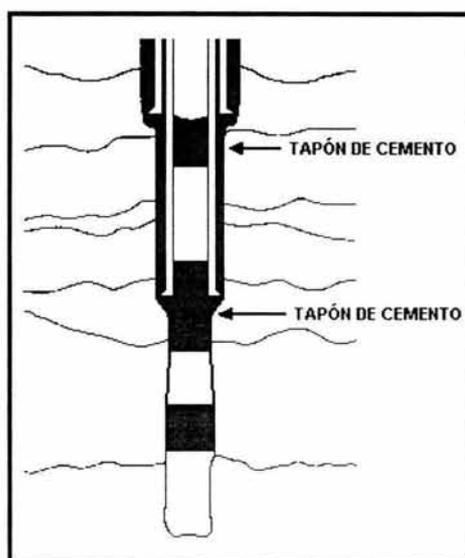


FIGURA VI.1 TAPÓN PARA ABANDONAR UN POZO

VI.2.3 PERFORACION DIRECCIONAL.

Una desviación en la perforación debido a un pescado no recuperado -por una pegadura o rompimiento de la sarta de perforación- obliga a la colocación de un tapón de cemento a la profundidad requerida para ayudar a soportar el desviador, de esta manera la barrena se guía en la dirección deseada. Durante la perforación direccional, puede ser difícil dar el ángulo deseado en la dirección debido a que se atraviesa una formación blanda. Es una práctica común colocar un tapón desviador a través de la zona para conseguir la trayectoria

requerida y llegar al objetivo. Un tapón puede ser usado en el cambio de la dirección en perforación de pozos de alivio, perforación bajo domos salinos, y la perforación hacia zonas inaccesibles. (Figura VI.3)

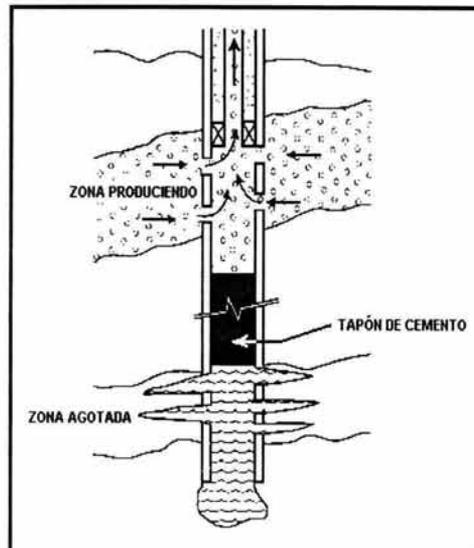


FIGURA VI.2 TAPÓN PARA AISLAR UN INTERVALO

VI.2.4 CONTROL DE LA PÉRDIDA DE CIRCULACION.

Cuando se pierde la circulación de lodo durante la perforación, algunas veces es posible evitar esta pérdida por medio de la colocación de un tapón de cemento a través de la zona ladrona y luego continuar, perforando el tapón. Generalmente esto resulta menos caro que un trabajo de cementación forzada. Reforzando con fibras y aditivos para el control de la pérdida de circulación al tapón de cemento, se minimiza la desintegración del cemento residual, así el tapón de cemento puede ser perforado y se asegura aún más el éxito del trabajo. (Figura VI.4)

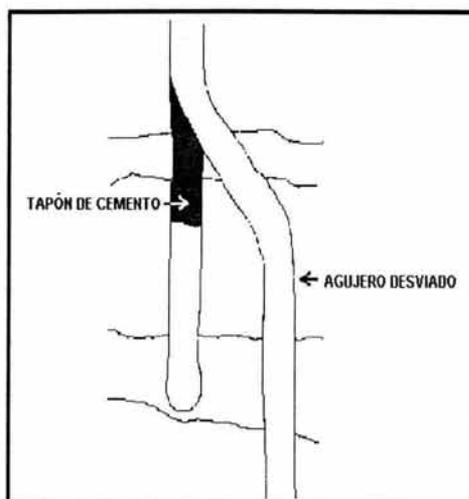


FIGURA VI.3 TAPÓN UTILIZADO EN LA PERFORACIÓN DIRECCIONAL

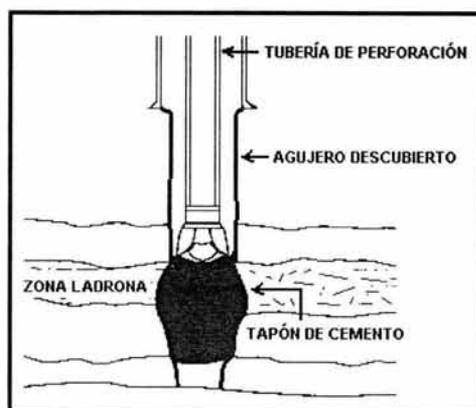


FIGURA VI.4 TAPÓN PARA EVITAR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

VI.2.5 PRUEBAS DE FORMACION.

Los tapones de cemento frecuentemente son colocados en agujero descubierto abajo de la zona que se va a probar, y que está a cierta distancia del fondo donde no es posible colocar un anclaje en la pared o colocar un tapón puente. Los tapones de cemento deben ser lo necesariamente largos para darle estabilidad al agujero y soportar pesos más allá de lo normal.

VI.3 PRECAUCIONES AL COLOCAR UN TAPON DE CEMENTO.

En la colocación de un tapón en agujero descubierto, una consideración importante es el tipo de formación a través de la cual será colocado el tapón de cemento. El fracaso de un tapón de cemento puede evitarse si se toman las siguientes precauciones.

1. Se debe seleccionar con ayuda de un registro de calibración, el tamaño de la sección del agujero y debe determinarse la temperatura de la formación donde el tapón va a ser colocado.
2. Cuidadosamente calcular el volumen de cemento, agua y fluido desplazante y siempre planear el uso de un excedente de cemento por si se necesita.
3. Usar un cemento densificado (API clase A, G, o H) que tolere una considerable contaminación con lodo.
4. Antes del cemento aplicar un frente limpiador adecuado.
5. Rotar la tubería usando en la parte más baja de ésta centradores y escariadores en lo que se coloca el cemento.
6. Usar un tapón limpiador y un tapón receptor.
7. Colocar el tapón con cuidado y mover la tubería lentamente para sacarla del cemento, esto minimizará la contaminación con lodo.

Una máxima limpieza para su adhesión debe ser considerada para una formación dura, particularmente si es una zona de aislamiento o de abandono. En la colocación de un tapón de fondo para sello de agua, o de otros fluidos del pozo, el cemento se coloca a través de los fluidos del intervalo y se deposita hacia arriba como una muy dura e impermeable extensión del pozo. Algunos pozos son taponados para abandonarlos, un tapón debe ser colocado dentro de o bajo la zona de agua dulce o en la base de la primera tubería de revestimiento o

en ambos lados. Registros de calibración del pozo pueden ser consultados para seleccionar la localización del tapón.

VI.4 VOLUMEN DE CEMENTO Y DISEÑO DE LA LECHADA.

La cantidad de cemento para un taponamiento es controlada por la longitud del tapón y el diámetro del agujero. En algunas instancias, 10 a 20 sacos pueden ser suficientes para aislar el agua en el fondo del pozo. Para una desviación en 200 pies de cemento, es muy necesario minimizar la contaminación, esto puede ocurrir en la cima del tapón. Tapones para abandonar el pozo o para una desviación, utilizan entre 125 y 150 sacos de cemento en promedio. Grandes cantidades de cemento aumentan las oportunidades de éxito si el agujero es desviado. Si los tapones son colocados a través de la tubería de trabajo, fluidos espaciadores deben ser usados adelante y detrás de la lechada, esto minimiza la mezcla del lodo de perforación y el cemento. El agua es el fluido espaciador más común, aunque aceite crudo, diesel o mezclas de agua y gel son también usados. Muchos lodos son incompatibles con el cemento. Cuando los dos están en contacto, se da una interface viscosa la cual interfiere en el apropiado desplazamiento del lodo. Es una buena práctica correr un fluido químico o un lavador entre el lodo y el cemento para separarlos.

Un lavador químico o un espaciador son más efectivos que el agua para remover el lodo. Un lavador puede ser usado con un lodo ligero, mientras un espaciador debe ser usado cuando lodos pesados están presentes.

En la selección del volumen de cemento para la operación de taponamiento, se considera evitar la contaminación del cemento con lodo en la cima del tapón. Para pequeños trabajos de taponamiento, un bache de mezcla de la lechada es preferible para asegurar una homogeneidad. Como las instalaciones para realizar una mezcla en seco no son de uso práctico, los aditivos -dispersantes, aceleradores, retardadores- son agregados en la mezcla con agua. La tabla VI.1 enlista los volúmenes de cemento que requiere una lechada para tapones de cemento de diferentes longitudes.

La selección de la composición del cemento para un tapón depende de la profundidad del pozo, su temperatura y las propiedades del lodo. Pruebas del API desarrolladas en estudios

de campo a un gran número de trabajos de taponamiento muestran que, para un tapón con 100 sacos de cemento, el tiempo de colocación en un agujero a 16000 pies es de 40 minutos.

Diámetro del Agujero (pulgadas)	Volumen de lechada requerido (pies ³) para un tapón de cemento con la siguiente longitud			
	50 pies	100 pies	200 pies	500 pies
4	4.36	8.72	17.44	43.65
6	9.81	19.63	39.26	98.15
8	17.45	34.91	79.82	174.50
10	27.27	54.54	109.08	272.70
12	39.27	78.54	157.08	392.70
14	53.45	106.90	213.80	534.50

La contaminación con lodo siempre es posible durante la colocación de un tapón de cemento. En el sistema del cemento puede causar retardo y dilución en el tapón de cemento, por lo tanto densificar o reducir la proporción de agua en cementos (API Clases A, G y H) generalmente da resultados exitosos. (La tabla VI.2 muestra esfuerzos compresivos típicos de cementos densificados Clases G y H usados en taponamientos.)

VI.5 EL SISTEMA DEL LODO.

Antes de colocar el tapón de cemento, el lodo y sus propiedades deben ser estudiados. El pozo es muestreado y se le realizan pruebas ya que el lodo puede ser contaminante y aún mas, particularmente si es para abandono no se garantizaría la eficacia del tapón. Se tiene una estimación que más del 70% de los sistemas de lodo en uso contienen algunos ferrocromo-lignosulfonatos, los cuales afectan la adecuada colocación del cemento. Algunos lodos no gelatinizan o espesan cuando entran en contacto con el cemento y por lo tanto ellos permiten que el cemento sea lubricado y resbale hasta el fondo del pozo. En este caso un lodo preparado de bentonita en grumos o un sistema similar puede ser utilizado al bajar el tapón y colocarlo evitando deslizamientos al el fondo del pozo. Con simples sistemas de lodo base agua, un espeso gel puede formarse por el contacto del lodo con el cemento, y canales

de cemento se formarán durante su colocación en el pozo. Para tener una buena adhesión del cemento entre el tapón y la formación, de buen espesor, el enjarre más suave debe ser removido por circulación.

TABLA VI.2 ESFUERZOS COMPRESIVOS TÍPICOS DE CEMENTOS CLASES G Y H				
Esfuerzos compresivos (psi) a condiciones de fraguado API				
Densidad de La lechada (lb/gal)	110 °F	140 °F	170 °F	200 °F
	1,600 psi	3,000 psi	3,000 psi	3,000 psi
Después de 12 horas				
16.5	2,075	4,000	7,800	9,035
17.0	2,850	6,535	8,375	10,025
17.5	3,975	6,585	8,550	10,675
Después de 24 horas				
16.5	5,475	8,985	9,750	10,460
17.0	6,035	9,060	11,075	12,660
17.5	7,025	10,125	11,860	12,875

Estudios hechos a tapones muestran que el sistema de lodo más favorable presenta una viscosidad de 45 a 80 segundos medidos con el embudo de Mash, una viscosidad plástica de 12 a 20 cp. y un punto de cedencia de 5 lbf / 100 ft² además de una pérdida de agua de 15 cm³. En operaciones realizadas en algunas áreas se pudieron eliminar problemas por la contaminación del cemento con un lodo que consiste en una mezcla de bentonita, agua y materiales densificantes (barita) abajo y a través de la zona en donde el tapón de cemento va a ser colocado. A causa que más tapones de cemento son colocados con el método del tapón balanceado esto es importante, ya que el lodo tiene un gran recorrido en su circulación y por lo tanto debe tener una densidad uniforme.

VI.6 TECNICAS PARA LA COLOCACION DE LA LECHADA.

VI.6.1 METODO DEL TAPON BALANCEADO.

El método balanceado (figura VI.5) utiliza el bombeo de una cantidad deseada de lechada de cemento a través de la tubería de perforación o de la tubería de producción hasta que el nivel de cemento que está afuera sea similar al que se encuentre en el interior de la sarta de tuberías. La sarta se saca lentamente de la lechada de cemento, dejando el tapón colocado en su lugar. Este método es simple y no requiere equipo especial, solo la unidad de servicio de cementación. Las características del lodo son muy importantes en el método de balanceo, particularmente su capacidad para circular libre durante la operación. Cuando el propósito del tapón es controlar una pérdida de circulación, el tapón es colocado con la técnica "drift plug", esto es, el tapón es llevado a la zona de pérdida de circulación en el fondo del agujero, donde este fragua y sella la zona.

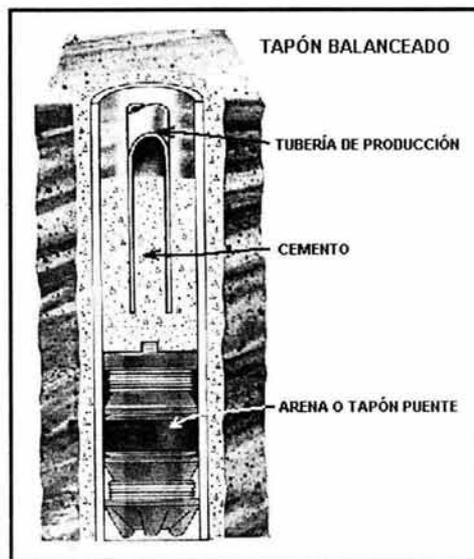


FIGURA VI.5 MÉTODO DEL TAPÓN BALANCEADO

El movimiento de los fluidos dentro del pozo mientras el tapón es colocado puede afectar la calidad de este. Una pequeña cantidad de gas que migre a través del tapón de cemento puede causar disturbios en el cemento que evite su fraguado. Es necesario revisar

cuidadosamente el sistema de cemento para verificar que el pozo se encuentre en un estado estático. La cantidad de lodo, limpiador y lechada de cemento debe ser cuidadosamente calculada para asegurar igual cantidad de fluido al frente y detrás del tapón de cemento, de esta manera existirá un balance en el agujero. El tapón puede ser balanceado con la ecuación:

$$H = \frac{V}{A + C_t}$$

Donde:

H = altura de la columna de cemento, ft.

V = volumen de la lechada de cemento, ft³.

A = volumen del espacio anular entre tubería de perforación o producción y el agujero, ft³/ft.

C_t = capacidad de la tubería de perforación, ft³/ft.

Si resulta difícil establecer la cima del tapón de cemento, puede ser necesario bombear un exceso de cemento. Se saca la sarta del tapón de cemento, echando fuera el cemento excedente arriba de la cima del tapón. Una pérdida de fluido en la formación de bajo de este punto, puede causar movimiento en el tapón.

VI.6.2 EL METODO DE DUMP BAILER

El método de Dump Bailer (figura VI.6), es usualmente usado para profundidades someras, pero con retardadores de cemento, este ha sido usado a profundidades que exceden los 12000 pies. El Dump Bailer, contiene un medidor (cuchara) para la cantidad de cemento, el cual es bajado con línea de acero. Un tapón límite, una canasta cementadora, un tapón puente permanente, o un empacador de grava son usualmente colocados abajo de la posición deseada del tapón de cemento. La cuchara es abierta tocando el tapón puente y es levantada para descargar la lechada de cemento en esa posición. El método tiene ciertas ventajas ya que la herramienta se corre con línea de acero y la profundidad de colocación del tapón es fácilmente controlada. El costo de un trabajo Dump Bailer es usualmente bajo comparado con uno que emplea equipo de bombeo convencional.



FIGURA VI.6 MÉTODO DE DUMP BAILER

Algunas desventajas de este método son (1) no es con facilidad adaptable para la colocación de tapones profundos, (2) el lodo puede contaminar el cemento a menos que el agujero sea circulado antes de descargar (esto es también cierto para el método balanceado), y (3) existe un límite para la cantidad de lechada que puede ser colocada por corrida, y un fraguado inicial puede ser requerido antes de que pueda hacerse la próxima corrida.

VI.6.3 EL METODO DE DOS TAPONES.

En el método de dos tapones (figura VI.7), un tapón superior e inferior son corridos dentro de la tubería para aislar la lechada de cemento de los fluidos del pozo y desplazar estos fluidos (como un trabajo de cementación primaria). Un tapón puente es usualmente colocado a la profundidad de taponamiento. Una herramienta especial desviadora se corre hacia el fondo de la sarta y se coloca a la profundidad deseada para el tapón de cemento en el fondo. Esta herramienta permite que el tapón inferior pase a través de ella y salga de la tubería. El cemento es luego bombeado fuera de la sarta a la profundidad del taponamiento y comienza a llenarse el espacio anular. El tapón superior que sigue al cemento, es atrapado en la herramienta receptora del tapón y causa un repentino levantamiento de la presión superficial, lo cual indica que el tapón ha llegado. Un dispositivo conector retiene al tapón superior para ayudar a prevenir que el cemento se regrese al interior de la sarta, pero permite la circulación

inversa. (Este diseño permite que la sarta sea extraída después de desplazar el cemento y se coloca el tapón de cemento a la profundidad deseada para establecer circulación inversa a través del receptor, así al exceso de cemento se le permite regresar para salir de la tubería).

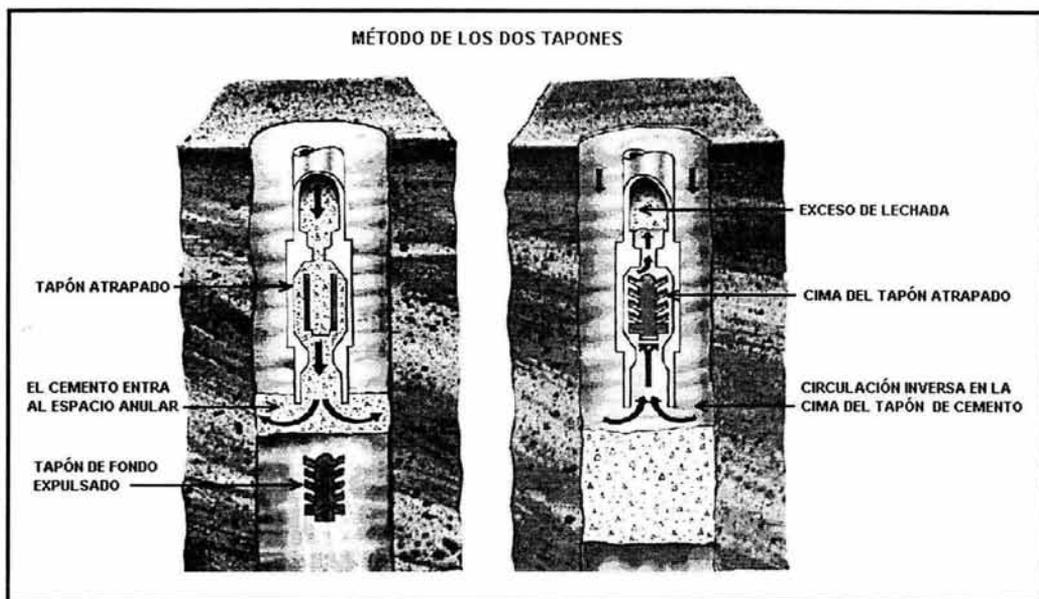


FIGURA VI.7 MÉTODO DE DOS TAPONES

Se puede minimizar la contaminación con el empleo de centradores y escariadores en la parte inferior de la sarta, -esto permite una mejor adherencia- y permite que el lodo sea desviado para que la mezcla de cemento sea uniforme y se eliminen los canales de lodo en el cemento sin fraguar.

El método de dos tapones presenta las siguientes ventajas (1) minimiza la posibilidad de un sobre desplazamiento del cemento, (2) forma un duro tapón de cemento y es hermético y (3) se puede conocer la cima del tapón. Normalmente se prefiere aplicar el método de los dos tapones que aplicar el método de balanceo. Una alternativa para simplificar el sistema es una herramienta, desviadora la cual consiste en colocar un tapón macho al final de la tubería. Seis a ocho disparos de $\frac{3}{4}$ a 1 pulgada de diámetro son realizados arriba del tapón macho.

La lechada de cemento es bombeada a través de estos disparos contra la formación para eliminar la mayor cantidad de enjarre.

VI.7 PRUEBAS QUE SE HACEN A LOS TAPONES DE CEMENTO.

No hay un método simple para probar un tapón de fondo. En muchos casos, los tapones para abandonar o para sellar el agua de fondo no se prueban. Los tapones que se colocan por una pérdida de circulación o para una desviación son probados determinando el endurecimiento del tapón. El método más común es correr la tubería – con o sin la barrenal interior del agujero para localizar el tapón y luego se aplica peso a este. Para aplicar este método normalmente se deja fraguar el tapón entre 12 y 24 horas. Esto no es siempre correcto, pero nos indicará si el taponamiento ha sido llevado a cabo en la posición deseada. Un tapón podría estar duro en la cima, pero blando en el fondo, esto porque pudo haber una migración de fluidos hacia este.

Un tiempo normal de espera de fraguado, después de la colocación del tapón es de 12 a 36 horas, sin embargo con el uso de cementos densos y aceleradores, un tapón con gran resistencia puede obtenerse en un tiempo de 8 a 18 horas. En donde las temperaturas son mayores a 230 °F, la arena sílica funciona como agente estabilizador y como catalizador para producir tapones de cemento de altos esfuerzos con un tiempo de colocación mínimo.

VI.8 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LOS TAPONES.

El diseño de un tapón inicia con la definición del objetivo. Colocar un tapón para evitar una pérdida de circulación, es diferente a colocar un tapón para abandonar una zona agotada o para abandonar un pozo. Antes de cada diseño, las siguientes preguntas necesitan de una respuesta.

1. ¿A qué profundidad debe ser colocado el tapón?

Las posibilidades de éxito son muy grandes si el tapón que es colocado en el agujero puede ser medido de cerca. Los registros deben ser consultados.

2. ¿A través de qué formación va a ser colocado el tapón?

El tapón de cemento estará mejor colocado en una formación consolidada. Las lutitas deben ser evitadas por que ellas son frecuentemente cavernosas. De cualquier modo si arrancar un pozo es el objetivo, el tapón de cemento no debe ser colocado en una formación excesivamente dura. Idealmente, el tapón debe extenderse desde una formación suave de lutitas hacia abajo a una formación dura (Dess y Spradlin 1982). Cuando se pueda, los registros y las bitácoras de perforación deben ser consultados para seleccionar la profundidad donde se va a colocar el tapón.

3. ¿Qué densidad debe tener la lechada de cemento?

Una alta diferencia de densidades entre la lechada de cemento y el fluido de perforación, da una alta probabilidad de que la lechada pueda migrar hacia abajo del sitio elegido. Por otro lado una lechada de baja densidad puede resultar en una baja resistencia a esfuerzos compresivos. En un rango de 15.8 lb/gal (1.90 gr/cm³) la lechada resiste esfuerzos compresivos como mínimo de 5000 psi (34.5 Mpa). Una lechada con una densidad de 17.5 lb/gal (2.10 gr/cm³) desarrolla esfuerzos compresivos de 8500 psi (58.6 Mpa) como mínimo. La densidad de la lechada usualmente debe estar dentro de una rango de 15.6 lb/gal (1.87 gr/cm³) a 17.5 lb/gal (2.10 gr/cm³) esto garantiza una buena resistencia a los esfuerzos compresivos.

4. ¿Cuál es la temperatura en el fondo del pozo?

El API recomienda una prueba de simulación de procedimientos seguida de una simulación de la cementación forzada.

5. ¿Qué volumen va a ser bombeado?

La cantidad de cemento depende del objetivo del tapón de cemento. La longitud y profundidad para colocar tapones de cemento al abandonar un pozo es usualmente indicada por las leyes de los gobiernos. Los tapones desviadores deben ser muy largos, esto es para asegurar una desviación gradual en la barrena. Un calibrador para el agujero es muy útil. La

medida del tapón de cemento puede ser de 300 a 900 pies (91 a 274 m). Debe evitarse una presión hidrostática excesiva en zonas agotadas o débiles, de lo contrario el tapón puede no ser colocado a la profundidad deseada.

6. ¿Son las condiciones del lodo las indicadas antes de la operación?

A baja reología el lodo es desplazado fácilmente.

7. ¿Que propiedades debe tener la lechada?

Las lechadas con alto esfuerzo gel son necesarias para evitar la pérdida de circulación, y restringir el flujo hacia fracturas y vacíos. Cuando la diferencia entre la densidad del cemento y la densidad del fluido del agujero es alta, el cemento tiende a escurrirse a través de fluido más ligero. En este caso, lechadas tixotrópicas pueden resolver el problema. Otro método es colocar un lodo bentonítico viscoso abajo de la profundidad del tapón proyectado para actuar como un soporte para el cemento (Figura VI.8). Como se muestra en la figura VI.9, una herramienta desviadora es recomendada. Tales herramientas minimizan el riesgo de que una lechada de cemento pesada forme una columna a través del lodo.

Agregando arena o materiales pesados no se mejoran los esfuerzos compresivos en una lechada con bajo contenido de agua. Por otra parte, la pérdida de circulación en un trabajo de taponamiento puede requerir lechadas viscosas con baja densidad para evitar perder el tapón en la formación.

8. ¿Cuál es el tiempo de espesamiento apropiado?

Smith y colaboradores recomendaron que el tiempo de bombeo de la lechada equivalga a anticipar el tiempo de trabajo más 30 minutos.

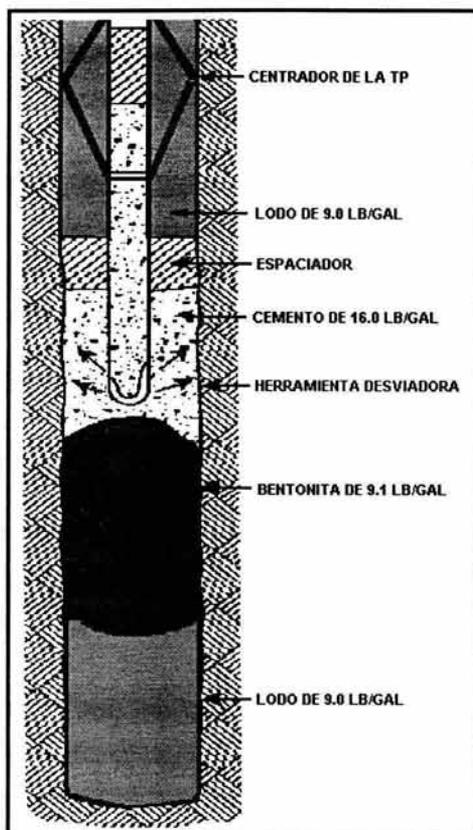


FIGURA VI.8 LODO VISCOSO SOPORTA EL CEMENTO

9. ¿Cómo asegurar que el cemento no se contamine con el lodo?

El uso de espaciadores y lavadores es necesario, ya que muchos lodos son incompatibles con las lechadas de cemento. Bradford (1982), recomendó que el espaciador sea 1 o 2 lb/gal más pesado que la densidad del lodo, para mejorar el efecto de flotación y el desplazamiento del lodo. Smith y colaboradores (1983) recomiendan que, siempre que sea posible, espaciadores y lavadores sean bombeados en flujo turbulento. Una altura en el anular de 500 a 800 pies (152 a 244 m) es recomendada. Si el flujo turbulento no es factible, un bache espaciador es perfectamente aceptable. En consecuencia, el uso de lechadas de cemento densificadas pueden ayudar a reducir la probabilidad de la contaminación del lodo, y se reduce el impacto de la contaminación del lodo en el pozo por si esto ocurre.

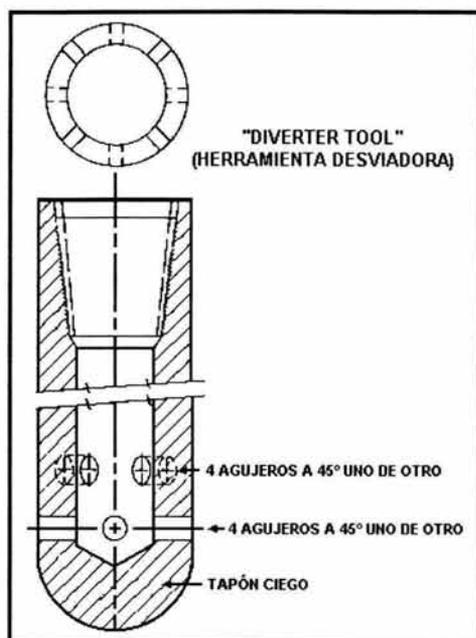


FIGURA VI.9 HERRAMIENTA DESVIADORA

10. ¿Está centrada la tubería y se le da la rotación adecuada?

Bradford (1982) recomienda que la tubería sea cuidadosamente centrada. Esta medida puede mejorar grandemente la remoción del lodo.

11. ¿Se le da el tiempo necesario al cemento?

Esfuerzos compresivos tempranos dependen del tiempo de espera. El tiempo de espera se puede calcular con un correcto diseño de la lechada. Las lechadas muchas veces son diseñadas para un tiempo de espera de acuerdo con las condiciones del pozo y los procedimientos de trabajo, considerando un factor de seguridad. Smith y colaboradores (1983) recomiendan para un largo WOC un tiempo de 12 a 24 horas. El trabajo para poner un tapón de cemento es complicado por la temperatura del pozo. Una práctica común es darle un largo WOC. Un mínimo de 500 psi (3.5 MPa) de esfuerzo compresivo es normalmente recomendado para perforar en el cemento.

VI.9 RAZONES POR LAS QUE FALLA UN TRABAJO DE TAPONAMIENTO.

Después que el WOC ha transcurrido, los resultados del trabajo son evaluados. Esto es normalmente hecho por el tipo de cemento. La profundidad de la cima del tapón y dureza del cemento son los medios indicadores para medir el éxito o fracaso. Siempre que un tapón de cemento ha fracasado se pueden estudiar los objetivos de la operación, las razones por las que falla pueden ser cuidadosamente estudiadas para modificar y mejorar al repetir el intento y obtener el éxito en un futuro. Algunas de las causas más comunes por las que falla un tapón de cemento son mencionadas a continuación.

- **Contaminación con lodo**

La contaminación con lodo es una de las principales causas para el fracaso de un tapón de cemento (Bradford, 1982; Smith y colaboradores 1983). La contaminación con lodo produce graves efectos en los esfuerzos compresivos del cemento (tabla VI.3). Esta contaminación puede resultar por una mala centralización de la tubería. Si la tubería no está correctamente centrada, la lechada sale del fondo siguiendo la trayectoria con menor resistencia-el costado abierto. Existen canales de cemento en el lodo, y mezclas de cemento con el lodo cuando la tubería es extraída del agujero.

- **Volumen insuficiente de cemento**

El tapón puede ser colocado en un derrumbamiento o en una sección donde la calibración del agujero no es buena; por lo tanto la profundidad no es la adecuada. Además, en secciones grandes del agujero, el desplazamiento del lodo es difícil, la inmovilidad del lodo gelatinizado está presente, y la posibilidad de que el lodo se contamine es alta. Es recomendable colocar el tapón en una sección calibrada del pozo.

Algunos autores recomiendan un mínimo de 500 pies (152 m) de longitud del tapón. Otros recomiendan que el tamaño del tapón debe ser de 300 a 900 pies (91 a 274 m). El requerimiento extra de cemento es más económico cuando comparamos los costos asociados con repetir el trabajo, esperar mas cemento, volver a probar el tapón, etc.

- **Desprendimiento del tapón hacia abajo del agujero**

Algunos autores reconocen que un cemento pesado, deja restos en la cima de un lodo ligero formando una interfase inestable, esto provoca que los canales de cemento desciendan y se diluyan en el lodo (figura VI.10). Como primero discutimos, este problema puede ser resuelto por la colocación de un lodo viscoso y grueso con una herramienta desviadora. Como una alternativa, un fluido gel retardado puede ser usado en lugar de la bentonita en grumos.

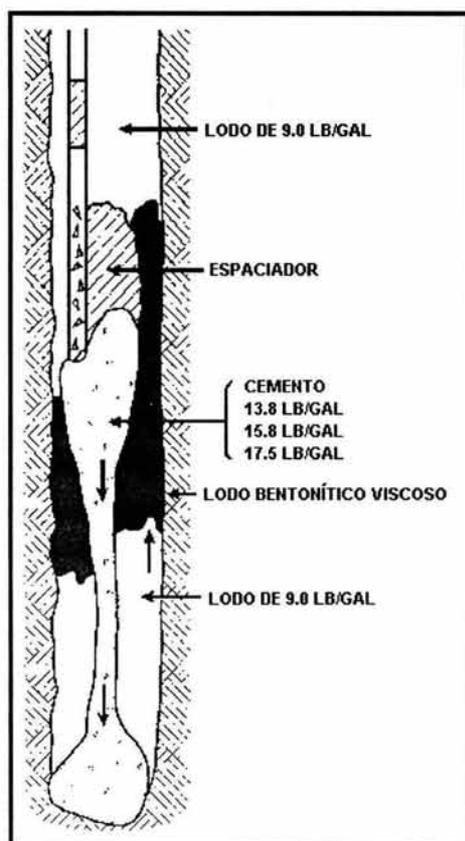


FIGURA VI.10 CANALES DE CEMENTO EN EL LODO

La implementación de una técnica simple como las descritas anteriormente resulta en un significativo aumento de las probabilidades de éxito. Esto no requiere una gran inversión, y

se puede lograr un significativo ahorro de recursos. La siguiente es una lista de las medidas que deben ser consideradas:

- Colocar el tapón en la formación indicada (formación dura)
- Use suficiente cemento
- Coloque el final de la tubería a través de los intervalos a taponar.
- Use escariadores o limpiadores y centradores en la parte final de la tubería cuidando que el agujero no sea lavado en exceso y se provoquen derrumbes.
- Use tubería de perforación y un receptor para realizar el taponamiento.
- Circule el agujero lo suficiente antes de realizar el trabajo. Use un lodo con bajo punto de cedencia y baja viscosidad plástica pero con la densidad adecuada para controlar el pozo.
- Delante del cemento corra un fluido y/o bentonita tales que sean compatibles con el lodo y que eviten el deslizamiento del cemento al fondo del pozo.
- Use cementos densificados con dispersantes que combatan los efectos de la contaminación del lodo. Espaciadores y lavadores son de mucha utilidad.
- Permita un tiempo amplio para el fraguado del cemento.

TABLA VI.3 EFECTO DE LA CONTAMINACION POR LODO EN LOS ESFUERZOS COMPRESIVOS DE UN CEMENTO FRAGUADO

Limpieza del cemento clase H 16.5 lb/gal			Efecto de la contaminación por lodo*		
Contaminación por lodo (% en volumen)	Esfuerzo compresivo (psi a 170 °F)		Contaminación por lodo (%)	Lechada normal 15.6 lb/gal	Reducción del agua En Lechada** 17.5 lb/gal
	8 horas	16 horas			
0	4647	5862	0	4082 psi	8600 psi
5	3512	5300	10	2950 psi	8237 psi
10	2619	4538	40	2426 psi	3850 psi
20	2378	2331	60	593 psi	2967 psi
50	245	471			

* Esfuerzo compresivo en 18 horas a 230 °F

** Contiene dispersantes

CAPÍTULO VII. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

PROBLEMA VII.1

Aplice una cementación forzada a los disparos de un pozo lleno de agua utilizando un empacador.

1) Información necesaria.

- Fluido requerido para los trabajos.
- Presión mínima requerida por barril de cemento antes de que inicie el regreso de la lechada de cemento a la sarta de trabajo.
- Presión de bombeo mínima requerida antes de que inicie el regreso de la lechada de cemento en los disparos.
- Presión de hidrostática en la formación.
- Número de barriles de fluido desplazante detrás del cemento después que la lechada de cemento ha sido colocada en el pozo.
- Presión de bombeo mínima requerida para regresar la lechada de cemento a través de la sarta de trabajo que puede ser al inicio o a la terminación del trabajo.

2) Condiciones del pozo. (Figura VII.1)

- TR de 7", J-55, 20 lbm/ft.
- Disparos de 2,314 a 2,356 ft.
- Sarta de trabajo de 2 7/8, J-55, 6.5 lbm/ft (colocada hasta 2,220 ft)
- Empacador colocado a 2,220 ft.
- Fluido del pozo de 8.33 lbm/gal (agua)
- Cemento API Clase G (75 sacos)
- Densidad del cemento 15.8 lbm/gal.

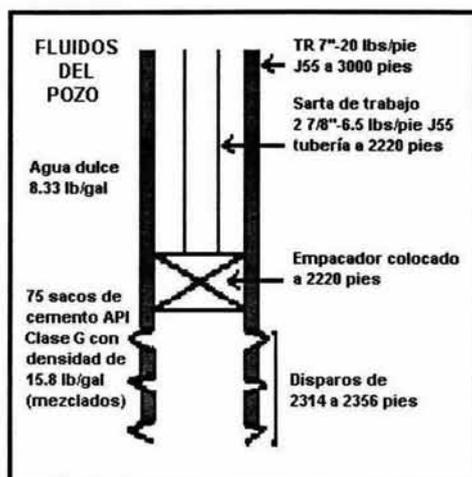


FIGURA VII.1 EJEMPLO DE CEMENTACIÓN FORZADA CON EMPACADOR

3) Cálculos

- Fluido requerido para el trabajo.

Agua para el Cemento.

75 sacos de Cemento API Clase G x 5.0 gal/saco = 375 gal.

375 gal/42 gal/bls. = 8.93 bls.

Agua para desplazarlo hacia los disparos.

TP 0.00579 bls/ft x 2,220 ft = 12.85 bls.

TR 0.0404 bls/ft x 136 ft = 5.49 bls.

Requerimientos mínimos de agua para el trabajo de Cementación Forzada.

8.93 bls de agua para el cemento

12.85 bls de agua en la Sarta de Trabajo

5.49 bls de agua en la TR

12.85 bls de agua para regresar fluidos (del empacador a la superficie)

40.12 bls. Total de agua

- Presión mínima requerida por barril de cemento antes de regresar la lechada de cemento de la sarta de trabajo.

Presión hidrostática del cemento $15.80 \text{ lbm/gal} = 0.8208 \text{ psi/ft}$.

Presión hidrostática del agua $8.33 \text{ lbm/gal} = 0.4330 \text{ psi/ft}$

Diferencia = 0.3878 psi/ft

$0.3878 \text{ psi/ft} \times 172.76 \text{ ft linea/bl.de capacidad.en TP} = 67 \text{ psi/bl.}$

- Presión de bombeo mínima requerida para antes de sacar la lechada de la sarta de trabajo, con el cemento en los disparos,

$75 \text{ sacos} \times 1.5 \text{ ft}^3/\text{saco} = 86.25 \text{ ft}^3 \times 0.1781 \text{ bl/ft}^3 = 15.36 \text{ bls. de lechada}$

$15.36 \text{ bls. de lechada} - 5.49 \text{ bls. de capacidad de la TR} = 9.87 \text{ bls. de lechada en la TP}$

$9.87 \text{ bls. de lechada} \times 67 \text{ psi/bl} = 661.29 \text{ psi. (presión para regresar excedente de cemento)}$

- Presión hidrostática en la formación

$9.87 \text{ bls. de lechada en la TP} \times 172.76 \text{ ft de TP/bl. en la TP} = 1705.14 \text{ ft de lechada en la TP}$

$2,220 \text{ ft (al empacador)} - 1,705.14 = 514.86 \text{ ft de agua en la TP.}$

Peso de la columna de lechada de cemento abajo del empacador, 136 ft de la columna en TR abajo del empacador deben ser sumados a la columna en TP. $136 + 1705.14 \text{ ft} = 1841.14 \text{ ft de lechada en el pozo.}$

Agua: $0.4330 \text{ psi/ft} \times 514.86 \text{ ft} = 222.93 \text{ psi}$.

Cemento: $0.8208 \text{ psi/ft} \times 1.841.14 \text{ ft} = 1,511.21 \text{ psi}$.

Total: $222.93 \text{ psi} + 1,511.21 \text{ psi} = 1,734.14 \text{ psi}$ (presión hidrostática en la formación)

- Cantidad de cemento bombeado al interior de la formación.

Se asume que algún volumen de fluido de desplazamiento está detrás del cemento con la presión de forzamiento.

Si por ejemplo se usaron 8 barriles de fluido de desplazamiento detrás del cemento.

Capacidad en TP $12.85 \text{ bls.} - 8 \text{ bls.} = 4.85 \text{ bls.}$ de cemento en la TP.

Volumen total de lechada de cemento:

$15.36 \text{ bls} - 5.49 \text{ bls.}$ de cemento en la TR $- 4.85 \text{ bls.}$ de cemento en la TP = 5.02 bls. de cemento en la formación.

$5.02 \text{ bls.} \times 5.6146 \text{ ft/bl} = 28.19 \text{ ft}^3$

$28.19 \text{ ft}^3 / 1.15 \text{ ft}^3/\text{saco} = 24.51 \text{ sacos}$ de cemento en la formación.

- Presión de bombeo mínima requerida para regresar la lechada de cemento de la sarta de trabajo que puede iniciar a la terminación del trabajo.

4.85 barriles de cemento en la TP

8 barriles de fluido de desplazamiento

67 psi es la presión mínima por barril de cemento que se necesita para regresarlo de la sarta.

$4.85 \text{ bls.} \times 67 \text{ psi/bl.} = 324.95 \text{ psi}$. presión mínima requerida antes de iniciar el regreso del excedente de cemento.

PROBLEMA VII.2**CEMENTACIÓN DE UN INTERVALO DISPARADO EN EL POZO PEMAL-1 DE LA PLATAFORMA MURALLA EN EL GOLFO DE MÉXICO.**

En la Plataforma Muralla de la Región Marina Suroeste se llevó a cabo un trabajo de cementación forzada con fecha del 19 de julio del 2003 en el pozo Pemal-1 (figura VII.2), esto para taponar un intervalo disparado y que va de los 2572 a los 2580 metros de profundidad. Para realizar el trabajo se tomaron en cuenta el estado mecánico del pozo y los siguientes datos.

Retenedor anclado a 2403 m.

Intervalo a cementar 2572-2580 m.

Temp. estática estimada 175°F

Temp. circulante estimada 133°F

Fluido de perf. polimérico 1.95 gr/cc

Cálculos de volumen (línea de 7")

177.0 m. x 19.337 lts/m. con 188 % exceso = 9863.2 litros = 62.158 bls. Que es el volumen total de lechada.

GEOMETRÍAS ANULARES

DIÁMETRO (PULG.)		PESO	PROFUNDIDAD	CAPACIDAD
EXTERNO	INTERNO	(LB/PIE)	(METROS)	LTS/METRO
LIN 9 5/8"	8.535	53.5	1633	36.910
LIN 7"	6.184	29.0	2782	19.337

TUBERÍAS DE PERFORACIÓN Y PRODUCCIÓN

DIÁMETRO (PULG.)		PESO	PROFUNDIDAD	CAPACIDAD
EXTERNO	INTERNO	(LB/PIE)	(METROS)	LTS/METRO
RET.COMB			1.98	0.00
3 1/2"	2.602	15.5	1008.92	3.43
COMB			0.86	
5.0	4	25.6	1388.49	8.1072
KELLY			4	

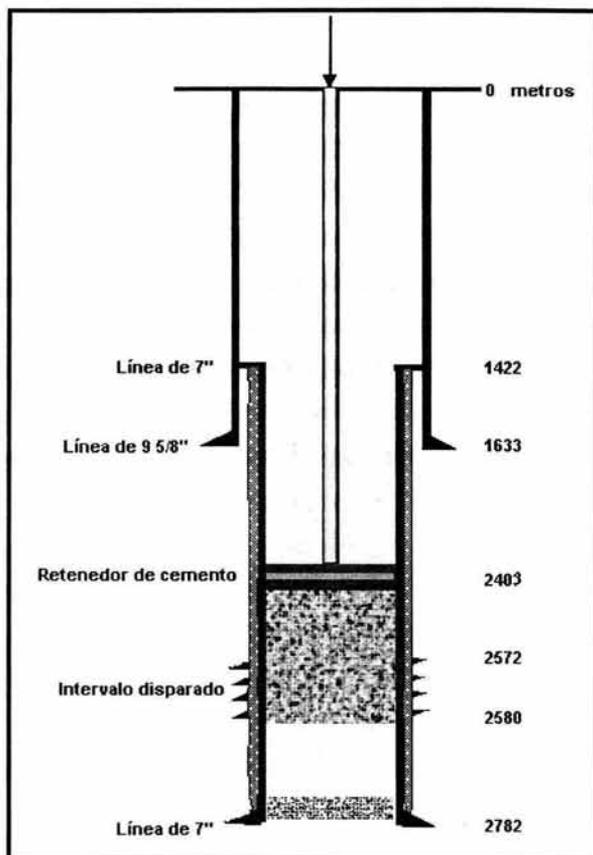


FIGURA VII.2 POZO PEMAL-1

Espaciadores

Lavador: 1 10 barriles de lavador SS-2, con 1 galón SS-2/barril @ 1.02 gr/cc.

Espaciador: 1 10 barriles de bache espaciador Ultra Flush II @ 1.90 gr/cc.

Lechada num. 1

Volumen: 9863.2 litros

Factor de volumen: 41.18 lts/saco

Cantidad y tipo de cemento: 240 sacos de cemento que pesan 12 toneladas.

+ 1.332 lts/saco de FL66L

+ 0.023 lts/saco de FP-6L

+ 0.222 lts/saco de R-21L

+ 0.067 lts/saco de ASA-301L

+ 10% BA-58 1.20 toneladas

Total de toneladas = 13.2

Propiedades de la lechada 1

Peso de la lechada (gr/cc) = 1.90

Rendimiento (lts/saco) = 41.18

Agua de mezcla (lts/saco) = 22.91

Agua de perforación

Requerimientos de agua sola (lts/saco) = 21.27

Tiempo bombeable (HH:MM) = 03:10

Agua libre (cc) = 0.00

Pérdida de filtrado (cc/30 min) = 44 a 1000 psi y 133 °F

➔ PROGRAMA OPERATIVO DE CEMENTACIÓN

- 1) Con retenedor de 7" a la profundidad programada, checar pesos hacia arriba y hacia abajo.
- 2) Instalar líneas de cementar y probar las mismas con 3500 psi.

- 3) Realizar la prueba de admisión antes de anclar el retenedor con 10 bls. de lodo a diferentes gastos: $\frac{1}{2}$ a 2 BPM, y observar comportamiento de presión.
- 4) Anclar retenedor a +/- 2403 metros y efectuar las pruebas correspondientes al retenedor.
- 5) Con stinger enchufado al retenedor, efectuar nuevamente la prueba de admisión.
- 6) Desenchufar stinger, con preventor cerrado y estrangulador semiabierto.
- 7) Efectuar la junta de seguridad y operacional con el personal involucrado en la cementación.
- 8) Preparar y bombear 10 bls. de bache lavador SS-2, @ 1.02 gr/cc. a un gasto de +/- 2 BPM.
- 9) Bombear 10 bls. de bache espaciador Ultra Flush II, @ 1.90 gr/cc. a un gasto de +/- 2 BPM.
- 10) Preparar y bombear 62.15 bls de lechada cemento Clase H (12 toneladas + 10% BA-58 + 0.023 lts/saco FP6L + 1.332 lts/saco FL-66L + 0.222 lts/saco R-21L + 0.067 lts/saco ASA-301L @ 1.90 gr/cc, a un gasto de +/- 2 BPM, preparada con agua de perforación (5.1 m³).
- 11) Iniciar desplazamiento de cemento, cuando se lleven bombeados +/- 10 bls de lodo, parar bombeo (bache lavador en la punta del stinger), enchufar stinger cargando 10 toneladas y (mantener E.A. con +/- 500 psi).
- 12) Continuar con el desplazamiento un total de 89.56 bls. de lodo polimérico (dejando 3 bls de lechada en TP como testigo, a un gasto de +/- 2 BPM, inyección de cemento a los intervalos 37.58 bls).
- 13) Descargar presión testigo en E.A., abrir preventor y,

- 14) Levantar stinger 2 metros y circular en inversa 2 veces la capacidad de la TP (185 bls) para observar salida de cemento testigo.
- 15) Sacar stinger a superficie y continuar con el programa.

Nota: El esfuerzo compresivo del cemento a las 12 horas es arriba de 1500 psi., de acuerdo a la carta de resistencia.

➔ REPORTE DE LA CEMENTACIÓN

09:00 horas. Se arma e inicia a bajar retenedor de cemento BJ SV-5 para TR de 7", 17-35 #/pie, con TP 3 ½" 15.5 #/pie y TP 5", 25.6 #/pie, a velocidad controlada a 2400 metros.

17:00 horas. Se conecta Nelly para cementar, líneas de 2" y se probaron a 4000 psi O.K. Se rompió circulación con una PB = 445 psi a un Q = 0.5 BPM, con 5 barriles. Con stinger desenchufado y preventor cerrado se realizó la prueba de admisión al intervalo de 2572 a 2580 metros resultando los siguientes valores:

GASTO (BPM)	PRESIÓN (PSI)	BARRILES BOMBEADOS
0.5	400	0.5
1	580	1
1.5	700	1.5
2	820	2

19:00 horas. Se ancla retenedor de cemento a 2403 metros, se prueba el mismo. O.K. se enchufa stinger al retenedor, se cierra preventor y se represiona E.A. con 500 psi (testigo) y se efectúa nuevamente la prueba de admisión con 10 barriles de lodo, retornando cero barriles.

21:30 horas. Se efectúa junta de seguridad y operacional del personal involucrado.

22:00 horas. Se preparan y bombean 10 barriles de bache lavador SS-2, @ 1.02 gr/cc, a un Q = 2 BPM y un PB = 850 psi. Seguido de 10 barriles de bache espaciador Ultra Flush II, @

1.90 gr/cc, a un Q = 2 BPM y una PB = 1050 psi. Se prepara agua de mezcla en el recirculador y se inicia a densificar la lechada a 1.90 gr/cc y se bombean 62.15 barriles de lechada (12 toneladas de cemento Clase H + 10% de BA-58 + 1.332 lts/saco FL-66L + 0.023 lts/saco FP-6L + 0.222 lts/saco de R-21L + 0.067 lts/saco ASA-301L @ 1.90 gr/cc, a un Q = 2 BPM y una presión de bombeo de 1100 psi.

0:00 horas. Se inicia desplazamiento de cemento a un Q = 1.5 BPM y una PB = 1200-1400 psi, al llevar bombeados 10 barriles se enchufa stinger al retenedor continúa el desplazamiento, a los 60, 70 y 80 barriles se efecturan paros de 10 minutos c/u. Posteriormente se completa el volumen calculado 89.56 barriles, a una presión final de 1800 psi.

01:00 horas. Se descarga la presión en E.A. se abre el preventor y desenchufa stinger y se circula en inversa com bomba del equipo 2 veces la capacidad de la TP, observando la salifda del cemento testígo.

02:00 horas. Se finaliza la cementación forzada con retenedor de cemento BJ SV-5, al intervalo de 2572 a 2580 metros.

PROBLEMA VII.3

Se colocará un tapón de cemento de 200 pies de longitud en el intervalo de 5800 a 6000 pies después que la tubería de perforación sea removida (figura VII.3).

Información necesaria

- 1) Volumen de cemento – Pies cúbicos de lechada y número de sacos.
- 2) Altura de la columna de cemento y espacio entre la altura de la columna y la tubería de perforación en el tapón.
- 3) Volumen de fluido espaciador
- 4) Volumen de agua para la mezcla (para cemento, espaciador y 20 bls. de limpiador)
- 5) Volumen de fluido desplazante.

Condiciones del pozo

- Diámetro del agujero - 8.75 pulgadas
- Tubería de perforación – 4.5 pulgadas, 16.6 lbm/pie
- Colocación del tapón – de 6000 a 5800 pies
- Lodo en el agujero – base agua de 12.8 lbm/gal
- Espaciador – 200 pies de agua fresca
- Cemento – API clase H
- Densidad de la lechada – 16.4 lbm/gal

Cálculos

Volumen de cemento.- capacidad del agujero $8 \frac{3}{4}" = 0.4176 \text{ pies}^3/\text{pie}$ (de tablas)

Longitud del tapón = 200 ft. X $0.4176 \text{ pies}^3/\text{pie} = 83.52 \text{ pies}^3$

Volumen de cemento equivalente en sacos de API clase H, para una densidad de 16.4 lbs/gal obtenemos 1.06 pies^3 de lechada por saco de cemento.

Entonces 83.52 pies^3 de lechada/ 1.06 pies^3 de lechada por saco = 78.79 sacos

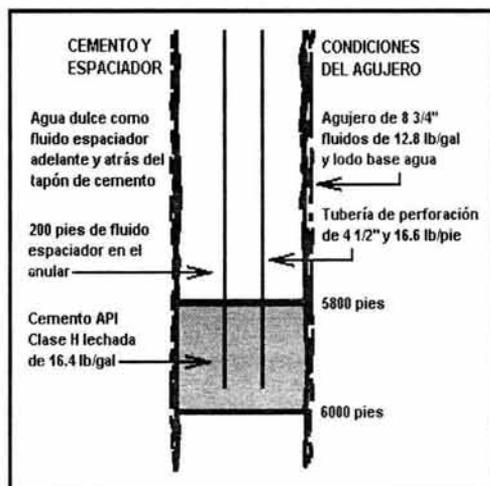


FIGURA VII.3 EJEMPLO DE UN TAPONAMIENTO

Altura del tapón de cemento en la sarta de trabajo

$$h = \frac{N}{C + T}$$

$$h = \frac{8352 \text{ pies}^3}{0.307 \text{ pies}^3 / \text{pie} + 0.0798 \text{ pies}^3 / \text{pie}} = 21587 \text{ pies}$$

Donde:

N = Lechada de cemento requerida

C = Pies cúbicos por pie de línea entre la tubería y la TR o el agujero (de tablas)

T = pies cúbicos por pie de línea dentro de la tubería o la TR (de tablas)

Volumen y altura del fluido espaciador en el anular.- el factor para una tubería de 4 ½ pulgadas en un agujero de 8 ¾ de pulgada es 0.0547 bls/pie.

$$0.0547 \text{ bls/pie} \times 200 \text{ pies} = 10.94 \text{ bls.}$$

La altura del fluido en el anular para una sarta de trabajo de 4 ½ pulgadas de diámetro de tubería y 8 ¾ de pulgada en el agujero = 18.2804 pies/bl

Altura del fluido dentro de una sarta de trabajo de 4 ½ pulgadas y fluido de 16.60 lbm/bl = 70.32 pies/bl

Debemos encontrar el factor R que consiste en dividir los pies por barril dentro de la sarta de trabajo entre los pies por barril en el anular.

$$R = \frac{70.32 \text{ ft/bl}}{18.2804 \text{ ft/bl}} = 3.85$$

El volumen en el anular dividido entre el factor R nos resulta el volumen en la sarta de trabajo.

$$10.94 \text{ bls} / 3.85 = 2.84 \text{ bls}$$

Para este ejemplo se usan tres barriles de fluido espaciador, el volumen equivalente de este en el anular es el siguiente.

$$3 \text{ bls} \times 3.85 = 11.55 \text{ bls (redondeamos a 12 barriles)}$$

La altura que aporta el fluido espaciador tanto dentro como fuera de la sarta de trabajo es:

$$12 \text{ bls} \times 18.2804 \text{ ft/bl} = 219 \text{ ft.}$$

Volumen de agua requerido

Volumen de agua necesario por saco de cemento clase H para una densidad de 16.4 lb/gal = 4.3 gal/saco

Volumen total de agua para la mezcla 4.3 gal/saco x 78.79 sacos = 339 galones
399 galones / 42 galones/barril = 8.07 barriles

Agua necesaria como fluido espaciador: 10.94 + 2.84 = 13.78 bls.

Requerimiento de agua como fluido lavador: 20 bls.

Requerimiento total de agua: 8.07 + 13.78 + 20 = 41.85 bls.

Longitud que ocupa el fluido por desplazar en la sarta de trabajo. 6000ft – (215.87 + 200)ft = 5584 ft

Factor de capacidad: para TP de 4 ½" y 16.60 lbm/pie = 0.01422 bls/pie

El volumen de fluido a desplazar es el producto de la longitud que ocupa el fluido en la sarta de trabajo en pies por el factor de capacidad para TP.

0.01422 bls/pie x 5,584 pies = 79.41 barriles.

CONCLUSIONES

En este trabajo se trató de presentar un estudio de todos los factores que influyen en una cementación forzada, para esto se describieron las técnicas utilizadas y la forma en que se aplican. Se debe procurar tener las condiciones óptimas de trabajo en el pozo antes y durante las operaciones de cementación forzada. La sarta de TR y TP deben estar libres tanto como sea posible de corrosión, depósitos de parafinas y rebabas. Los preventores deben ser sometidos a la presión de prueba. Debemos estar seguros del buen funcionamiento de las unidades cementadoras y de las herramientas a utilizar. Se debe conocer la presión interna, de ruptura y de colapso de la TR y además el esfuerzo de la junta, a menos que el pozo esté cementado hasta la superficie. Debemos conocer perfectamente cual es el problema que debemos atacar pues sabemos que el éxito de la cementación forzada depende fundamentalmente de una buena planeación y para ello debemos conocer a conciencia el problema que se nos presenta. Debemos también seleccionar adecuadamente los materiales que se van a utilizar así como las propiedades que debe tener la lechada de cemento para tener un tiempo de bombeo adecuado y no se nos fragüe el cemento antes de colocarlo en el lugar deseado o que el tiempo de fraguado sea excesivo. Se deben tener en cuenta todas las medidas de seguridad requeridas para el personal que lleve a cabo el trabajo, para ello debe existir una buena coordinación durante la operación. El éxito de la cementación forzada será confirmado por las evaluaciones posteriores aplicando cualquiera de los métodos que se mencionaron o algún otro. Se debe tomar en cuenta que lo que realmente nos puede garantizar el éxito de un trabajo de cementación forzada, aparte de una correcta aplicación de las técnicas, es la colaboración en equipo de cada una de las personas que intervienen en el, desde la gerencia de perforación, los supervisores de perforación, los ingenieros de perforación, y el personal de las compañías de servicio.

BIBLIOGRAFÍA

Apuntes de Fluidos de Perforación

Ing. Miguel Ángel Benítez Hernández

Ing. Francisco Garaicochea Petrirena

Facultad de Ingeniería UNAM 1988

Apuntes de Terminación de Pozos

Ing. Francisco Garaicochea Petrirena

Ing. Miguel Ángel Benítez Hernández

Facultad de Ingeniería UNAM 1983

Cased Hole Log Interpretation Principles Applications

Schlumberger

Cementaciones a Presión

Petróleos Mexicanos 1987

Cementing

Bwight K., Smith

Society of Petroleum Engineers

Cementing a Well Completion Referente

World Oil, 1997

Estudio de Técnicas para Cementaciones Primarias

Instituto Mexicano del Petróleo 1987

Laboratory Testing, Evaluation, and Analysis of Well Cements

Dowell Schlumberger

Manual de Cementaciones

Dowell Schlumberger 1989

New Cementing Technology

Halliburton

Plug Back Cementing

Halliburton Services

Procedimiento para el Cálculo de Geopresiones y Gradientes de Fractura

M.I Néstor Martínez Romero

M.I Raúl León Ventura

Instituto Mexicano del Petróleo

Programa Weatherford de Cementación

Weatherford Company 1987

Squeeze Cementing

Halliburton Services

Una Cementación Exitosa

Ing. David R. Casas

Asociación de Ingenieros Petroleros de México

Well Cementing

Eric B. Nelson

Dowell Schlumberger