



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PRUEBAS DE LABORATORIO DE
CEMENTACIONES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
I N G E N I E R O P E T R O L E R O
P R E S E N T A :

ALEJANDRO VISTRAIN MARTÍNEZ



DIRECTOR DE TESIS: ING. MARTÍN TERRAZAS ROMERO

MÉXICO, D. F.,

2005

m. 341697



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1318

SR. ALEJANDRO VISTRAIN MARTÍNEZ
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:

PRUEBAS DE LABORATORIO DE CEMENTACIONES

- I CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES EN POZOS PETROLEROS**
- II CEMENTO Y ADITIVOS**
- III PRUEBAS DE LABORATORIO**
- IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES BIBLIOGRAFÍA**

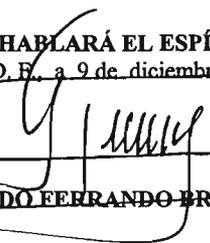
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

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 9 de diciembre de 2004
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/JAGC*gtg


Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Alejandro Vistrain Martínez
FECHA: marzo 4 de 2005
FIRMA: 

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“PRUEBAS DE LABORATORIO DE CEMENTACIONES”

TESIS PRESENTADA POR:

ALEJANDRO VISTRAIN MARTÍNEZ

DIRIGIDA POR:

ING. MARTÍN TERRAZAS ROMERO

JURADO DEL EXAMEN PROFESIONAL:

PRESIDENTE: M. I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ CABRERA

VOCAL: ING. MARTÍN TERRAZAS ROMERO

SECRETARIO: M. C. JAIME ORTÍZ RAMÍREZ

1ER. SUPLENTE: ING. RAFAEL VIÑAS RODRÍGUEZ

2DO. SUPLENTE: ING. MARTÍN CARLOS VELÁZQUEZ FRANCO

Handwritten signatures of the jury members over horizontal lines. The signatures are written in black ink and are somewhat stylized and overlapping. The lines are horizontal and appear to be part of a form or document.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su misericordia, al permitirme alcanzar esta meta y por todas las bendiciones de que ha colmado a mi familia.

A mis padres:

Juan Vistrain Rodríguez^º. Por tu apoyo incondicional; por tu ejemplo de trabajo honesto, esfuerzo, responsabilidad, superación, optimismo y amor a la familia; que Dios te tenga con Él, padre amado.

Catalina Martínez Villarreal. Por el cariño, los cuidados y desvelos que haz prodigado en mí; por los incontables sacrificios y desmedidas privaciones que haz pasado para ayudarme a salir adelante; y por todo el afecto que haz brindado a los que te rodean, que Dios te bendiga.

A mis hermanos:

*Cristina, Claudia, Juan Daniel y Rigoberto
Por su apoyo y fraternal cariño. Adelante, como nos enseñaron.*

A mis sobrinos:

*Humberto y Juan Manuel
Con sus sonrisas han llenado de alegría nuestra casa y nuestras vidas.
Esfuércense por alcanzar sus metas y serán felices.*

A mis abuelos^º:

*Leonarda Rodríguez, Elena Villarreal y Manuel Martínez.
Por su cariño y enseñanzas; que Dios los tenga en su gloria.*

A mis tios:

*Cleotilde^º, Gloria, Socorro, Josefina, Rita, Victoria, Silvia, Violeta,
Carmelo, Cosme, Juan y Roberto.*

A mi novia, Olivia Nava Rodríguez. Por tu amor, comprensión y apoyo en todo este tiempo.

A los que en el pasado forjaron mi presente; a los que en el presente alientan mi futuro; y a los que en el futuro les sea útil mi pasado.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas.

A mis maestros.

Por los conocimientos y valores que me transmitieron durante mi formación como ingeniero.

Un sincero agradecimiento al Ing. Martín Terrazas Romero por sus consejos y el apoyo brindado en la dirección este trabajo.

Al M.I. José Ángel Gómez Cabrera, por su invaluable ayuda en la etapa final de mi formación en esta Universidad.

A mis sinodales, por sus comentarios y el tiempo destinado a la revisión de la tesis.

Un agradecimiento especial al Ing. Fausto Mendoza Cortés por su ayuda desinteresada en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis compañeros y amigos de la Facultad por su apoyo y la amistad que nació en las aulas, y que espero conservemos durante toda nuestra vida.

PRUEBAS DE LABORATORIO DE CEMENTACIONES

ÍNDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	i
CAPÍTULO I	
CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES EN POZOS PETROLEROS	1
I.1 ANTECEDENTES	1
I.2 TRASCENDENCIA DE LA CEMENTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE UN POZO PETROLERO	1
I.3 CEMENTACIÓN PRIMARIA	4
I.3.1 Objetivos	7
I.3.2 Cementación de tuberías de revestimiento superficiales	9
I.3.3 Cementación de tuberías de revestimiento intermedias	13
I.3.4 Cementación de tuberías de revestimiento de explotación	14
I.4 CEMENTACIÓN FORZADA	14
I.4.1 Definición	14
I.4.2 Técnicas de colocación	17
I.5 TAPONES DE CEMENTO	18
I.5.1 Definición	18
I.5.2 Aplicaciones	18
CAPÍTULO II	
CEMENTO Y ADITIVOS	21
II.1 CEMENTO	21
II.1.1 Antecedentes	21
II.1.2 Fabricación del cemento Pórtland	23
II.1.3 Principales compuestos del cemento y sus funciones	25
II.1.4 Propiedades físicas del cemento	26
II.1.5 Clasificación API de los cementos	27
II.1.6 Características del cemento utilizado en la industria petrolera nacional	29
II.1.7 Cementos especiales	31

II.2	ADITIVOS	37
II.2.1	Clasificación	38
II.3	FACTORES QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO	45
II.4	DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO	51

CAPÍTULO III

PRUEBAS DE LABORATORIO	54
III.1 ANTECEDENTES	54
III.2 DEFINICIONES	56
III.3 PREPARACIÓN	59
III.4 DENSIDAD	67
III.5 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	72
III.6 AGUA LIBRE	86
III.7 PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO	90
III.8 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	100
III.9 RESISTENCIA AL ESFUERZO COMPRESIVO	110

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
IV.1 CONCLUSIONES	115
IV.2 RECOMENDACIONES	119

BIBLIOGRAFÍA	121
---------------------	-----

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de elevar el nivel académico de los alumnos del área de Ingeniería Petrolera en la Facultad de Ingeniería, tanto a nivel de licenciatura como de posgrado, y promover la superación de un mayor número de profesionales que laboran en la industria petrolera, la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra; particularmente el área de Ingeniería Petrolera, ha promovido en años recientes varios convenios de colaboración con distintas empresas.

Como un resultado de lo anterior, en mayo del año 2004 fue inaugurado el Laboratorio de Perforación y Terminación de Pozos, en el que se desarrollan las prácticas correspondientes a las materias de Terminación de Pozos e Ingeniería de Pozos que se imparten en la licenciatura; cubriendo los temas de estimulaciones y cementaciones, respectivamente. En lo que se refiere al tema de cementaciones, los objetivos específicos que se persiguen dentro de este laboratorio en el corto plazo son: formar profesionales con experiencia en materia de diseño y evaluación de cementaciones y estimulaciones de pozos; así como probar formulaciones de cemento que contribuyan tanto a la reducción de costos, como a la mejora de las cementaciones de los pozos petroleros. A mediano plazo, se ha establecido el reto de participar en la industria elaborando dictámenes técnicos.

Para cumplir con estos objetivos, el laboratorio cuenta con el equipo necesario a fin de realizar las pruebas a las que deben someterse las lechadas de cemento utilizadas en la cementación de tuberías de revestimiento en pozos petroleros; y gracias a la gestión de las autoridades, se lograron concretar dos cursos de capacitación para el manejo de estos equipos. Sin embargo, se tenía la necesidad de contar con un manual donde se detallaran los procedimientos para efectuar tales pruebas.

El presente trabajo tiene como propósito servir como material didáctico de consulta para los alumnos de licenciatura y maestría que cursen materias relacionadas con los temas de cementaciones de pozos, con el propósito de facilitar la realización de las pruebas de laboratorio a las lechadas de cemento para verificar que cumplan los requerimientos establecidos por los diseños de cementaciones que realicen en sus clases teóricas. Adicionalmente, busca servir como base en el proceso de certificación que próximamente dará inicio en éste laboratorio y como guía para el personal que se encuentre laborando en el mismo.

Está dividido en cuatro capítulos, en el primero se mencionan los antecedentes históricos de las cementaciones y se estudia la importancia que tiene la cementación en el comportamiento de un pozo petrolero. Se examinan las características de las cementaciones primaria y forzada, así como las aplicaciones de los tapones de cemento.

En el segundo capítulo, se revisan los aspectos relacionados con el cemento utilizado en la industria petrolera: su fabricación, sus principales componentes y las funciones que realizan, sus propiedades, la clasificación de los cementos dentro de la industria petrolera mundial, las características que debe cumplir el cemento que se utiliza en la industria petrolera nacional y se revisa el tema de los cementos especiales, dando énfasis a la tecnología de los cementos espumados. De igual forma, se hace una revisión de los diferentes tipos de aditivos empleados para diseñar una lechada de cemento adecuada a las condiciones del pozo. Asimismo, se estudian los factores que influyen en el diseño de las lechadas de cemento.

Dentro del tercer capítulo, se describen las pruebas que comúnmente se realizan a las lechadas de cemento: preparación, determinación de la densidad, comportamiento reológico, agua libre, pérdida de fluido por filtrado, tiempo de bombeabilidad y la prueba destructiva de resistencia al esfuerzo compresivo. Es importante mencionar que en el desarrollo de las mismas se consideraron las características específicas del equipo con el que se cuenta en el Laboratorio de Perforación y Terminación de Pozos.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

I

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES EN POZOS PETROLEROS

I.1 ANTECEDENTES

En la industria petrolera mundial, la primera perforación de un pozo petrolero se realizó en 1859, y fue hasta 1903 cuando se utilizó una lechada de cemento para resolver un problema de invasión de agua justo arriba de una arena que contenía aceite en el campo Lompop en California. Se utilizó una técnica que consistía de la mezcla e introducción dentro del pozo de una lechada elaborada con 50 sacos de cemento Pórtland y agua común²¹. La zona de agua fue aislada efectivamente. Después de 28 días, el cemento fue perforado y el pozo se terminó en arenas productoras de aceite. Este procedimiento se convirtió en una práctica aceptada y pronto se extendió, con algunas variaciones en ciertos casos, para otros campos en California en donde se encontraron problemas similares.

I.2 TRASCENDENCIA DE LA CEMENTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DE UN POZO PETROLERO

Se puede definir a las cementaciones como aquellas operaciones con cemento que se efectúan con objetivos específicos en los pozos petroleros. El cemento se usa, en términos generales durante las operaciones de perforación, para cumplir con cuatro objetivos básicos:

1. Proteger y soportar la tubería de revestimiento.
2. Prevenir el movimiento de fluidos a través del espacio anular fuera de la tubería de revestimiento.
3. Detener el movimiento de fluidos dentro de formaciones vugulares o fracturadas.
4. Sellar un intervalo abandonado del pozo.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Una lechada de cemento que consiste en una mezcla de cemento, aditivos y agua, es preparada en la superficie y colocada en la posición deseada dentro del pozo mediante desplazamiento hidráulico. De esta manera, la lechada de cemento fragua y se convierte en un sólido con características específicas de resistencia.

La tecnología de cementación de pozos es una amalgama de varias disciplinas tanto científicas, incluidas química, geología y física; como de ingeniería, entre las que se incluyen petrolera, geológica, geofísica, mecánica y eléctrica, por citar sólo algunas. Cada una es esencial para lograr el objetivo principal de la cementación de pozos: el aislamiento de una zona. Este es un factor tan crítico que no debe subestimarse un pequeño cambio en la calidad del cemento, la adherencia entre el cemento y la tubería de revestimiento, o entre el cemento y la formación.

El flujo de fluidos a lo largo de la columna de cemento es siempre una condición indeseable. Para un pozo productor esto se manifiesta ya sea como una pérdida de hidrocarburos del yacimiento a través de la columna de cemento, o por la introducción de fluidos de otras formaciones al intervalo productor. Para un pozo inyector, los fluidos inyectados pueden migrar hacia formaciones diferentes a la planeada a través de la columna de cemento. Durante el fracturamiento hidráulico, la migración de los fluidos a través de una columna de cemento deficiente puede causar una altura o una amplitud de fractura en la formación productora diferentes a las programadas, debido a la pérdida de fluido fracturante. En todos los casos, la dirección de flujo de los fluidos hacia el interior o fuera de la formación de interés es opuesta a la dirección del gradiente de presión y proporcional a su magnitud.

Mientras que el flujo de cualquier fluido a lo largo y a través de una columna de cemento es indeseable, no ha sido tan estudiado como el flujo de gas hacia la superficie o "migración de gas" a lo largo y a través de una columna de cemento, éste último ha sido objeto de una atención especial. Ya en 1963, Guyvoronsky y Farukshim²¹ identificaron la posibilidad de una percolación de gas a través de la matriz de una lechada de cemento en proceso de fraguado, y midieron permeabilidades mayores de 300 md.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Los sistemas de cementos Pórtland de densidad normal (1.98 gr/cm^3 o 16.5 lb/gal) generalmente presentan permeabilidades extremadamente bajas si fragua en condiciones normales. La literatura cita valores en el rango de los microdarcys. Sin embargo, la migración de gas puede abrir rutas de flujo adicionales, en forma de porosidad interconectada a través de la columna de cemento. La columna de cemento resultante, exhibe una permeabilidad inusualmente alta debido a este fenómeno, y puede ser incapaz de proveer un sello adecuado.

Las rutas de flujo pueden tomar la forma de canales conductivos discretos (microánulos) en las interfases del cemento y la tubería, o del cemento y la formación. Estas rutas, y su amplitud efectiva, corresponden a una permeabilidad que rebasa con mucho la permeabilidad intrínseca de cemento fraguado en condiciones normales.

Es responsabilidad del ingeniero de perforación la selección de la mejor composición del cemento y la mejor técnica de colocación para cada operación en particular, de modo que el cemento alcance una resistencia adecuada tan pronto como sea colocado en el intervalo deseado; esto minimiza el tiempo de fraguado después de la cementación, no obstante debe permanecer bombeable el tiempo suficiente para colocarla adecuadamente. Además, cada trabajo debe diseñarse de manera que la densidad y la longitud de la columna de cemento generen la presión de fondo suficiente para controlar el movimiento de los fluidos de la formación hacia la superficie y al mismo tiempo, asegurar que no se fracture la misma. Así mismo, deben hacerse las consideraciones necesarias con respecto a los fluidos contaminantes con los que el cemento tendrá contacto dentro del pozo.

En la actualidad las cementaciones se clasifican, de acuerdo con los objetivos que se desea alcanzar, y se agrupan en la forma siguiente:

- **Cementación primaria**
- **Cementación forzada**
- **Tapones de cemento**

1.3 CEMENTACIÓN PRIMARIA

La cementación primaria es el proceso que consiste en colocar cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero. Desde sus inicios en 1903, el principal objetivo de las cementaciones primarias ha sido siempre proveer una zona aislada en el agujero de pozos de aceite, gas y agua. Para alcanzar este objetivo, debe obtenerse un sello hidráulico entre la tubería y el cemento, y entre el cemento y las formaciones; mientras al mismo tiempo se previenen canales de flujo en la columna de cemento. Este requerimiento hace de la cementación primaria una de las operaciones más importantes efectuadas en los pozos. Sin un aislamiento adecuado en el intervalo de interés, el pozo tal vez jamás alcance su máximo potencial de producción. La cementación remedial para reparar una cementación primaria fallida puede ocasionar un daño irreparable en la formación productora. Además de la pérdida de reservas y gastos de producción bajos, el inicio de la producción (ingreso-ganancia) se retrasa. Por otro lado, pueden surgir problemas adicionales, como la imposibilidad para confinar tratamientos de estimulación para la zona productora.

Existen varios factores que pueden contribuir a que se presenten fallas en la cementación. En la siguiente tabla se muestran algunas situaciones que pueden presentarse en el periodo de desplazamiento que son generalmente asociadas con una cementación deficiente²¹.

TIPO DE FALLA	CAUSA
Fraguado prematuro dentro de la tubería de revestimiento	-Agua de mezcla con contaminantes -Estimación incorrecta de la temperatura -Deshidratación del cemento en el espacio anular -Utilización de cemento incorrecto -Zapata obstruida -Retardador insuficiente
Falla del tapón de desplazamiento	-Atrapamiento del tapón en la cabeza cementadora -Desplazamiento del tapón hasta el fondo -Mal diseño a la compresión -Cálculos de desplazamiento incorrectos
Mezcla inadecuada	-Falla mecánica -Agua insuficiente -Cemento insuficiente -Energía de mezclado inadecuada -Falla del sistema
Migración de gas en el espacio anular	-Insuficiente presión hidrostática -Desarrollo de gel en la interfase cemento/fluido de perforación -Falla del cemento para cubrir arenas con gas -Deshidratación del cemento

Tabla 1.1 Factores que contribuyen a la ocurrencia de cementaciones deficientes

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Varios factores determinan el éxito o el fracaso de una operación de cementación primaria. Incluso una operación sencilla puede complicarse, por esto, la operación debe ser apropiadamente planeada. En la siguiente tabla se muestran algunos de los aspectos más importantes a considerar²¹:

Aspecto	Factores a considerar
Agujero	Diámetro, profundidad, temperatura, desviación, propiedades de las formaciones
Fluido de perforación	Tipo, propiedades reológicas, densidad, compatibilidad con el cemento
Tubería de revestimiento	Diseño, características de las roscas, profundidad de asentamiento y accesorios
Operaciones con el equipo	Tiempo y ritmo de introducción de la tubería, tiempo de circulación antes de cementar
Cemento	Tipo, volumen, densidad, propiedades reológicas, aditivos, mezclado, pruebas de mezclado con el agua disponible en la localización
Unidades de mezclado y bombeo	Tipo de mezcladora, cabeza de cementación, tapones, espaciadores, movimiento de la tubería durante la cementación, fluidos de desplazamiento
Personal	Responsabilidad y experiencia de los involucrados en la operación

Tabla I.2 Aspectos a considerar en la planeación de una cementación primaria

El proceso básico para llevar a cabo un trabajo de cementación primaria, utiliza el método de dos tapones para el bombeo y el desplazamiento. Este método fue usado por primera vez en 1910 en pozos someros de California. Después de perforar el pozo hasta la profundidad deseada, se saca la tubería de perforación y se introduce una sarta de tubería de revestimiento hasta el fondo del pozo. En esas condiciones, el fluido de perforación utilizado para remover los recortes de la formación durante la perforación del pozo se encuentra todavía en el interior del mismo. Este lodo debe ser removido y reemplazado con cemento. El proceso para lograrlo es el método de cementación de dos tapones.

Se utilizan dos tapones para aislar el cemento cuando es bombeado hacia el fondo del pozo por el interior de la tubería de revestimiento para, prevenir la contaminación con lodo. Se bombea una cantidad suficiente de cemento para llenar el espacio anular desde el fondo del pozo hasta al menos alcanzar a cubrir las zonas potencialmente productoras.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Normalmente, el cemento es llevado a una altura mayor en el agujero del pozo, incluso hasta la superficie, con el objetivo de excluir otros fluidos indeseables del agujero, para proteger los acuíferos y para proteger la tubería de la corrosión. El acero de la tubería de revestimiento sin cementar puede presentar rápidamente corrosión cuando se expone a salmueras de la formación que se encuentren a alta temperatura, bióxido de carbono y ácido sulfhídrico. Los problemas de corrosión en la tubería pueden resolverse sólo mediante costosos trabajos adicionales, que pueden ocasionar daños colaterales. La tubería también puede someterse a un proceso de erosión debido a la alta velocidad de los fluidos producidos, especialmente cuando partículas sólidas, como las arena de la formación, están siendo transportadas. Los esfuerzos laterales sobre tuberías de revestimiento mal cementadas pueden ocasionar ovalamiento, rozamiento, o aún el colapso completo de la tubería de revestimiento, debido a la sobrecarga en puntos específicos.

El proceso de cementación se termina cuando un incremento en la presión de bombeo indica que la parte superior ha alcanzado la zapata flotadora, y el desplazamiento con fluido de terminación o agua concluye. El pozo se cierra para permitir el fraguado del cemento antes de iniciar la terminación del pozo, seguir perforando, o iniciar las operaciones de terminación del pozo en caso de haber llegado a la profundidad deseada.

Aunque en la actualidad los pozos alcanzan profundidades considerablemente mayores, la tecnología ha avanzado y las prácticas de cementación han cambiado, el método básico de dos tapones se sigue usando hoy en día.

El procedimiento para realizar la cementación primaria debe ser cuidadosamente planeado y ejecutado, ya que solamente hay una oportunidad para realizar el trabajo exitosamente.

I.3.1 Objetivos de las cementaciones primarias²⁶

1. Proporcionar aislamiento en zonas de interés durante la perforación de pozos de aceite, gas y agua.
2. Soportar el peso de la propia tubería de revestimiento.
3. Reducir el proceso corrosivo de la tubería de revestimiento con los fluidos del pozo y con los fluidos inyectados de estimulación.
4. Evitar derrumbes de la pared del pozo en formaciones no consolidadas.

El reto principal es obtener sellos efectivos en las zonas que manejan fluidos a presión. Para lograrlo es indispensable optimizar el desplazamiento del lodo de perforación en el tramo que se va a cementar, consiguiendo así una buena adherencia sobre la pared de la formación y la superficie de la tubería de revestimiento, sin canalizaciones en la columna de cemento y con un llenado completo.

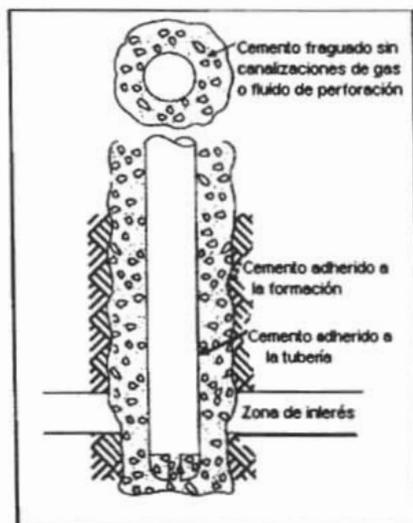


Figura I.1 Cementación primaria

Se ha vuelto práctica común el considerar que para cumplir con el segundo y tercer objetivos, el cemento debe desarrollar un esfuerzo compresivo mínimo de 35 kg/cm² (500 psi) dentro de las primeras 8 horas. Este valor es producto de la experiencia en campo.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Para lograr una buena operación en cada una de las etapas de la cementación primaria, es necesario que el personal encargado de la misma cuente con la experiencia apropiada en los siguientes tópicos:

- Especificaciones de las tuberías de revestimiento.
- Diseño de tuberías de revestimiento.
- Accesorios y equipos de flotación para tuberías superficiales, intermedias, de explotación y complementos.
- Apriete computarizado.
- Anclaje de las tuberías.
- Diseño de lechadas de cemento para las diferentes operaciones.
- Empacadores.
- Unidades cementadoras.
- Manejo de H_2S y CO_2 en las cementaciones.
- Uso de empacadores en tuberías de explotación.

La información del pozo se obtiene de su expediente y constituye la base para diseñar la sarta de tubería de revestimiento por cementar. Con la información del diseño, el ingeniero de campo verifica en el pozo que los materiales recibidos correspondan al diseño. Aquí se deben considerar los siguientes aspectos:

- Revisar las especificaciones de la tubería de revestimiento y de los accesorios (tipo, marca, grado, peso y diámetro).
- Verificar circulación y reología del fluido de control.
- Revisar probables resistencias con la barrena.
- Verificar que el volumen de lodo sea suficiente para la operación de cementación, tomando en cuenta probables pérdidas.
- Llevar a cabo una entrevista con el ingeniero de proyecto, para verificar las condiciones del pozo.
- Tiempo de circulación, presión y gasto.
- Diámetro de las combinaciones que se van a utilizar.
- Características reológicas del fluido de perforación.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

- Peso de la polea viajera durante la introducción de la tubería de revestimiento para verificar su peso.
- Condiciones de las bombas de lodo.
- Estado de las líneas superficiales para el adecuado suministro de agua y fluido de perforación.

En principio, las técnicas de cementación primaria son las mismas sin importar el objetivo de la sarta de tubería de revestimiento o sus dimensiones. Los detalles pueden variar. Es necesaria una serie de tuberías de revestimiento para perforar un pozo y para producir los hidrocarburos de manera satisfactoria. El diseño de tuberías de revestimiento depende de varios factores, entre los que se encuentran:

- Profundidad.
- Diámetro.
- Gradientes de presión de formación y fractura.

Las sarts de tubería de revestimiento deben diseñarse para que sean capaces de resistir los esfuerzos mecánicos y procesos químicos a que se verán sometidas dentro del pozo.

I.3.2 Cementación de tuberías de revestimiento superficiales²⁶

La función principal de la cementación de estas tuberías es aislar formaciones no consolidadas y evitar la contaminación de mantos acuíferos que se encuentren a profundidades someras, mantener el agujero íntegro y evitar la probable migración de aceite, agua o gas de alguna formación productora poco profunda; además de permitir la continuación de la perforación.

Es importante señalar que se incluye en las tuberías de revestimiento superficiales a la tubería conductora. Su función principal es la de permitir la circulación del fluido de perforación hacia la superficie. Esta tubería de revestimiento puede cementarse o hincarse, según lo permita el terreno.

Los diámetros de las tuberías superficiales van de 9 5/8" a 30". El filtrado promedio Q_{30} es de 150 a 200 cm³.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

En esta etapa, se instalan los preventores para el control del pozo. Uno de los problemas que frecuentemente se encuentran en esta etapa es el bajo gradiente de fractura, por lo que es de vital importancia tener un buen diseño de lechada con el objetivo de prevenir una pérdida de circulación. Las bajas temperaturas de formación prolongan los tiempos de fraguado del cemento; además, la irregularidad del agujero debido a las condiciones de la formación dificulta la adecuada remoción del lodo.

Para la cementación de la tubería conductora, los requerimientos de la lechada de cemento son mínimos, debido a la poca profundidad de asentamiento de esta sarta (50 m en promedio). Deben cuidarse dos factores:

1. El tiempo de bombeo debe ser suficiente para efectuar la preparación de la lechada, bombearla dentro del pozo, y realizar su desplazamiento con lodo de manera que el cemento ocupe un intervalo en la parte inferior dentro de la tubería conductora y todo el espacio anular hasta la superficie.
2. El desarrollo de la resistencia a la compresión a las ocho horas debe ser de por lo menos 105 kg/cm^2 (1,500 psi) a condiciones ambientales de presión y temperatura.

Cuando se habla del tiempo mínimo para realizar la operación debe considerarse una velocidad de mezclado de 0.5 a 0.75 ton/min, un tiempo de desplazamiento a un gasto moderado de 4 a 5 bl/min y un factor de seguridad de 1 hora.

Como puede observarse, ambos parámetros están íntimamente relacionados pues si se controla el tiempo de bombeo, ajustado al mínimo necesario para efectuar el trabajo con seguridad, se favorece el desarrollo de la resistencia a la compresión de la columna de cemento.

Cuando se emplea cemento clase G o H es posible que se requiera de un aditivo que acelere la velocidad de reacción de hidratación del cemento acortando el tiempo de bombeo y favoreciendo el desarrollo de la resistencia a la compresión, todo depende de la cantidad de cemento que se vaya a emplear. En estas operaciones generalmente se usa cemento solo, agua, y como se mencionó anteriormente, un aditivo acelerador para ayudar al desarrollo de la resistencia a la compresión. También se puede adicionar un

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

frente lavador de agua sola, con pirofosfato tetrasódico, o en su caso, cualquier frente lavador disponible.

Para perforar la sección del pozo donde se introducirá la tubería de revestimiento superficial se emplean fluidos de control con densidades bajas, debido a que durante la perforación se atraviesan zonas poco consolidadas. En la cementación de esta tubería de revestimiento se emplean generalmente dos lechadas de cemento.

Una *lechada extendida* que cubra la mayor longitud de la tubería que se va a cementar y tiene las siguientes características:

- 1.- La mayor densidad posible, dentro del rango adecuado para no fracturar las formaciones. Se utilizan como aditivos los silicatos, que exhiben por naturaleza baja gravedad específica y alto requerimiento de agua, como: las puzolanas activadas, la esferilita, la kaolinita, la perlita, las tierras diatomáceas o, en su defecto, el metasilicato de sodio anhidro que es un agente extendedor de lechada empleado para disminuir la densidad.
- 2.- El diseño de esta lechada se ajusta a un valor de filtrado. Para lograrlo se emplea un agente controlador de filtrado especial para lechadas extendidas, combinado con un porcentaje bajo (0.2%) de un agente fluidizante que ayude al agente de control de filtrado. Se deben dispersar las partículas sólidas para obtener una mejor distribución de éstas en la lechada, y cuidar que no se origine asentamiento de sólidos ni liberación de agua. Se prefiere un valor de filtrado Q_{30} del orden de 150 cm^3 , o menor, a la temperatura circulante de fondo de pozo.
- 3.- Fluidez. Normalmente las lechadas extendidas emplean una relación alta de agua/cemento. Esto origina que la viscosidad tenga valores bajos y no requiera la adición de más agente fluidizante que el empleado conjuntamente con el agente de control de filtrado.
- 4.- El tiempo de bombeo se controla usando un agente retardador de fraguado para temperaturas bajas o moderadas, con un tiempo de bombeo equivalente al tiempo mínimo necesario para preparar y bombear la lechada a una velocidad de mezclado de

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

1 ton/min, más el tiempo de desplazamiento de la lechada al espacio anular al gasto máximo permisible, más un factor de seguridad de 1 hora; en los casos en donde este tiempo total se mayor o igual a 5.5 horas debido al volumen de cemento empleado, se debe efectuar el trabajo con dos o más unidades cementadoras.

5.- El contenido de agua libre de la lechada deberá tener, invariablemente, un valor de 0 cm^3 , debido a que la liberación de agua generalmente está acompañada de precipitación de sólidos, lo que origina una inestabilidad en la misma y por lo tanto, una cementación deficiente. Cuando sucede este fenómeno con lechadas extendidas, se debe aumentar el porcentaje de agente extendedor o cambiarlo por otro que tenga una mayor capacidad en el manejo del agua libre.

6.- La resistencia a la compresión desarrollada por el cemento debe tener valores superiores a los 35 kg/cm^2 (500 psi), en un tiempo de 12 horas a la temperatura estática de fondo de pozo.

Una lechada de *densidad normal* que cubra de 300 a 400 m en el espacio anular a partir de la zapata de la tubería de revestimiento.

Una lechada de densidad normal es aquella que emplea el requerimiento normal de agua, este valor se obtiene al evaluar la lechada en un consistómetro a presión y temperatura atmosféricas cuando se obtiene una consistencia de 11 B_c en un tiempo de 20 minutos.

El filtrado se mantiene en su valor recomendado mediante la utilización de un agente de control para lechadas con densidad normal y un dispersante a una concentración del orden de 0.2% por peso de cemento, para obtener una mejor distribución del tamaño de la partícula y ayudar al agente de control de filtrado a cumplir con su función.

Después de obtener el valor de filtrado deseado, se procede a mejorar la fluidez de la lechada; se aumenta un poco el porcentaje del agente dispersante, de tal manera que se reduzcan al máximo las pérdidas de presión por fricción durante el desplazamiento en la tubería y el espacio anular. Es importante considerar, cuando se pondera este parámetro, que de acuerdo con las investigaciones, la eficiencia del desplazamiento se mejora

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

cuando el cemento viaja en el espacio anular a una velocidad mínima de 80 m/min y a medida que se incrementa esta velocidad, la eficiencia aumenta. Con las características reológicas del fluido, a temperatura circulante de fondo de pozo, se calcula el gasto, las pérdidas de presión por fricción y la presión de fondo durante la cementación. Esta última debe vigilarse durante toda la operación para que no exceda la presión de fractura de la formación.

El tiempo de bombeo se determina considerando el tiempo de mezclado y bombeo del cemento, más el tiempo de desplazamiento al mayor gasto posible sin fracturar la formación y un factor de seguridad máximo de una hora.

El valor de agua libre de la lechada debe ser invariablemente de 0 cm^3 , por las razones expuestas en la revisión de la tubería conductora.

El cemento fraguado debe desarrollar alta resistencia al esfuerzo compresivo a la temperatura estática de fondo de pozo dentro de las primeras 12 horas después del desplazamiento, debido a que sirve de amarre a la zapata.

I.3.3 Cementación de tuberías de revestimiento intermedias

Esta tubería cumple con la función de mantener la integridad del pozo y permite continuar la perforación hasta alcanzar la profundidad programada. Su diámetro varía de 6 5/8" a 13 3/8" y su profundidad de asentamiento de 300 a 4,600 m. Normalmente es la sección de mayor longitud de las tuberías dentro del pozo y se cementan hasta la superficie, por lo que los preventores se instalan en estas tuberías para perforar las siguientes etapas. Estas sartas generalmente se emplean para cubrir zonas débiles que pueden ser fracturadas con densidades mayores de fluido de perforación, que son necesarias al profundizar el pozo, de esta forma se evitan pérdidas de circulación. También aíslan zonas de presiones anormales. La cementación se puede realizar con un solo diseño de lechada o con dos, si el pozo y el gradiente de fractura lo requieren. El valor normal de filtrado Q_{30} para este tipo de cementaciones se encuentra en el rango de 100 a 150 cm^3 .

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Durante la perforación del intervalo en donde se colocan las tuberías intermedias se emplean fluidos de control de baja densidad, del orden de 1.40 gr/cm^3 , debido a que se atraviesan zonas débiles poco consistentes.

Los procedimientos de diseño de la lechada son similares a los descritos para las tuberías de revestimientos superficiales. Cuando las tuberías intermedias se cementan a temperaturas estáticas de fondo de pozo superiores a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, el diseño de las lechadas requiere la adición de harina sílica en una concentración aproximada de 35% por peso de cemento, para prevenir el efecto de regresión de la resistencia al esfuerzo compresivo del cemento fraguado causado por la alta temperatura.

I.3.4 Cementación de tuberías de revestimiento de explotación

Esta tubería sirve para aislar las formaciones productoras de hidrocarburos de la invasión de fluidos indeseables. Es, también, el revestimiento protector de la sarta de producción y otros equipos usados en el pozo. La cementación de esta sarta de tubería es objeto de minuciosos estudios debido a la calidad exigida para considerarse como una operación exitosa. El aislamiento eficiente de esta tubería permite efectuar apropiadamente los tratamientos de estimulación necesarios para manejar la producción del pozo.

En la mayoría de los pozos, la primera tubería de revestimiento de explotación tiene un diámetro de $7 \frac{5}{8}$, $7 \frac{1}{2}$ ó $6 \frac{5}{8}$ pulgadas; y la segunda es una tubería corta que puede ser de $5 \frac{1}{2}$, $4 \frac{1}{2}$ o bien de $3 \frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro cuando se utiliza la modalidad de tubing less.

I.4 CEMENTACIÓN FORZADA

I.4.1 Definición

La cementación forzada se define como el proceso mediante el cual se fuerza la lechada de cemento a través de orificios o aberturas hacia el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la pared del pozo. Cuando la lechada se fuerza contra una formación permeable, la partículas sólidas se filtran sobre la superficie de la formación al mismo

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

tiempo que la fase acuosa (filtrado del cemento) entra a la matriz de la formación. Un diseño apropiado de la cementación forzada tendrá como resultado un enjarre de cemento que llenará las grietas entre la formación y la tubería de revestimiento. Una vez fraguado, el enjarre forma un sólido casi impenetrable. En los casos donde la lechada es colocada en un intervalo fracturado, los sólidos del cemento deben formar un enjarre sobre las superficies de las fracturas y/o puentear la fractura.

La cementación forzada tiene varias aplicaciones tanto durante la perforación, como en las etapas de terminación de pozos petroleros. Las más comunes son las siguientes:

- Reparar una operación de cementación primaria con canales de lodo, o con una altura insuficiente de la columna de cemento en el espacio anular.
- Eliminar la intrusión de agua de formaciones superiores, inferiores o aún dentro de la misma zona productora de hidrocarburos.
- Reducir la relación gas/aceite (RGA) producida mediante el aislamiento de zonas de gas adyacentes a los intervalos productores de aceite.
- Reparar fisuras en la tubería de revestimiento debidas a la corrosión.
- Abandonar un intervalo no productivo o agotado.
- Taponar zonas de un pozo inyector, cuando así lo requiera el programa de inyección de agua.
- Sellar zonas con pérdida de circulación.
- Evitar la migración de fluidos hacia una zona productora.

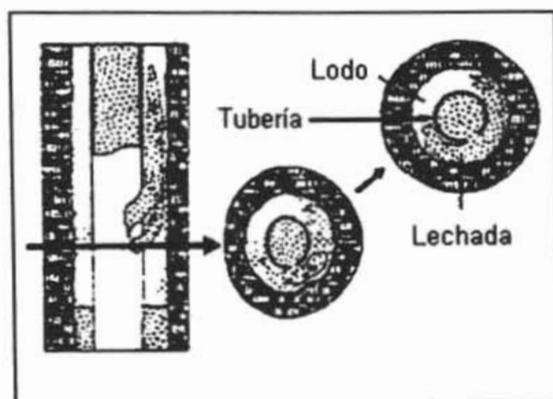


Figura 1.2 Remoción incompleta del lodo por la lechada

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

Sin importar la técnica usada durante una operación de cementación forzada, la lechada de cemento (una suspensión de sólidos) se somete a una diferencial de presión contra el filtro que constituye la superficie de una formación permeable. El fenómeno físico resultante es la filtración, la formación del enjarre de cemento, y en algunos casos el fracturamiento de la formación. La lechada, sujeta a una presión diferencial, pierde parte del agua con la que fue elaborada hacia la formación porosa, por lo que se forma un enjarre de cemento parcialmente deshidratado.

Este enjarre tiene una alta permeabilidad inicial. A medida que se acumulan las partículas de cemento, el enjarre adquiere consistencia y la resistencia se incrementa; esto da como resultado una disminución en el ritmo de filtración, y la presión requerida para deshidratar la lechada se incrementa. La velocidad con la que se acumula el enjarre es función de cuatro parámetros:

- La permeabilidad de la formación.
- La diferencial de presión aplicada.
- El tiempo.
- La capacidad de la lechada para perder fluido a condiciones de fondo de pozo.

Cuando se forza contra una formación de permeabilidad dada, el ritmo al que decrece la deshidratación de la lechada está directamente relacionado con su velocidad de pérdida de fluido. Cuando se forza contra una formación de permeabilidad baja, las lechadas con bajos ritmos de pérdida de fluido se deshidratan lentamente, y el tiempo para realizar la operación puede ser excesivo. Contra una formación de alta permeabilidad, una lechada con alto ritmo de pérdida de fluido se deshidrata rápidamente; en consecuencia, la pared del pozo puede taponarse con el enjarre, y los canales que de otra forma aceptarían cemento podrían bloquearse. En consecuencia, la lechada ideal para una cementación forzada debe ajustarse para controlar el ritmo con el que se desarrolla el enjarre, y permitir de esta manera la formación de un enjarre uniforme sobre todas las superficies permeables.

I.4.2 Técnicas de colocación

Normalmente, la inyección de lechada se realiza a través de perforaciones en la tubería de revestimiento. Existen fundamentalmente dos clasificaciones para las cementaciones forzadas:

➤ **Cementaciones forzadas a baja presión:** La presión de fondo de pozo se mantiene por debajo de la presión de fractura de la formación.

El objetivo de esta operación es llenar las perforaciones y los espacios interconectados con cemento deshidratado. El volumen de cemento es normalmente pequeño porque no se bombea lechada dentro de la formación. Es indispensable un control riguroso de la presión hidrostática, ya que una presión excesiva puede causar un fracturamiento de la formación.

➤ **Cementaciones forzadas a alta presión:** La presión de fondo de pozo excede la presión de fractura de la formación.

En algunos casos, una presión baja no será suficiente para alcanzar los objetivos de la operación. Los canales detrás de la tubería de revestimiento pueden no estar conectados con las perforaciones; las pequeñas hendiduras o microánulos que permiten el flujo de gas no son suficientemente grandes para que la lechada fluya a través de ellos. En estos casos, estos canales deben agrandarse para permitir el flujo de la lechada. En suma, muchas operaciones a baja presión no pueden realizarse si no es posible remover tapones de fluidos o residuos delante de la lechada o dentro de las perforaciones.

La colocación de la lechada de cemento detrás de la tubería de revestimiento se logra fracturando la formación cerca de las perforaciones realizadas a la tubería. Los fluidos que se encuentran delante de la lechada de cemento son desplazados en las fracturas, permitiendo a la lechada llenar los espacios deseados. Incrementos adicionales de presión deshidratan la lechada contra las paredes de la formación, dejando todos los canales (desde la fractura hasta las perforaciones) llenos con el enjarre.

Concepciones erróneas acerca de las cementaciones forzadas:

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

Sólo el agua de mezcla y las sustancias disueltas penetran los poros, mientras que los sólidos acumulados en la superficie de la formación forman el enjarre. Se requeriría una permeabilidad mayor de 100 darcys para que los granos de cemento penetraran en la matriz de una formación de arena. La única forma en la que la lechada penetra a la formación es a través de fracturas y vugulares.

- ***Se requiere de alta presión para realizar una buena cementación forzada.***

Si se excede la presión de formación, se pierde el control sobre la colocación de la lechada, y la lechada invade áreas no programadas. Una vez creada, una fractura puede extenderse a través de varias formaciones, y abrir canales de flujo indeseables entre zonas previamente aisladas.

1.5 TAPONES DE CEMENTO

1.5.1 Definición

La colación de tapones de cemento en un pozo es una operación muy común en la perforación de pozos. Un tapón de cemento involucra un volumen relativamente pequeño de lechada de cemento colocado en agujero descubierto o tubería de revestimiento con objetivos específicos.

1.5.2 Aplicaciones

Dentro de las principales aplicaciones de la colocación de tapones de cemento se encuentran:

Servir como apoyo para el desvío de la trayectoria del pozo arriba de una sección de tubería atrapada o para iniciar una perforación direccional.

Durante las operaciones de perforación en un pozo direccional puede ser difícil lograr el ángulo de desviación correcto cuando se perfora a través de una formación suave o poco consolidada. Es práctica común colocar un tapón de desvío a lo largo de la formación para lograr el curso deseado y alcanzar el objetivo. También, en algunos casos cuando una operación de "pesca" no ha podido realizarse con éxito, generando con ello costos

no previstos, la única alternativa es colocar un tapón de cemento en el fondo del pozo e iniciar el desvío de su trayectoria arriba de esta sección.

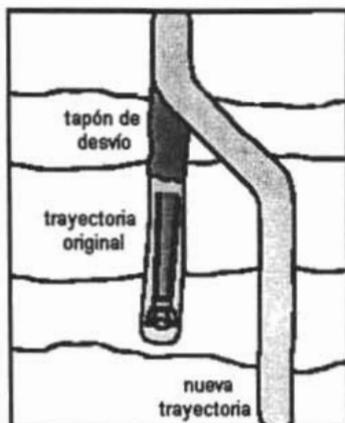


Figura 1.3 Tapón de desvío

Taponar un pozo o algunos intervalos dentro del mismo.

Para sellar intervalos específicos dentro de un pozo seco o agotado se colocan varios tapones de cemento a diferentes profundidades, previniendo con ello la migración de fluidos que pudieran contaminar los acuíferos. En todos los países, donde se realiza la perforación de pozos petroleros, existen disposiciones legales que regulan las condiciones en las que deben abandonarse los pozos.

Resolver problemas de pérdida de circulación durante la fase de perforación.

Las pérdidas de fluido de perforación pueden detenerse colocando una lechada de cemento adecuadamente diseñada a lo largo de la zona de pérdida. Aunque la lechada puede perderse dentro de la zona, está irá adquiriendo dureza y de esta forma puede evitar más pérdidas. Puede colocarse un tapón de cemento en la parte superior de la zona de pérdida, para prevenir una posible fractura cuando se cementa una tubería de revestimiento. Normalmente se agregan aditivos para pérdida de circulación a la lechada para asegurar el éxito de la operación en estas condiciones.

CLASIFICACIÓN DE LAS CEMENTACIONES

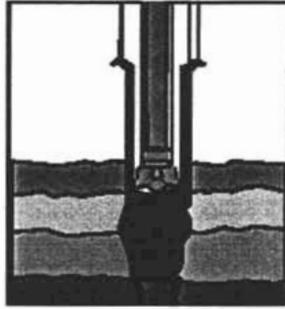


Figura 1.4. Tapón para pérdida de circulación

Tapones para pruebas de formación.

Cuando se programa una prueba de formación, y bajo el intervalo de prueba existe una formación suave o débil, o que pueda aportar fluidos no deseados, se colocan tapones de cemento para aislar la formación a probar. Esto permite evitar el fracturamiento de la zona débil.

II

CEMENTO Y ADITIVOS

II.1 CEMENTO

II.1.1 Antecedentes

Los materiales para cementar o unir rocas, ladrillos o bloques en la construcción datan desde algunas de las primeras civilizaciones; vestigios de esos primeros cementos pueden encontrarse todavía en Europa, África, en Medio y Lejano Oriente. Testimonio de su durabilidad es que todavía existen cementos en excelente estado de conservación en Egipto (cemento de yeso), Grecia (caliza calcinada) e Italia (cementos puzolánicos). Los primeros cementos hidráulicos –materiales que fraguan y solidifican cuando se mezclan con agua- pueden encontrarse en los muelles e instalaciones marinas romanas en el mar mediterráneo. Tales materiales se componían de silicatos residuales de las erupciones volcánicas mezclados con cal y agua. Estos primeros cementos puzolánicos pueden encontrarse cerca de la región italiana de Pozzuoli⁴. En México, la evidencia arqueológica muestra que varias culturas comenzaron a edificar edificios ceremoniales hace unos 3,000 años, para ello utilizaron caliza molida, calcinada y mezclada con agua.

La tecnología del cemento avanzó muy poco en la edad media. Históricamente se atribuye a Joseph Aspdin³, investigador inglés, el desarrollo en 1824 de un tipo básico de material cementante, producido por el calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla, moliendo el producto resultante hasta convertirlo en un polvo fino. Este tipo de cemento, es el conocido como cemento Pórtland, debido a la similitud que presenta este material después de hidratado, con ciertas canteras de caliza de la isla de Portland, Inglaterra. La primera fábrica de cemento Pórtland fue establecida en Inglaterra por James Frost en 1825. Las primeras plantas que se establecieron fuera de Inglaterra se hicieron en Bélgica y Alemania en 1855. En E.U. se fabricó cemento Pórtland hasta 1875; y en México, en 1881 en la población de Jaso, Hidalgo.

Es difícil imaginar la perforación y la terminación de pozos sin cemento. La cementación a pozos petroleros es una práctica muy importante durante toda la vida de un pozo, ya que de ésta, depende el éxito que pueda obtenerse en las operaciones posteriores a la cementación. Por tal motivo, es necesario conocer los diferentes tipos y clases de cemento utilizados en los trabajos de cementación, con el fin de poder seleccionar el cemento adecuado para las condiciones de presión, temperatura, esfuerzos mecánicos y químicos de cada pozo en particular.

El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, fierro y arcilla; molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forman un cuerpo sólido. Esta mezcla se muele, se calcina en hornos horizontales con corriente de aire y se convierte en una sustancia conocida como clinker, el cual contiene todos los componentes del cemento, excepto el sulfato de calcio, que se le agrega como ingrediente final.

Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire cuando se enfrían. De todos los cementos, el Pórtland es el más importante en cuanto a términos de calidad. Es el material idóneo para las operaciones de cementación en pozos petroleros.

El cemento Pórtland es el ejemplo típico de un cemento hidráulico. Fragua y desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. El fraguado y endurecimiento no solamente ocurre si la mezcla de cemento y agua permanece en contacto con el aire, también se presenta si la mezcla se coloca en el agua. El desarrollo de la resistencia es predecible, uniforme y relativamente rápido.

El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se modifican sus propiedades. Tales atributos son esenciales para que un cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas de interés en los pozos petroleros¹⁷.

II.1.2 Fabricación del cemento Pórtland

Las materias primas se muelen y se mezclan vigorosamente, así se obtiene una mezcla homogénea en las proporciones requeridas, para lograrlo existen dos procesos: seco y húmedo⁴.

Proceso seco

Se preparan las materias primas y se pasan a un molino para homogeneizar el tamaño de las partículas y su cantidad. Se pasan por un separador de aire y se les lleva a silos mezcladores para su almacenamiento antes de pasarse al horno rotatorio.

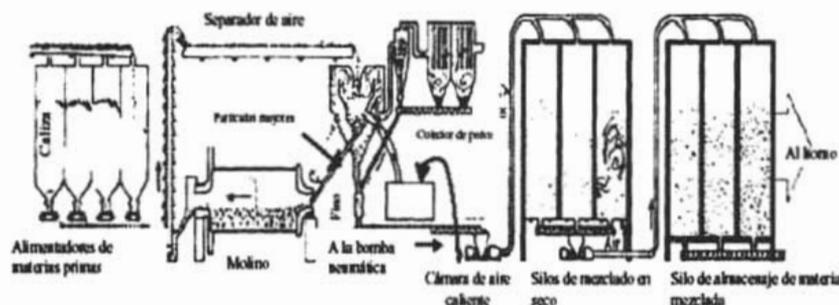


Figura II.1 Proceso de fabricación, primera etapa

Proceso húmedo

A diferencia de lo anterior, este proceso efectúa una mezcla de las materias primas con agua para mantener en forma más homogénea la mezcla. También se les pasa por un molino para uniformizar el tamaño de partícula y, posteriormente, se pasa a contenedores que mantienen en movimiento la mezcla antes de pasarla al horno rotatorio.

Esta mezcla de materia prima seca o húmeda, según el proceso de fabricación, se alimenta en la parte más elevada del horno rotatorio inclinado, a un gasto uniforme, y viaja lentamente por gravedad a la parte inferior del mismo.

El horno se calienta a temperaturas de entre 1,430 y 1,540 °C. Estas temperaturas originan reacciones químicas entre los ingredientes de la materia prima, resultando un material llamado clinker. Éste se deja enfriar a temperatura ambiente con corriente de

aire, en un área inmediata al horno, construida bajo diseño para controlar la velocidad de enfriamiento.

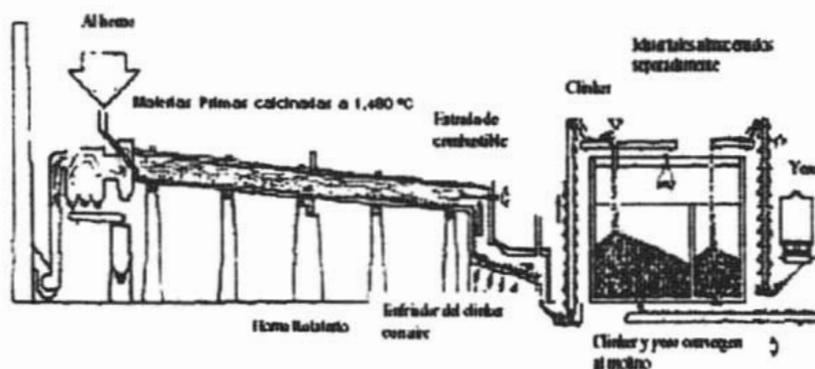


Figura II.2 Proceso de fabricación, segunda etapa

Una vez frío se almacena y se muele posteriormente en molinos de bolas, para darle el tamaño deseado a las partículas. El clínker se introduce al molino de cemento conjuntamente con sulfato de calcio dihidratado, con lo que se obtiene el producto terminado.

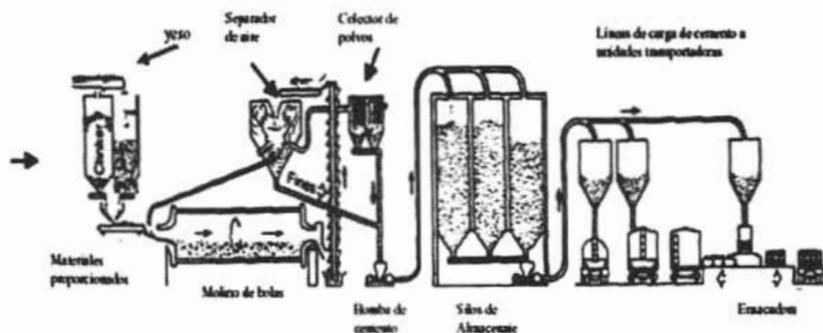


Figura II.3 Proceso de fabricación, tercera etapa

II.1.3 Principales compuestos del cemento y sus funciones

Los óxidos presentes en el cemento Pórtland típico usado en pozos petroleros y su concentración se presentan en la siguiente tabla:

<u>Óxido</u>	<u>Porcentaje</u>
Dióxido de silicio (SiO ₂)	22.43
Óxido de calcio (CaO)	64.77
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	4.10
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4.76
Óxido de magnesio (MgO)	1.14
Trióxido de azufre (SO ₃)	1.67
Óxido de potasio (K ₂ O)	0.08

Tabla II.1 Óxidos presentes en el cemento

Cuando estos productos se hidratan, se combinan para formar cuatro fases cristalinas principales con las fórmulas y designaciones comunes siguientes:

1. **Silicato tricálcico** (3CaOSiO₂) comúnmente conocido como C₃S.

Es el componente más abundante en la mayoría de los cementos y, además, el factor principal para producir la consistencia temprana o inmediata (1 a 28 días). Generalmente los cementos de alta consistencia inmediata contienen en mayor concentración este compuesto; más que el Pórtland común y los que contienen aditivos retardadores de fraguado.

2. **Silicato dicálcico** (2CaOSiO₂) habitualmente conocido como C₂S.

Compuesto de hidratación lenta que proporciona el aumento gradual de resistencia. Ocurre en un periodo mayor de 28 días.

3. **Aluminato tricálcico** (3CaOAl₂O₃) conocido como C₃A.

Tiene influencia en el tiempo de espesamiento de la lechada. Es responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre los cementos. Esta susceptibilidad se clasifica en moderada y alta resistencia al ataque químico, cuando contiene este compuesto entre 8 y 3% respectivamente.

4. **Alúmino ferrito tetracálcico** (4CaOAl₂O₃Fe₂O₃) conocido como C₄AF.

Este compuesto es de bajo calor de hidratación y no influye en el fraguado inicial.

II.1.4 Propiedades físicas del cemento

Cada cemento tiene propiedades físicas específicas, mismas que sirven para su clasificación, entre las principales se encuentran:

Gravedad específica

Denota el peso por unidad de volumen, sin considerar otros elementos, tales como el aire o el agua; es decir, es el peso de los granos exclusivamente; sus unidades son gr/cm^3 , kg/L y ton/m^3 .

Peso volumétrico

Denota el volumen por unidad de masa, considerando el aire contenido entre los granos de cemento; sus unidades son las mismas que la gravedad específica.

Fineza de los granos de cemento

Indica el tamaño de los granos del cemento. Su importancia radica en el impacto que tiene sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Esta característica es una de las principales que se toma en cuenta para la clasificación del cemento. Sus unidades son cm^2/gr , m^2/kg . Representa el área expuesta al contacto con el agua.

Requerimiento de agua normal

Es el agua necesaria para una lechada compuesta solamente de cemento y agua. Representa la cantidad de agua con la que la lechada presenta 11 unidades de consistencia a los 20 min de agitación en el consistómetro atmosférico a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

Requerimiento de agua mínima

Es el agua mínima necesaria para una lechada compuesta solamente de cemento y agua. Representa la cantidad de agua con la que la lechada presenta 30 unidades de consistencia a los 20 min de agitación en el consistómetro atmosférico a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

Ángulo de talud del cemento

Es el ángulo que forma el material granulado cuando se deposita en una superficie plana horizontal; sirve para el diseño de la planta dosificadora de cemento.

II.1.5 Clasificación API de los cementos

Las especificaciones para los cementos utilizados en pozos petroleros fueron establecidas por el *American Petroleum Institute* (API) debido a que las condiciones a las que es sometido el cemento Pórtland en los pozos normalmente difieren radicalmente de las condiciones prevalecientes en aplicaciones dentro de la industria de la construcción. Existen actualmente ocho clases API de cementos Pórtland, designados desde la clase A hasta la clase H. Están clasificados de acuerdo a las profundidades, temperaturas y presiones a las que pueden ser expuestos durante su colocación dentro de los pozos.

Dentro de algunas clases, los cementos se subdividen en función de su resistencia a los sulfatos en: cementos con **resistencia normal**, **resistencia moderada** o **alta resistencia** a los sulfatos.

Las normas API se refieren a *clase* de cemento; mientras que las normas ASTM a *tipo* de cemento

Clase A o tipo I

Es el producto de la molienda del clíncker de cemento Pórtland. Está diseñado para emplearse a 1830 m de profundidad como máximo, con temperaturas hasta de 77 °C, y donde no se requieran propiedades especiales.

Clase B o tipo II

Diseñado para emplearse hasta 1830 m de profundidad, con temperatura de hasta 77 °C, y en donde se requiere moderada resistencia a los sulfatos. Tiene un contenido de Aluminato Tricáclico (C₃A) menor que el de la clase A.

Clase C o tipo III

Está diseñado para emplearse hasta 1,830 m de profundidad como máximo, con temperaturas de hasta 77 °C, donde se requiera alta resistencia a la compresión temprana; se fabrica en alta y moderada resistencia a los sulfatos.

Clase D

Este cemento está diseñado para emplearse de 1,830 a 3,050 m de profundidad con temperaturas de hasta 110 °C y presión moderada. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.

Clase E

Este cemento se usa de 1,830 a 4,270 m de profundidad con temperaturas de hasta 143 °C, en donde existe alta presión. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.

Cemento clase F

Este cemento se usa de 3,050 hasta 4,880 m de profundidad con temperaturas máximas de 160 °C, en donde existe alta presión. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.

Clase G y H

Comúnmente conocidos como cementos petroleros, pueden utilizarse para realizar operaciones de cementación hasta 2,240 m (8,000 ft) tal como se fabrican. Se modifican con aceleradores y retardadores para emplearlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura. En cuanto a su composición química son similares al cemento API clase B. Aunque están fabricados con especificaciones tanto físicas como químicas más rigurosas, por ello son productos más uniformes.

Durante el proceso de fabricación no debe agregarse otra sustancia que no sea agua o sulfato de calcio. Están disponibles en media y alta resistencia a los sulfatos. La composición química de las clases G y H es esencialmente la misma. La diferencia es el área superficial o fineza. El cemento clase H tiene una mayor área superficial que el clase G.

II.1.6 Características del cemento utilizado en la industria petrolera nacional

Las condiciones severas tanto de presión como de temperatura de algunos pozos y las fuertes variaciones en la respuesta a los aditivos observadas entre lotes fabricados de cemento Clase API, son factores que obligan a realizar el diseño de sistemas de lechadas sofisticados, difíciles de controlar, costosos por los altos porcentajes de aditivos que intervienen y el tiempo que se emplea en terminar un diseño.

El cemento clase H, fue seleccionado para corregir estas variaciones, por ser el de mayor calidad con que se cuenta en el ámbito mundial. Así mismo ha sido necesario realizar una serie de pruebas, para establecer los parámetros de control de la calidad del cemento, debido a que la norma mexicana NMX-C-315-1981, no cumple con los requerimientos para las condiciones actuales a las que son perforados los pozos petroleros y la especificación 10 y sus Apartados 10A "Specification for Cements and Materials for Well Cementing", y 10 B "Recommended Practice for Testing Well Cements", de las Normas API, o equivalentes, dejan sin control varios parámetros y a otros les fija valores muy amplios con baja eficiencia en el control de calidad del cemento.

Un cemento Clase H de buena calidad debe proporcionar alta resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, buen sello hidráulico entre capas del subsuelo y bajo consumo de aditivos; convirtiéndose en un producto con características técnicas aceptables y económicamente rentable.

Las especificaciones químicas y físicas para el Cemento Clase H, que establece Petróleos Mexicanos se muestran en la tabla II.2⁵.

Estas características deben ser comprobadas por laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación. Al clinker no deberá adicionarse ningún otro agregado diferente al sulfato de calcio dihidratado y agua, durante el proceso de fabricación.

Especificaciones		
Análisis Químico	Unidades	Contenido
Óxido de Magnesio (MgO)	% en peso	2 máximo
Trióxido de Azufre (SO ₃)	% en peso	3 máximo
Pérdida por Ignición (Plgn)	% en peso	1.5 máximo
Residuos Insolubles (RI)	% en peso	0.5 máximo
Cal libre (CaO L)	% en peso	0.5 máximo
Contenido de Alcalis Totales (Na ₂ O eq)	% en peso	0.5 máximo
Mineralogía		
Silicato Tricálcico (C ₃ S)	% en peso	58 mínimo, 65 máximo
Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	% en peso	3 máximo
Aluminoferrito Tetracálcico (C ₄ AF)	% en peso	15 máximo
Análisis Físico		
Densidad Específica	gr/cm ³	3.14 ± 0.03
Área de Superficie Específica	cm ² /gr	2,700 ± 50
Tamaño Promedio de Partícula	µm (micras)	15 mínimo, 25 máximo
Requerimiento de Agua	%	38
Propiedades Reológicas		
Viscosidad Plástica	cp	35 mínimo, 60 máximo
Punto de Cedencia	kN/9.29 m ² (lb _f /100 ft ²)	0.293 (65) máximo
Densidad de la Lechada	gr/cm ³	1.98 ± 0.01
Agua Libre	%	5.9 máximo
Tiempo de Bombeabilidad en Cédula 5	min	90 mínimo, 120 máximo
Resistencia a la Compresión		
8 h a Temperatura de 311 °K (38 °C) y Presión Atmosférica	MPa (lb/pg ²)	2.07 (300) mínimo
8 h a Temperatura de 333 °K (60 °C) y Presión Atmosférica	MPa (lb/pg ²)	10.34 (1,500) mínimo

Tabla II.2 Especificaciones para el cemento clase H

II.1.7 Cementos especiales

Existen varios materiales cementantes que son utilizados de manera muy efectiva para cementar pozos petroleros, y no se encuentran dentro de las clasificaciones del API o del ASTM. Debido a que estos materiales pueden ser comercializados sin que existan especificaciones establecidas, su calidad está normalmente controlada por el proveedor. Estos materiales incluyen^{6,17,21}:

- Cementos a base de yeso
- Cementos base diesel
- Cementos látex
- Cementos plásticos
- Cementos para ambientes fríos
- Cementos tixotrópicos
- Cementos expansivos
- Cementos pórtland-puzolánicos
- Cementos epóxicos
- Cementos ultrafinos
- Cementos espumados

Cementos a base de yeso

Estos se usan en operaciones de cementación forzada. Están disponibles en dos presentaciones: (1) una forma hemihidratada de yeso ($\text{CaSO}_4 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), y (2) yeso (hemihidratado) que contiene un aditivo resinoso en polvo.

Las características más importantes del cemento a base de yeso son: su capacidad para fraguar rápidamente, desarrollar una alta resistencia temprana y su capacidad de expandirse (aproximadamente 0.3 por ciento). Los cementos a base de yeso se mezclan con cementos API clase A, G o H en concentraciones del 8 al 10 por ciento para generar propiedades tixotrópicas. Esta combinación se utiliza especialmente en pozos someros para minimizar el tiempo de fraguado en el espacio anular.

Debido al alto grado de solubilidad del yeso, se considera un material de taponamiento temporal, a menos que se coloque en una zona del fondo del pozo donde no exista movimiento de agua. En los problemas de pérdida de circulación, se mezclan con

cemento Pórtland en volúmenes iguales para formar un material de taponamiento insoluble; estas mezclas deben usarse con mucho cuidado ya que tienen un fraguado bastante rápido y pueden hacerlo prematuramente durante su desplazamiento.

Cementos base diesel

Son utilizados para el control de agua en las etapas de perforación y producción de los pozos petroleros⁷. Estas lechadas se componen básicamente de cementos API clase A, B, G o H mezcladas en diesel o kerosena con un surfactante. Tienen un tiempo de bombeabilidad ilimitado, y no fraguan a menos que sean colocados en una zona con presencia de agua; ahí, la lechada absorbe el agua y fragua. La función del surfactante es reducir la cantidad de aceite necesario para mojar las partículas de cemento.

Cementos látex

Los cementos látex son una mezcla de cemento API clase A, G o H con un látex, ya sea líquido o en polvo. Estos látex son identificados químicamente como acetato de polivinilo o emulsiones de butadieno-estireno. Con éstos se mejora la solidez y el control de la pérdida de filtrado de la lechada en el agujero. El látex líquido se adiciona a razón de 1 galón por cada saco de cemento aproximadamente. Se emplean en zonas con presencia de gas y tienen la característica de expandirse evitando con ello el flujo de gas a través de la lechada y la creación de canales o fisuras que debilitan la resistencia a la compresión del cemento fraguado.

Cementos plásticos

Los cementos plásticos o resinosos se usan para el taponamiento selectivo en agujeros descubiertos, el taponamiento de los disparos y la cementación de pozos para desechos. Son mezclas de agua, resinas líquidas y un catalizador mezclados con un cemento API clase A,B,G o H; tienen la propiedad de que al aplicarle presión a la lechada, la resina penetra en la zona de interés formando un sello dentro de la formación. Su utilización en los pozos es en volúmenes relativamente pequeños.

Cementos para ambientes fríos

Para condiciones de muy baja temperatura (glaciares, bloques de hielo) es conveniente el uso de este tipo de cementos, con propiedades de fraguado rápido y bajo calor de hidratación, éste último para evitar el derretir la zona congelada. Para tales condiciones

de baja temperatura se utilizan satisfactoriamente mezclas de cementos de yeso y cementos refractarios.

Cementos tixotrópicos

El cemento tixotrópico es una mezcla de cemento Pórtland y sulfato de calcio semihidratado (yeso), que se comporta como un fluido cuando se expone a altos valores de cedencia; pero forma una estructura de gel después de que el bombeo se suspende. Tienen varias aplicaciones, se usan frecuentemente en pozos donde es común el asentamiento excesivo de la lechada de cemento; así como en pozos con zonas débiles que podrían fracturarse aún con bajas presiones hidrostáticas. Gracias a que forman rápidamente una estructura de gel, estos cementos se autosoplan en el espacio anular reduciendo la presión hidrostática y previenen su asentamiento.

Otra aplicación importante es en el tratamiento de pérdidas de circulación durante la perforación. Cuando una lechada tixotrópica entra en la zona de pérdida, la velocidad de la lechada decrece y se empieza a desarrollar una estructura de gel. Con el tiempo, la zona se taponan debido al incremento de la resistencia al flujo. Una vez que el cemento fragua, la zona se consolida de manera efectiva.

Cementos expansivos.

Son aquellos que al adicionarles sulfato de calcio y otras sustancias, aumenta ligeramente de volumen al fraguar. Para ciertas condiciones de fondo de pozo es conveniente tener un cemento que se pueda expandir, como protección contra condiciones problemáticas. Para tales casos, en la industria petrolera se han evaluado varios componentes que se expanden ligeramente cuando se aplican a los cementos. Actualmente se manejan tres tipos comerciales de cementos expansivos:

Tipo K. Contiene como componente al sulfato aluminato de calcio que se mezcla con un cemento Pórtland. Cuando se prepara la lechada, la reacción creada por la hidratación provoca una expansión de 0.05 a 0.20% aproximadamente.

Tipo S. Clasificado por la Portland Cement Association, consiste de un cemento con alto contenido de aluminato tricálcico, similar al cemento API clase A, con aproximadamente 10 a 15% de yeso.

Tipo M. Se obtiene con la adición de pequeñas cantidades de cemento refractario al cemento Pórtland, para producir fuerzas expansivas.

Cementos Pórtland-puzolánicos

Las puzolanas incluyen un material silíceo o artificial que en presencia de cal y agua desarrollan cualidades cementantes. Las puzolanas naturales en su mayoría son de origen volcánico. Las puzolanas artificiales son obtenidas principalmente por la calcinación de materiales naturales como las arcillas, lutitas y ciertas rocas silíceas. El producto de la combustión en el horno es una ceniza ligera muy usada en la industria petrolera como una puzolana. Del uso de cementos puzolánicos resultan lechadas de cemento ligeras, comparadas con lechadas de consistencia similar hechas con cemento Pórtland.

Cementos epóxicos

El cemento Pórtland fraguado es un material extraordinariamente resistente, sin embargo, existen límites más allá de los cuales puede no soportar los esfuerzos a los que se somete. Dentro del pozo el cemento Pórtland está sujeto al ataque químico en ciertas formaciones y por sustancias inyectadas desde la superficie. Los cementos epóxicos son utilizados comúnmente en ambientes donde el cemento estará expuesto a fluidos corrosivos. El cemento Pórtland, el cemento escoria y el cemento puzolánico, son solubles en ácido. La solubilidad puede ser lenta; pero si se presentan corrientes de flujo ácido se acelerará este proceso. La resina epóxica no es soluble en ácido, pero es costosa. Por lo tanto, ésta sólo se utiliza en pozos inyectoros o pozos para desechos en donde se manejarán fluidos de bajo ph. Los cementos epóxicos son productos puros y muy consistentes. La resina epóxica está compuesta de dos elementos: una resina y un activador, formando una mezcla de líquido uniforme. El activador rompe el anillo de resina epóxica y forma un polímero de cadena larga proporcionando una resistencia superior a 10,000 psi. El compuesto puede hacerse dentro de la lechada incorporando estos materiales, los cuales no se disuelven en ácido. El volumen puede aumentar agregando un solvente de bajo costo. El solvente diluirá la resina epóxica y así disminuirá su resistencia. Las resinas epóxicas no son compatibles con el agua; ya que se forma una masa densa imboombeable si la resina y el agua se combinan. A diferencia de otros cementos, los epóxicos son solubles en algunos solventes orgánicos.

Cementos ultrafinos

Los cementos ultrafinos tienen un tamaño de partícula mucho más pequeño que el de los cementos Pórtland convencionales. El tamaño promedio de la partícula es de 2 μm ,

mientras que en los cementos convencionales puede variar de 50 a 100 μm . La principal aplicación de los cementos ultrafinos es en la cementación primaria para obtener lechadas ligeras con un rápido desarrollo de su resistencia al esfuerzo compresivo. Esta clase de cemento se usa también en cementaciones forzadas, en reparación de filtraciones de la tubería de revestimiento, para obturar flujos de agua o en la solución de problemas similares donde se necesite un tamaño de partícula tal que pueda penetrar en espacios más reducidos.

Cementos espumados

Muchas veces a pesar de tener una operación “normal”, después de algunos meses o incluso en un tiempo menor, se pierde el aislamiento del pozo debido a fracturas, microanillos y pérdida de adherencia del cemento. Debido a su rigidez y el valor de módulo de Young que exhibe, el cemento convencional se fractura fácilmente. El cemento, espumado de manera correcta es lo suficientemente dúctil, capaz de deformarse elásticamente y absorber la energía de expansión/contracción sin fracturarse⁷.

Bajo condiciones críticas de perforación como aquellas que involucran bajos gradientes de fractura, flujo de agua somero, zonas lavadas, alto potencial de migración de gas y aguas profundas, el resultado final de una cementación primaria no es siempre satisfactorio, por lo que deben realizarse trabajos remediales (colocación de anillos de cemento, cementaciones forzadas en la boca de liner), y se incrementa la ocurrencia de problemas durante la vida productiva del pozo (flujo de agua temprano, zonas ladronas, daño a las tuberías de revestimiento).

En la actualidad, los procesos de espumado integran programas de ingeniería, personal calificado, pruebas de laboratorio especializadas, equipo automatizado y agentes espumantes con tecnología de vanguardia con el objetivo de obtener un cemento espumado estable y con propiedades óptimas.

El cemento espumado es un sistema en el cual el nitrógeno (reductor de densidad) se incorpora directamente dentro de la lechada para obtener un cemento ligero y además le proporciona propiedades tixotrópicas a la lechada.

El cemento espumado se obtiene utilizando equipo automatizado para mezclar el cemento, agentes espumantes y nitrógeno. Su apariencia física es semejante a la crema de afeitar, tiene una matriz porosa no permeable, con excelentes propiedades mecánicas para las cementaciones.

Entre los beneficios que tiene el cemento espumado se encuentran las siguientes:

- Es resistente a esfuerzos sin que se fracture.
- Tiene una mayor vida útil.
- Genera una menor carga hidrostática.
- Nula agua libre y pérdida de filtrado.
- Control de la migración de gas y agua.
- Alta eficiencia de desplazamiento.
- Flexibilidad operativa.
- Densidad ajustable en tiempo real.

La generación de cemento espumado en el campo, requiere el uso de lechadas normales o de baja densidad, un compresor de gas y la adición de un surfactante para estabilizar la espuma. La disponibilidad de este tipo de cemento, ofrece un control instantáneo de la densidad de la lechada durante la operación. Regulando el gasto de gas inyectado y el gasto de la lechada de cemento, se pueden bombear lechadas espumadas a la densidad deseada. Las propiedades físicas del cemento espumado dependen de su densidad.

Una de las aplicaciones más importantes de los cementos espumados, es la cementación de tuberías de revestimiento superficiales en pozos de aguas profundas, donde la inestabilidad del pozo representa un grave problema debido a la importancia que tiene el control de las presiones de formación y de fractura.

De igual manera, presenta ventajas en la cementación de tuberías de explotación gracias a su mayor durabilidad y a que no presenta pérdida de fluido por filtrado ni agua libre.

Debido a que muchos yacimientos a nivel mundial están llegando a su etapa de madurez, están depresionados; es decir, ya no tienen la presión que tenían cuando empezaron a producir, por lo que se plantea un reto tecnológico para dar soluciones a la

cementación de tuberías de revestimiento en este tipo de yacimientos; el cemento ultraligero espumado forma parte de la respuesta a este desafío.

II.2 ADITIVOS

Hoy en día, los pozos en la industria petrolera cubren un amplio rango de condiciones de temperatura y presión. Existen pozos en los que se trabaja a condiciones por debajo de la temperatura de congelación del agua, y en pozos profundos pueden alcanzarse temperaturas de hasta 260 °C (500 °F). El rango de presión va desde la atmosférica hasta los 2,100 kg/cm² (30,000 psi) en pozos profundos. Sin embargo estas condiciones no representan un obstáculo insuperable para diseñar una lechada de cemento adecuada a las condiciones de pozo, ya que existen en el mercado gran cantidad de aditivos clasificados en categorías según su función, para proveer las características óptimas a las lechadas. Con el surgimiento de los cementos básicos (clases G y H) y el desarrollo del equipo de mezclado, la utilización de los aditivos para cemento ha sido más flexible y simple. Prácticamente todos los aditivos utilizados actualmente son polvos finos que son mezclados con el cemento básico antes de ser transportado al pozo. Sin embargo, si es necesario, la mayoría de ellos puede dispersarse en el agua de mezcla en el sitio de trabajo o puede adquirirse de las compañías de servicio en forma líquida.

Dependiendo de la selección de los aditivos para adicionar a la lechada, las características de la misma se verán afectadas de diversas maneras²¹:

- La densidad puede variar de 0.72 hasta 2.50 gr/cm³ (6.0 a 21.0 lb/gal)
- La resistencia al esfuerzo compresivo puede alcanzar valores de entre 14 y 1,406 kg/cm² (200 y 20,000 psi.)
- El tiempo de bombeabilidad puede variar de unos pocos minutos a más de 36 horas.
- La pérdida por filtrado puede ser tan baja como 25 cm³ en 30 minutos, cuando se mide a través de una malla 325 a una presión diferencial de 70 kg/cm² (1,000 psi).

II.2.1 Clasificación

Actualmente, los aditivos para cemento se clasifican de la siguiente forma^{6,17,21,26}:

- ACELERADORES
- RETARDADORES
- EXTENDEDORES O ALIGERANTES
- DENSIFICANTES
- DISPERSANTES O REDUCTORES DE FRICCIÓN
- CONTROLADORES DE FILTRADO
- CONTROLADORES DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN
- ADITIVOS ESPECIALES

ACELERADORES

Son productos químicos que reducen el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento e incrementan la velocidad de desarrollo de la resistencia al esfuerzo compresivo.

La mayoría de los operadores tienen que esperar a que el cemento alcance una resistencia mínima al esfuerzo compresivo de 35 kg/cm²(500 psi) antes de continuar con las operaciones. A temperaturas por debajo de 38 °C (100 °F), es común que el cemento requiera de uno o dos días para desarrollar esa resistencia. Los aceleradores son útiles para la reducción del tiempo de espera. También se utilizan frecuentemente para compensar el efecto de retraso del fraguado que ocasionan otros aditivos como los dispersantes o los agentes de pérdida de fluido por filtrado.

Normalmente se ocupan concentraciones bajas (entre 2 y 4% por peso de cemento) de aceleradores en las lechadas.

Los aceleradores de fraguado con mayor aplicación son los siguientes:

Cloruro de calcio (CaCl₂)

Esta sal es indudablemente el más eficiente y económico de todos los aceleradores. Sin importar su concentración siempre actúa como acelerador. Normalmente se dosifica del 2 al 4% por peso de cemento, dependiendo del tiempo de bombeo que se desea obtener.

Es el producto que exhibe mayor control en el tiempo bombeable. A concentraciones

mayores del 6% por peso de cemento su comportamiento es muy variable y puede ocurrir un fraguado prematuro en caso de que sea utilizado de esta forma.

Cloruro de sodio (NaCl)

Afecta el tiempo de bombeabilidad y la resistencia al esfuerzo compresivo desarrollada por el cemento Pórtland de distintas formas; dependiendo de su concentración y de la temperatura de fraguado. Actúa como acelerador en concentraciones de hasta un 10% por peso de agua, entre 10 y 18% es básicamente neutral, y produce un tiempo bombeable similar al obtenido con agua dulce. A concentraciones mayores del 18% actúa como retardador. La concentración típica es del 2 al 5% por peso de agua. No es un acelerador muy eficiente, y debe usarse únicamente cuando no se dispone de cloruro de calcio en el pozo.

El agua de mar se utiliza extensivamente para mezclar las lechadas de cemento en pozos marinos. Ésta contiene hasta 25 gr/L (23,000 ppm) de NaCl, por lo que actúa como acelerador. El agua de mar abierto es bastante uniforme, sin embargo dado que puede diluirse con el agua dulce de los ríos, el agua de mar cerca de la costa puede generar una aceleración distinta a la deseada.

Sulfato de calcio (CaSO₄)

Es un material que por sí mismo posee características cementantes y tiene fuerte influencia en la expansión del cemento fraguado; como acelerador se dosifica basándose en el tiempo que se desea y la temperatura a la cual va a estar sometido. Su concentración varía del 50 al 100% por peso de cemento.

RETARDADORES

Son productos químicos que prolongan el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento y brindan la posibilidad de trabajar con él dentro de un amplio rango de temperaturas y presiones.

El incremento de profundidad en los pozos está asociado con altas temperaturas de formación, por ello, es necesario el uso de estos productos químicos que incrementan el tiempo de fraguado, aumentando el tiempo de bombeabilidad.

Los retardadores más empleados son los siguientes:

Lignosulfonatos

Se componen de sales de ácidos lignosulfónicos de sodio y calcio. Son polímeros derivados de la pulpa de la madera. Por tanto, normalmente son no refinados y contienen varias cantidades de compuestos sacáridos con un peso molecular promedio que varía de 20,000 a 30,000.

Debido a que los lignosulfonatos purificados pierden mucho poder retardante, la acción de esos aditivos se atribuye a la presencia de carbohidratos de bajo peso molecular.

Los retardadores a base de lignosulfonatos son efectivos con todos los cementos Pórtland; aunque se desempeñan mejor con cementos de bajas concentraciones de C_3A , y se dosifican en concentraciones de 0.1 a 1.5 % por peso de cemento. Dependiendo de su contenido de carbohidratos, de su estructura química y del tipo de cemento, son efectivos a temperaturas circulantes de fondo de pozo de hasta 122 °C (250 °F) y hasta de 315 °C (600 °F) cuando se mezclan con borato de sodio.

Ácidos Hidrocarboxílicos

Los ácidos hidrocarboxílicos contienen grupos hidroxílicos (OH) y carboxílicos (CHn) en su estructura molecular. Los gluconatos y glucoheptanatos son los materiales más usados en esta categoría. Tienen una poderosa acción para prolongar el tiempo de fraguado y pueden fácilmente causar un retraso excesivo a temperaturas circulantes de fondo de pozo menores de 200 °F, por lo que se aplican en un rango de temperatura de 93 °C a 149 °C (200 a 300 °F).

Otro ácido hidrocarboxílico con un fuerte efecto retardante es el ácido cítrico, que también es efectivo como dispersante y se usa normalmente en concentraciones entre 0.1 y 0.3% por peso de cemento.

De manera similar a los lignosulfonatos, los ácidos hidrocarboxílicos actúan de manera más eficiente con cementos de bajo contenido de C_3A .

Compuestos sacáridos

Los compuestos sacáridos son conocidos como poderosos retardadores de cementos Pórtland, aunque no son muy utilizados en la cementación de pozos por ser muy sensibles a pequeñas variaciones en sus concentraciones.

Derivados de la celulosa

Los polímeros de la celulosa son polisacáridos derivados de la madera o de otros vegetales, y son estables a las condiciones alcalinas de las lechadas de cemento. El retardador celulósico más común es el corboximetil hidroxietil celulosa (CMHEC). Es efectivo hasta temperaturas de 120 °C (250 °F), también se utiliza como agente de control de pérdida de fluido por filtrado; además, incrementa significativamente la viscosidad de la lechada.

Organofosfatos

Se aplican a temperaturas circulantes de fondo de pozo tan altas como 204 °C (400 °F). Presentan insensibilidad a ligeras variaciones en la composición del cemento y tienden a reducir la viscosidad de lechadas densificadas.

EXTENDEDORES O ALIGERANTES

Son materiales que disminuyen la densidad de los sistemas de cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado.

Las lechadas elaboradas solamente con cemento API clase A, B, G o H usando la cantidad de agua recomendada tienen densidades mayores a 1.98 gr/cm³. Muchas formaciones pueden no soportar la presión generada por columnas grandes de estas lechadas. En consecuencia, se utilizan este tipo de aditivos para disminuir la densidad de la lechada. Estos aditivos también reducen el costo de la lechada, incrementan el punto de cedencia y reducen la pérdida de fluido por filtrado. La densidad de la lechada puede reducirse agregando agua, sólidos de baja gravedad específica, o ambos.

Los extendedores más usados son los siguientes:

Bentonita

Requiere el 530 % de agua de su propio peso; es decir, 5.3 litros de agua por kilogramo de bentonita; se puede dosificar hasta un 4% por peso de cemento sin que perjudique al cemento fraguado dado que, en concentraciones mayores el cemento hidratado presenta en corto tiempo una regresión en su resistencia a la compresión por la alta hidroscopía de la bentonita.

Puzolana

Son cenizas volcánicas que por sí solas no tienen características cementantes, pero que mezcladas con el cemento, reaccionan con la cal libre de éste.

El cemento fraguado que contiene puzolana adquiere características benéficas como las siguientes:

- Plasticidad, pues soporta vibraciones y golpes de tubería al seguir perforando.
- Evita resquebrajamiento del anillo de cemento al efectuar los disparos en las zonas de interés.

Metasilicato de sodio anhidro

Este extendedor es muy eficiente y económico. Es compatible con la mayoría de aditivos químicos; maneja un porcentaje variable de agua en función del porcentaje que se utilice. Se dosifica del 1 al 3% por peso de cemento.

DENSIFICANTES

Son materiales que incrementan la densidad de los sistemas de cemento.

Para contrarrestar las altas presiones que regularmente se encuentran en pozos profundos, se requieren lechadas con alta densidad. Para incrementar la densidad de una lechada un aditivo debe tener las siguientes características:

- Tener una gravedad específica del orden de 4.5 a 5.0.
- Tener un bajo requerimiento de agua.
- No causar una reducción significativa de la resistencia al esfuerzo compresivo.
- Tener un efecto mínimo en el tiempo de bombeabilidad.
- Presentar un tamaño de partícula uniforme.
- Ser químicamente inerte y compatible con otros aditivos.
- No interferir con la toma de registros en el pozo.

Los materiales más usados para densificar las lechadas son:

Barita

Tiene un peso específico de 4.23 gr/cm^3 y requiere 22% de agua de su propio peso. No tiene influencia en el tiempo de bombeabilidad. Se dosifica del 20 al 40% por peso de cemento cuando se desea obtener una lechada de alta densidad.

Limadura de hierro

Este producto tiene un peso específico de 5.02 gr/cm^3 y requiere el 3% de agua de su propio peso. Se emplea en concentraciones de hasta el 50% por peso de cemento.

Otro procedimiento que se emplea para aumentar la densidad de la lechada es reducir el agua de mezcla, adicionando un agente reductor de fricción para disminuir el efecto de incremento de viscosidad.

DISPERSANTES O REDUCTORES DE FRICCIÓN

Son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento.

Los agentes dispersantes son agregados a las lechadas de cemento para mejorar sus propiedades de flujo. Las lechadas dispersas tienen baja viscosidad y pueden ser bombeadas en régimen turbulento a bajas presiones, de esa forma minimizan la potencia hidráulica requerida y reducen la posibilidad de causar pérdidas de circulación y deshidratación prematura. Los dispersantes disminuyen el punto de cedencia y el esfuerzo gel de la lechada.

Generalmente, son sales de ácidos grasos y se dosifican del 0.2 al 2.5% por peso de cemento.

AGENTES CONTROLADORES DE FILTRADO

Son materiales que disminuyen la pérdida de la fase acuosa de los sistemas de cemento cuando se encuentran frente a zonas permeables.

La pérdida de fluido de las lechadas de cemento se reduce con aditivos para:

- Prevenir la deshidratación prematura o pérdida de agua en las zonas porosas, particularmente cuando se cementan tuberías de producción cortas.
- Proteger formaciones sensibles.
- Mejorar las cementaciones forzadas.

Existen dos funciones principales que deben realizar los aditivos para control de filtrado:

- Formar películas o miscelas que controlan el flujo de agua de la lechada de cemento y retardan la deshidratación.

- Mejorar la distribución del tamaño de partícula, esto determina la forma en que el líquido se mantiene o es atrapado en la lechada.

AGENTES CONTROLADORES DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

La pérdida de circulación durante las operaciones de cementación primaria es un serio problema que origina, en la mayoría de los casos, la necesidad de realizar una cementación remedial. Son materiales que controlan la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o hacia fracturas.

ADITIVOS ESPECIALES

Existen algunos materiales que se agregan a las lechadas de cemento que no entran en ninguna categoría de las revisadas anteriormente. Estos incluyen agentes antiespumantes, aditivos fibrosos, trazadores radioactivos y descontaminantes de lodo.

Varios aditivos pueden generar espuma cuando se mezcla la lechada. La espuma puede ocasionar gelatinización de la lechada, así como propiciar cavitación en el sistema de mezclado. Además, debido al aire atrapado, pueden registrarse valores de densidad de la lechada incorrectos. Los agentes antiespumantes se agregan a la lechada para prevenir estos problemas.

Existen materiales fibrosos que agregados al cemento en concentraciones de entre 0.15 y 0.5% por peso de cemento, incrementan la resistencia del cemento a los esfuerzos asociados con la perforación. Dichos materiales transmiten los esfuerzos localizados de manera más uniforme dentro de la columna de cemento.

La mayoría de los aditivos afectan a más de una propiedad física de la lechada de cemento; por esta razón, el tipo y concentración de cada aditivo debe seleccionarse con mucho cuidado basándose en pruebas de laboratorio en las que se simulan las condiciones de presión y temperatura del pozo a cementar. Generalmente la concentración de aditivos a utilizar se expresa en por ciento de aditivo por peso de cemento.

IL3 FACTORES QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Entre los aspectos más importantes que se consideran al diseñar una cementación se incluyen: las profundidades de los intervalos de interés, las temperaturas del pozo, las condiciones de fondo de pozo y los problemas que se han tenido durante la perforación. Los siguientes son factores que afectan el comportamiento de una lechada y que por lo tanto, se toman en cuenta en el diseño de la misma:

- **Profundidad del pozo**
- **Temperatura de fondo de pozo**
- **Presión ejercida por la columna de lodo**
- **Viscosidad y contenido de agua de la lechada**
- **Tiempo de bombeabilidad**
- **Resistencia del cemento para soportar la tubería**
- **Calidad del agua de mezcla**
- **Características del fluido de perforación**
- **Densidad de la lechada**
- **Permeabilidad del cemento fraguado**
- **Control del filtrado**
- **Resistencia a la corrosión**
- **Ángulo de desviación del pozo**
- **Migración de Gas**
- **Calidad del mezclado**

Presión, Temperatura y Tiempo de bombeabilidad

La presión y temperatura de fondo de pozo son los factores que afectan en mayor medida el comportamiento de la lechada, su efecto principalmente se manifiesta en el tiempo de bombeabilidad y en cómo el cemento adquiere la resistencia necesaria para soportar la tubería de revestimiento. De ellas, la temperatura es la que tiene un mayor efecto. A medida que la lechada se desplaza hacia el fondo del pozo, la temperatura de las formaciones adyacentes se incrementa. Mientras más elevada sea la temperatura, la lechada se hidrata, fragua y desarrolla resistencia con mayor rapidez.

La presión ejercida sobre la lechada por la carga hidrostática de los fluidos del pozo también reduce el tiempo de bombeabilidad del cemento. En pozos profundos, la presión en el fondo del pozo puede exceder los $1,400 \text{ kg/cm}^2$ (20,000 psi).

Para prevenir el retraso excesivo del fraguado de la lechada, es necesario considerar en el diseño las temperaturas circulante y estática de fondo; así como la diferencia de temperatura entre cima y base de la tubería de revestimiento. La temperatura circulante de fondo es aquella a la cual teóricamente estará expuesta la lechada en el fondo del pozo durante su colocación en el espacio anular; por lo tanto, es la que debe utilizarse para efectuar las pruebas de tiempo de bombeabilidad. La temperatura estática de fondo es importante para el desarrollo de la resistencia al esfuerzo compresiva, normalmente se calcula a partir del gradiente geotérmico promedio del área; o bien, puede estimarse con los datos obtenidos de registros. El tiempo que toma la lechada en alcanzar el fondo, depende del diámetro de la tubería de revestimiento, de la profundidad de asentamiento y del gasto empleado en el desplazamiento.

Viscosidad y contenido de agua de la lechada

Durante la cementación, la lechada deberá tener una viscosidad tal que logre la máxima eficiencia de desplazamiento del lodo y además permita una buena adherencia entre la formación y la tubería. Para lograrlo, las lechadas se mezclan con una cantidad de agua adecuada con el fin de que no exista liberación de ésta cuando ocurre el fraguado. El tamaño de partícula, el área de contacto y los aditivos incorporados influyen en la cantidad de agua requerida para lograr una viscosidad determinada.

Tiempo de bombeabilidad

Tiempo de bombeabilidad es aquel durante el cual el cemento permanece en condiciones para ser bombeado con presiones razonables. Comienza desde el mezclado de la lechada y debe ser suficiente para mezclar la totalidad de la lechada y bombearla al espacio anular hasta la profundidad deseada. Es tal vez la propiedad más crítica en el proceso de desplazamiento. Las recomendaciones específicas para el tiempo de bombeabilidad dependen en gran parte del tipo de operación, de las condiciones del pozo y del volumen de lechada que va a bombearse.

Resistencia del cemento para soportar la tubería

El cemento requiere de poca resistencia para soportar una tubería de revestimiento. Algunos estudios han demostrado que un revestimiento de 3 m (10 ft) en el espacio anular pueden soportar más de 61 m (200 ft) de tubería de diámetros pequeños a grandes, aun bajo no muy buenas condiciones de adherencia. Las variables de campo (procedimientos de terminación, condiciones de curado) no pueden conocerse ni controlarse lo suficiente como para establecer un tiempo de curado; el cual es el tiempo transcurrido desde la introducción de las muestras en la autoclave hasta que se prueba la muestra para determinar su resistencia.

Calidad del agua de mezcla

Las funciones básicas del agua en una lechada son mojar las partículas de cemento y servir de medio de transporte para llevarlos a la ubicación deseada dentro del pozo. La calidad del agua de mezclado es un parámetro muy importante para la planeación de la cementación. La hidratación y el curado de la lechada de cemento pueden reaccionar de diferente forma con la variación en la cantidad de sedimentos, materia orgánica e inorgánica que pueda contener el agua. Ésta debe ser lo más pura que sea posible.

Los requerimientos del agua de mezclado pueden variar, dependiendo principalmente de la clase de cemento y la densidad de la lechada. Muchos trabajos de cementación utilizan agua de la misma localización. Si el agua necesita ser transportada a una localización donde hay escasez o mal suministro, se debe calcular el volumen exacto, ya que esto es importante para asegurar el adecuado suministro de agua. Los requerimientos de volumen pueden ser considerables si la operación requiere de una lechada de baja densidad.

Características del fluido de perforación

Un problema de suma importancia en la cementación de pozos petroleros es la remoción efectiva del fluido de perforación durante el desplazamiento. La contaminación del cemento con fluido de perforación puede dañar los sistemas de cemento. Este fenómeno ocurre en la mayoría de las operaciones; pero es más probable que ocurra cuando el cemento tiene contacto con lodo que ha sido tratado extensivamente con químicos. El volumen de cemento es pequeño en relación con el volumen de lodo, y la severidad de la contaminación con cemento es muy difícil de determinar. La mejor manera de

combatir los efectos nocivos de los aditivos del fluido de perforación es utilizar baches lavadores y espaciadores, efectuando pruebas para verificar su compatibilidad.

Densidad de la lechada

La densidad del cemento es un importante criterio de diseño. Ésta deberá ser tal que no provoque pérdidas de circulación, ni el fracturamiento de las formaciones; mientras que al mismo tiempo, impide el flujo de fluidos de la formación hacia el interior del pozo. Durante las operaciones de campo, la densidad de la lechada se determina por medio de una balanza de lodos; pero en la actualidad hay dispositivos integrados a las mezcladoras o al sistema de mezclado que esté en uso; para ir observando la densidad de la mezcla en un registro electrónico, con estos dispositivos es posible observar y controlar la densidad de la mezcla desde una computadora.

Permeabilidad del cemento fraguado

Aún cuando al diseñar la lechada prácticamente no se da importancia a la permeabilidad del cemento fraguado, existen métodos para medir tanto la permeabilidad al agua como al gas. Los cementos fraguados tienen menos permeabilidad que las formaciones productoras, estudios sobre este tema muestran que a temperaturas menores de 94 °C (200 °F) la permeabilidad del cemento decrece con el tiempo y la temperatura¹¹.

La permeabilidad al gas del cemento fraguado, normalmente es mayor que la que presenta al agua. Los cementos que han fraguado de 3 a 7 días tienen una permeabilidad al gas menor que 0.1 md. La dolomita y la caliza tienen un promedio de 2 a 3 md y las areniscas entre 0.1 y 2,000 md.

Control del filtrado

El control del filtrado de la lechada es muy importante en operaciones de cementación de tuberías de producción cortas y en las cementaciones forzadas. La pérdida de filtrado a través del medio poroso causa un incremento en la viscosidad de la lechada y la formación de enjarre, lo que provoca una restricción al flujo. Los factores que inciden en la pérdida de filtrado de las lechadas de cemento son el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad de la formación.

Resistencia a la corrosión

La susceptibilidad de los cementos a la corrosión por los fluidos dentro del pozo es un factor que debe ser considerado en cualquier cementación. Los fluidos que contienen sulfato de sodio ó magnesio, y cloruro de magnesio se encuentran entre los más dañinos.

Los sulfatos, reconocidos como las sustancias químicas más corrosivas para el cemento, reaccionan con la cal y el aluminato tricálcico del cemento para formar grandes cristales de sulfoaluminato cálcico. Estos cristales requieren un espacio poroso mayor que el que el cemento fraguado puede proveer, de esta forma, causan una expansión excesiva y el eventual deterioro del cemento.

Ángulo de desviación del pozo

El ángulo de desviación del pozo influye en la estabilidad de la lechada. Se han realizado estudios^{15,19} que indican un incremento de agua libre entre 8 y 9% en pozos con un ángulo de desviación del orden de 45°. Existen circunstancias que favorecen la formación de una sección de agua libre entre las que se encuentran las fuerzas de cohesión entre los sólidos, la longitud de la columna de lechada y el área del espacio anular.

Migración de Gas

La migración de fluidos por el espacio anular puede ocurrir durante la perforación o la terminación del pozo y ha sido reconocido como un problema severo en la industria petrolera. Consiste en la invasión de fluidos de la formación al espacio anular, provocada por una disminución de la presión de fondo de pozo. Cuando la presión hidrostática llega a un valor menor que la presión de formación, los fluidos de ésta pueden migrar a una zona de menor presión, e incluso hasta la superficie; siendo la migración de gas la más frecuente.

Estudios recientes^{13,23} han demostrado que el flujo o migración de gas se presenta cuando la lechada de cemento ya colocado en el espacio anular, pasa por una etapa de transición que consiste en cambiar su comportamiento de fluido verdaderamente hidráulico, a una masa altamente viscosa, que paulatinamente muestra características de un estado sólido. El tiempo de transición se inicia cuando la lechada desarrolla

suficiente gelatinización para restringir la transmisión completa de la presión hidrostática y termina cuando el cemento desarrolla suficiente consistencia para evitar el flujo de gas a través él.

La canalización de gas es un problema potencial cuando la cementación de la tubería de revestimiento se efectúa en intervalos productores.

La migración de gas es un problema complejo que involucra el control de la densidad, la remoción eficiente del fluido de perforación, la hidratación y la adherencia del cemento con la tubería de revestimiento y la formación. Debido a la diferencia de densidades entre el fluido de perforación, el bache lavador, el bache espaciador y la lechada de cemento, la presión hidrostática ejercida contra la cara de la formación no es constante durante la operación.

La adecuada remoción del fluido de perforación ayuda a evitar la migración de gas hacia la superficie, el flujo de gas se ve favorecido por la existencia de canales continuos de lodo dentro del cemento fraguado, o entre las superficies de contacto cemento-tubería y cemento-formación.

Calidad del mezclado

Durante los procesos de mezclado en campo, debe aplicarse una energía adecuada para mojar completamente las partículas sólidas y mejorar la eficiencia de los aditivos en la lechada, tal como se realizó previamente en el laboratorio; con ello se asegura que el comportamiento de la lechada durante la operación sea aproximadamente igual al que exhibió bajo condiciones controladas en el laboratorio. En éste se verifica que el diseño de lechada propuesto sea fácilmente mezclable, de no ser así se agregan aditivos para mejorar el mezclado, o inclusive, se modifica el diseño completo.

II.4 DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO

La lechada de cemento es un producto químico de composición compleja. El factor determinante con el que inicia el diseño de una lechada es el tipo de operación a realizar. En ocasiones es posible apoyar el diseño con pruebas o trabajos similares disponibles.

Las compañías de servicio cuentan con una serie de manuales que proporcionan información para realizar los cálculos necesarios para el diseño de lechadas de cemento.

Normalmente contienen datos como los siguientes:

- Volúmenes de tuberías de revestimiento, perforación y producción
- Volumen entre la tubería de revestimiento y la pared del pozo
- Volumen entre tubería de revestimiento y tubería de revestimiento
- Propiedades de las tuberías de revestimiento y producción
- Características del equipo de bombeo
- Características de los aditivos

La cantidad de cemento, agua y aditivos recomendada para el diseño de la lechada variará para cada caso particular; el agua normal que recomienda el API para el cemento tipo H es de 38%.

Para determinar la densidad de la lechada, se deben sumar los pesos de todos los componentes del cemento y dividirlos entre la suma de los volúmenes correspondiente.

$$\rho_{\text{lechada}} (\text{gr/cm}^3) = \frac{W_{\text{cemento}} + W_{\text{agua}} + W_{\text{aditivos}}}{V_{\text{cemento}} + V_{\text{agua}} + V_{\text{aditivos}}}$$

Donde:

W es el peso (gr)

V es el volumen (cm³)

El rendimiento de la lechada es, entonces, el volumen que ocupe por unidad de medida del cemento conjuntamente con el agua y los aditivos. El cemento se mide en sacos, y de esta manera se calcula el número de sacos requeridos para llenar el espacio anular.

Para simplificar el cálculo de la densidad de la lechada, éste se realiza considerando un saco de cemento.

Ejemplos de Cálculo

1. Considerando cemento clase H, determinar las cantidades de cemento y agua necesarias para realizar el control de calidad a una lechada de cemento, además, calcular su densidad y rendimiento.

Solución

De tablas, la densidad específica del cemento clase H es de 3.14 gr/cm^3 .

Con esta información, puede construirse la siguiente tabla:

Componente	Peso (kg)	Requerimiento de agua (L/sc)	Rendimiento (L)	Fracción
Cemento	50	19	15.8	0.7246
Agua	19		19.0	0.2754
SUMA	69	19	34.8	1.0000

$$\rho = \frac{69 \text{ kg}}{34.8 \text{ L}} = 1.98 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Para efectuar cualquier prueba de laboratorio se considera que el volumen de lechada debe ser de 600 ml.

Se calcula el peso de la lechada para el volumen establecido:

$$\text{Peso} = 1.98 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 600 \text{ cm}^3 = 1,188 \text{ gr}$$

Con los datos de la tabla se obtiene:

$$\text{Rendimiento de la lechada} = 34.8 \frac{\text{L}}{\text{sc}}$$

$$\text{Cantidad de cemento clase H} = 0.7246 * 1,188 \text{ gr} = 860.82 \text{ gr}$$

$$\text{Cantidad de agua} = 0.2754 * 1,188 \text{ gr} = 327.18 \text{ gr}$$

2. Obtener las cantidades de cemento clase H, agua y aditivos necesarios para obtener una lechada de 1.8 gr/cm^3 con la que se efectuarán las pruebas de laboratorio recomendadas por el API, utilizando una concentración de 3% de metasilicato de sodio anhidro como aligerante, el cual tiene un requerimiento de agua del 100 % de su peso y densidad específica de 2.4 gr/cm^3 .

Solución:

Con la información proporcionada se construye la siguiente tabla:

Componente	Peso (kg)	Requerimiento de agua (L/sc)	Rendimiento (L)
Cemento	50.0	19	15.8
Metasilicato de sodio anhidro	1.5	1.5x	0.625
Agua	19.0+1.5x		19.0+1.5x
SUMA	70.5+1.5x	19+1.5x	35.425+1.5x

Entonces:

$$1.8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = \frac{70.5 + 1.5x}{35.425 + 1.5x} \quad ; \text{ el requerimiento de agua } x = 5.6125$$

Por lo que la tabla queda:

Componente	Peso (kg)	Requerimiento de agua (L/sc)	Rendimiento (L)	Fracción
Cemento	50.0	19	15.8	0.6336
Metasilicato de sodio anhidro	1.5	8.42	0.625	0.0190
Agua	27.42		27.42	0.3474
SUMA	78.92	27.42	43.85	1.0000

Para 600 ml de lechada:

$$\text{Peso} = 1.8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * 600 \text{ cm}^3 = 1,080 \text{ gr}$$

$$\text{Cantidad de cemento clase H} = 0.6336 * 1,080 \text{ gr} = 684.29 \text{ gr}$$

$$\text{Cantidad de metasilicato de sodio anhidro} = 0.0190 * 1,080 \text{ gr} = 20.52 \text{ gr}$$

$$\text{Cantidad de agua} = 0.3474 * 1,080 \text{ gr} = 375.19 \text{ gr}$$

III

PRUEBAS DE LABORATORIO

III.1 ANTECEDENTES

Las pruebas que se realizan en el laboratorio tanto al cemento como a los materiales que se utilizan para cementar son una parte esencial del proceso integral de la cementación. Las pruebas inician en los lugares donde se fabrican el cemento y los aditivos para monitorear la calidad del producto; y continúan durante las etapas de diseño de la lechada en los laboratorios de las compañías de servicios cuando se desarrolla una formulación específica que posea las características necesarias para realizar la cementación en cuestión en las mejores condiciones de operación. La evaluación es frecuentemente realizada a muestras de planta en el momento en que la mezcla es preparada, o a muestras tomadas de los silos de almacenamiento cuando el material es llevado a un lugar operativamente estratégico.

Muestras de mezcla tanto secas como de lechada, pueden obtenerse en el proceso de mezclado para una evaluación subsecuente, lo mismo en el laboratorio o en la localización del pozo usando un laboratorio móvil. Las pruebas de laboratorio realizadas a muestras de campo pueden usarse algunas veces como ayuda en investigaciones posteriores a la realización de la operación.

En general, existen dos tipos de pruebas de laboratorio para el cemento y los materiales de cementación: evaluación del desempeño y caracterización química. El laboratorio típico de campo está relacionado primordialmente con la evaluación del desempeño de los cementos a través de la medición física de las propiedades específicas de la lechada

PRUEBAS DE LABORATORIO

simulando las condiciones de fondo de pozo. Este tipo de evaluación se usa principalmente en las etapas de diseño de la lechada que va a utilizarse para efectuar la operación, y en las etapas de ejecución para monitorear la preparación adecuada de la mezcla en campo. La caracterización química normalmente incluye análisis cualitativos y cuantitativos de los componentes de la lechada antes de mezclarlos, para asegurar que sean adecuados para su uso.

Se utilizan técnicas de análisis para propósitos de control de calidad en el lugar de manufactura, para determinar que los componentes que integran el cemento seco estén presentes en las cantidades deseadas, y que son suficientemente mezcladas en la planta. Tales técnicas se usan también para monitorear la calidad del agua de mezcla en la localización del pozo. La correcta aplicación de una amplia variedad de pruebas de laboratorio provee de información indispensable para alcanzar una cementación exitosa.

A continuación se describen las pruebas físicas recomendadas por el API (Instituto Americano del Petróleo), en su publicación correspondiente a las prácticas recomendadas para pruebas efectuadas a cementos utilizados en pozos petroleros que son realizadas normalmente en los laboratorios instalados para tal fin en las zonas petroleras y centros de investigación^{1,2}. Esta descripción contiene especificaciones para lechadas elaboradas únicamente con cemento y agua que corresponden a las pruebas de control de calidad del cemento, así como procedimientos operacionales diseñados para incluir todas las lechadas de cemento convencionales.

Los procedimientos están diseñados para simular las condiciones de fondo de pozo para desarrollar las pruebas en un laboratorio de campo razonablemente equipado, teniendo en cuenta las diferencias entre las condiciones reales de fondo de pozo y las limitaciones prácticas para simular tales condiciones en el laboratorio.

III.2 DEFINICIONES

Agua Libre

Es el agua acumulada en la parte superior de una columna de lechada de cemento, cuando esta se mantiene en reposo durante dos horas.

Agua mínima

Es la relación de agua que proporciona una consistencia de 30 unidades API. (Es la mínima relación de agua que puede usarse en una mezcla para obtener una lechada de agua bombeable).

Agua Normal

Es la relación que proporciona una viscosidad de 11 unidades API de consistencia. (Es el agua recomendada para mezclar un cemento).

Cemento Hidráulico

Es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento; que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer; incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.

Clinker Pórtland

Es el producto artificial obtenido por sinterización de los crudos correspondientes, es decir, por la calcinación y sinterización de los mismos a la temperatura y durante el tiempo necesario, y por el enfriamiento adecuado a fin de que dichos productos tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida. Los crudos de Clinker Pórtland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen Cal (CaO), Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), Óxido Férrico (Fe_2O_3) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan.

Consistómetro atmosférico

Equipo empleado para determinar la consistencia de la lechada a condiciones atmosféricas.

Densidad de la lechada

Es el peso por volumen (g/cm^3) de la lechada de cemento.

Lechada de cemento

Mezcla de cemento y agua a diferentes proporciones.

Lote

Cantidad de Material que se prepara en una molienda de cemento a granel o en saco.

Muestra representativa

Conjunto de especímenes mezclados para formar una muestra homogénea.

Muestra representativa reducida

Conjunto de muestras tomadas durante la fabricación de un lote, las cuales se homogenizan para formar una muestra general con un peso aproximado de 10 kg.

Muestra para análisis

La mitad de la muestra representativa reducida, suficiente para verificar en ella todas las pruebas requeridas por la norma vigente.

Punto de cedencia

Fuerza aplicada a un fluido para iniciar su movimiento. Parámetro reológico de los fluidos en el modelo Plástico de Bingham.

Relación de agua

Es la relación del peso del agua utilizada con respecto al peso de cemento seco empleado.

Reología

Parte de la física que estudia los parámetros de deformación y en general el flujo de fluidos, mediante un viscosímetro rotacional en el cual se obtienen lecturas de esfuerzos a la torsión a diferentes velocidades de rotación.

Sulfato de calcio dihidratado

Es el producto natural o artificial (yeso), empleado en la fabricación del cemento para regular el tiempo de fraguado; el cual contiene en su composición 2 moléculas de agua por una molécula de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Tiempo de bombeabilidad en cédula 5

Es el tiempo que tarda el cemento en fraguar, el cual debe estar comprendido en el rango de 90 minutos (mínimo) a 120 minutos (máximo), a una temperatura circulante en el fondo del pozo de 50 °C y a una presión de 363 kg/cm²(5160 psi)

Viscosidad plástica

Parámetro reológico de los fluidos en el modelo Plástico de Bingham.

III.3 PREPARACIÓN

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para mezclar lechadas de cemento.

ALCANCE:

El presente procedimiento es aplicable a todas las lechadas de cemento, que son utilizadas para cementar las tuberías de revestimiento de los pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

La evaluación correcta de los materiales no es posible a menos que la prueba sea desarrollada usando una muestra representativa de los mismos. El empleo de métodos apropiados de almacenamiento es particularmente importante para prevenir la exposición del cemento a la humedad y/o al bióxido de carbono en el aire.

La preparación de lechadas de cementos varía según la relación sólido/líquido empleada en la mezcla, debido a la naturaleza propia del cemento. El tiempo y la velocidad de corte son factores importantes en el mezclado de lechadas de cemento. Se ha demostrado que el desarrollo de las propiedades de la lechada, se ve afectado si se hacen variar estos parámetros.

El procedimiento descrito es recomendado para la preparación de lechadas en el laboratorio, que no requieran condiciones especiales de mezclado.

Esta prueba es básica, ya que la facilidad con la que se mezcle la lechada a condiciones de laboratorio es un indicativo de la facilidad o dificultad con la que se realizará la mezcla de cemento, agua y aditivos durante la cementación en campo.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con tapa plástica y capacidad de 1 litro, o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Jeringa de 20 ml.

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO:

Balanza electrónica

El peso indicado en la pantalla de la balanza deberá tener una exactitud de ± 0.1 por ciento del peso indicado y deberá tener la capacidad necesaria para pesar por lo menos 1.5 kg. La balanza deberá ser calibrada con suficiente frecuencia para asegurar su precisión, como mínimo, una vez al año.



Figura III.1 Balanza electrónica

Balanza Mecánica

Al igual que la balanza electrónica, esta deberá tener una exactitud de ± 0.1 por ciento del peso indicado.



Figura III.2 Balanza mecánica

Mezcladora

La mezcladora utilizada en la preparación de lechadas debe tener un vaso con capacidad de 0.95 L ($\frac{1}{4}$ de gal), rotor en el fondo y aspas tipo licuadora.

El vaso de mezclado, así como las aspas, deberán estar contruidos de algún material resistente a la corrosión. El ensamble de mezclado deberá estar contruido de tal manera que las aspas puedan ser retiradas fácilmente de éste. Debido a que las lechadas de cemento son muy abrasivas, es esencial un cuidadoso monitoreo de las condiciones de las aspas; por tal razón, éstas deberán retirarse del ensamble y ser pesadas antes de su uso; en caso de que hayan perdido el 10% de su peso original deberán ser reemplazadas por unas nuevas. Las aspas también deberán ser inspeccionadas visualmente para detectar algún daño, para reemplazarlas en caso necesario. Durante el proceso de mezclado, el vaso deberá ser observado para detectar posibles fugas. Si fuese el caso, deberá ser descargado el contenedor, y desecharse la mezcla para reparar el daño y reiniciar el proceso.



Figura III.3 Mezcladora

PROCEDIMIENTO:**Determinación de la Gravedad Específica de los Componentes**

La gravedad específica (Sp.Gr.) de los diferentes lotes de cemento puede variar debido a cambios naturales en la composición de las materias primas utilizadas en su proceso de manufactura. Estudios realizados muestran que la gravedad específica del cemento puede variar de 3.10 a 3.25 gr/cm^3 . Esta variación puede dar como resultado una desviación de la densidad de las lechadas de hasta 0.048 gr/cm^3 para lechadas con relación agua-sólidos constante. La gravedad específica del agua de mezcla puede también variar, dependiendo de la fuente de suministro, dando como resultado inconsistencias en la densidad de la lechada. Para fines de investigación, es necesaria la determinación de la gravedad específica de todos los componentes de la lechada para calcular adecuadamente las cantidades requeridas en su preparación.

Gravedad Específica del Cemento y los Aditivos Secos

La gravedad específica del cemento y los aditivos secos deben determinarse con el matraz Le Chatelier como se indica en la norma ASTM C 188. De manera alternativa, puede utilizarse un picnómetro para determinar la gravedad específica de esos materiales.

Gravedad Específica del Agua de la mezcla y los Aditivos Líquidos

La gravedad específica del agua de la mezcla y cualquier aditivo líquido debe determinarse mediante un hidrómetro como se describe en la Práctica API Recomendada 13J. Alternativamente, puede usarse un picnómetro para determinar la gravedad específica de esos materiales.

Cálculos de la Densidad y el Volumen en el Laboratorio

Un volumen de lechada de aproximadamente 600 ml debe ser suficiente para desarrollar la mayoría de las pruebas de laboratorio sin sobrellenar el vaso de mezclador. Los requerimientos de laboratorio para la mezcla pueden ser calculados usando las siguientes fórmulas.

$$V_s = V_c + V_w + V_a$$

$$M_s = M_c + M_w + M_a$$

$$M_s = M_c + M_w + M_a$$

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde:

V_s = volumen de la lechada (ml)

V_c = volumen de cemento (ml)

V_w = volumen de agua (ml)

V_a = volumen de aditivos (ml)

D_s = densidad de la lechada (gr/cm^3)

M_s = masa de la lechada (gr)

M_c = masa del cemento (gr)

M_w = masa del agua (gr)

M_a = masa del aditivo (gr)

$$V_c = \frac{M_c}{D_c}$$

$$V_w = \frac{M_w}{D_w}$$

$$V_a = \frac{M_a}{D_a}$$

Con el propósito de realizar estos cálculos, se asume que la gravedad específica es igual a la densidad en gr/cm³.

Temperatura del Agua y el Cemento

La temperatura del agua de mezcla, el cemento seco o mezclado; así como la de los instrumentos utilizados para la mezclarlos, deben ser representativas de las condiciones de mezcla en el campo. Si se desconocen dichas condiciones, la temperatura del agua de mezcla y el cemento seco debe ser de 22.8 ±1.1 °C (73 ±2 °F) inmediatamente antes de mezclar. Cuando la prueba se realiza con fines de investigación, la temperatura de agua de mezcla y cemento seco deberán medirse y documentarse.

Agua de Mezcla

La composición del agua puede afectar el desempeño de la lechada. Para la preparación de ésta deberá utilizarse el agua que se usará para prepararla en el campo. Si el agua del campo no está disponible, se deberá usar un agua de composición similar. Si se desconoce la composición del agua de campo, deberá utilizarse agua desionizada, agua destilada o agua blanda. El agua de mezcla y cualquier aditivo líquido deberá medirse en un vaso de mezclado limpio y seco. No debe añadirse una cantidad adicional de agua para compensar la evaporación o la humedad.

Mezclado de Cemento y Agua

Los materiales secos a utilizar en la preparación de la lechada deben ser pesados y mezclados uniformemente en un recipiente con tapa, o en una bolsa de plástico que

PRUEBAS DE LABORATORIO

impida la salida de material cuando se agiten manualmente, antes de ser añadidos al fluido de la mezcla.

Para realizar el control de calidad de una muestra de cemento tipo H debe elaborarse una lechada que contenga 860 ± 0.5 gr de cemento y 327 ± 0.5 gr de agua.

El vaso de mezclado con el peso requerido de agua y aditivos líquidos debe colocarse en la base de la mezcladora, verificando que se encuentre con su tapa en la posición correcta a efecto de que no se derrame líquido cuando inicie el movimiento de rotación de las aspas. Realizado lo anterior, se debe activar el control de encendido y asegurarse que el control de velocidad esté en automático y que esté activado el botón de la velocidad de mezclado 1. El motor debe encenderse a $4,000 \pm 200$ rpm (velocidad de mezclado 1), al mismo tiempo, debe activarse el cronómetro de la mezcladora. Si existen aditivos líquidos en el agua de mezcla, agitar a la velocidad rotacional mencionada para dispersarlos completamente antes de añadir el cemento con los aditivos sólidos.

En ciertos casos, el orden de adición de los aditivos en el agua de mezcla puede ser crítico, por esta razón, los procedimientos y tiempos especiales de mezclado deberán documentarse.

Una vez que los aditivos líquidos están perfectamente dispersos, se debe retirar la tapa del vaso. Concluido lo anterior, el cemento o la mezcla de cementos y aditivos secos deberán añadirse al vaso de la mezcladora cuando ésta se encuentre a la velocidad constante de mezclado 1, en no más de 15 segundos si es posible. Algunos diseños de lechadas pueden requerir un tiempo mayor para mojar completamente la mezcla de cemento y aditivos secos, sin embargo, el tiempo requerido para añadir la mezcla debe reducirse al mínimo.

Cuando todos los aditivos secos se han añadido al agua de mezcla, debe colocarse nuevamente la tapa del vaso mezclador. Acto seguido, la velocidad de agitación se incrementa a $12,000 \pm 500$ rpm (velocidad de mezclado 2) por 35 ± 1 segundos.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Una vez que se alcanzan los 50 segundos en el cronómetro de la mezcladora el motor se desactiva. Debe oprimirse el botón de velocidad de mezcla 1 y apagar el control maestro de la mezcladora.

Inmediatamente, se procede a colocar la lechada en un vaso de precipitado de 1000 ml para observar sus características; o en caso de que se desee realizar la determinación de alguna propiedad de la lechada, ésta deberá colocarse en el recipiente adecuado; normalmente en una de las copas del consistómetro atmosférico para acondicionarla a la temperatura deseada.

Una vez que el proceso de mezclado ha concluido, se debe limpiar y secar perfectamente el vaso para posteriormente colocarlo de nueva cuenta en la base de la mezcladora.

En algunas ocasiones los componentes establecidos en el diseño de lechada propuesto no pueden ser mezclados adecuadamente, ya sea por su baja densidad que ocasiona que se aglutinen en la parte superior del vaso, o que tengan un requerimiento de agua elevado, lo que origina que la lechada adquiera una consistencia pastosa, que hace imposible cualquier prueba adicional. En estos casos, debe rediseñarse la lechada.

RESULTADOS:

Debe realizarse un reporte que incluya los componentes y la cantidad de cada uno de ellos que fueron utilizados para elaborar la lechada, así como la temperatura a la que se realizó la prueba. Además, deberán hacerse comentarios respecto a la facilidad con la que se mezcló la lechada.

III.4 DENSIDAD

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar la densidad de una lechada de cemento.

ALCANCE:

El presente procedimiento es aplicable para determinar la densidad de todas las lechadas de cemento, que se utilizan para cementar las tuberías de revestimiento de pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

La densidad es una de las propiedades más importantes de una lechada de cemento, ya que de ella depende la presión hidrostática que se ejerza sobre la formación. En zonas de baja presión de formación, deberá ser lo suficientemente ligera para no fracturar o causar daño a la formación; y en zonas con alta presión de poro, deberá generar la presión hidrostática necesaria para controlar la presión de formación, impidiendo que la formación aporte fluidos sin que se genere un daño. La densidad de la lechada debe ser igual o ligeramente superior a la del fluido de perforación, considerando no rebasar el gradiente de fractura.

El incremento de la densidad se logra empleando un agente densificante de alto peso específico que no requiera la adición de agua, tal como la hematita y la limadura de fierro. Otro material densificante es la barita, sulfato de bario, el cual es empleado comúnmente en los lodos de perforación para darle peso al fluido; pero para usarlo en las lechadas es poco recomendable por su bajo grado de pureza. Estos materiales densificantes se emplean a porcentajes relativamente altos con respecto a los aditivos comunes, siempre calculando que se tenga el peso de lechada deseado mediante balance de materiales. También se puede efectuar el incremento de densidad mediante la disminución del agua de mezcla. En estos casos, se incrementa el porcentaje del agente dispersante para contrarrestar el incremento de la viscosidad.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Balanza presurizada para cementos.

EQUIPO RECOMENDADO:

El método recomendado para determinar la densidad de una lechada de cemento se lleva a cabo utilizando la balanza presurizada para densidad de fluidos. Este aparato es de operación similar a la balanza de lodos convencional, la diferencia estriba en que la lechada puede ser colocada en una copa para muestra de volumen fijo bajo presión.

El propósito de poner la muestra bajo presión es minimizar el efecto del aire atrapado en la lechada. Un problema importante en la medición de la densidad de una lechada es que generalmente tienen una considerable cantidad de aire cuando se les está mezclando. Presurizando la copa de muestra, cualquier cantidad de aire retenido en la muestra será reducido a un volumen mínimo, proporcionando de esta forma una medición de densidad más representativa de las condiciones de fondo de pozo.

El rango de medición de la balanza presurizada es de 0.84 a 2.64 gr/cm³ (7 a 22 lb/gal).

CALIBRACIÓN:

El aparato debe ser verificado para calibración colocando agua o un fluido más pesado de densidad conocida en la copa, o introduciendo en ésta pesos manufacturados para densidades equivalentes.

PROCEDIMIENTO:

Debe prepararse la lechada siguiendo el procedimiento descrito en la práctica número 1 de este manual.

La copa de la balanza presurizada deberá llenarse con la lechada hasta un nivel ligeramente inferior al borde superior de la misma [aproximadamente 6 mm ($\frac{1}{4}$ pg)].

Colocar la tapa sobre la copa con la válvula en la posición inferior (abierta). Presionar la tapa hacia abajo dentro de la boca de la copa hasta lograr el sello con el empaque. El exceso de lechada deberá liberarse a través de la válvula. Cuando la tapa haya sido colocada en la copa, jalar la válvula hacia arriba para ajustarla en posición superior (cerrada) y remover con agua la lechada derramada sobre la copa.

La bomba presurizadora es similar en operación a una jeringa. Para llenar la bomba se introduce la nariz de ésta en la lechada, con el pistón totalmente dentro del cilindro. El pistón es entonces jalado hacia arriba, llenando de este modo el cilindro con la lechada.

La nariz de la bomba es empujada sobre la válvula de la tapa de la copa, ésta es presurizada manteniendo una fuerza hacia abajo sobre el cilindro para mantener la válvula abierta. Debe mantenerse una fuerza de aproximadamente 255 N (50 lb) o mayor sobre el pistón.

La válvula de la tapa es activada por presión, esto significa que la presión en la copa mantiene la válvula cerrada. La válvula es inicialmente cerrada por la elevación gradual del cilindro de la bomba de presurización mientras se aplica presión al pistón. Cuando la

PRUEBAS DE LABORATORIO

válvula cierra, libera presión sobre el pistón antes de desconectar la bomba. De esta forma la balanza presurizada queda lista para la medición.

El exterior de la copa deberá ser enjuagado, limpiado y secado. El instrumento debe ser entonces colocado en el soporte que se encuentra dentro del estuche como se muestra en la figura III.4. Deslizando el indicador de peso hacia la derecha o izquierda se equilibra la balanza cuando la burbuja de nivelación esté centrada entre las dos marcas del receptáculo donde se encuentra confinada. El valor de la densidad se obtiene al leer una de las cuatro escalas marcadas en el brazo de la balanza.



Figura III.4 Balanza presurizada

La presión es liberada de la copa empujando la válvula hacia abajo. Esto se hace volviendo a conectar la nariz de la bomba y empujando hacia abajo el cilindro.

La lechada debe desalojarse tanto de la copa como de la bomba, todos los componentes deben limpiarse perfectamente. Para una mejor operación la válvula, la tapa y el pistón deben engrasarse ligeramente.

EQUIPO ALTERNATIVO:

La determinación de la densidad de una lechada de cemento puede realizarse utilizando la balanza de lodos descrita en las Prácticas Recomendadas API 13B-1 “Procedimientos para Pruebas de Campo a Fluidos de Perforación Base Agua”.

El procedimiento recomendado para usar la balanza de lodos debe ser acorde con la última edición de la norma API 13B-1 con excepción de que la lechada, después de ser vertida en la balanza de lodos, debe ser cuidadosamente golpeada 25 veces para eliminar el aire entrampado.

RESULTADOS:

Debe anotarse el valor de densidad leído en el brazo de la balanza. Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento, debe obtenerse un valor de $1.98 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$.

III.5 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

OBJETIVO:

Determinar las propiedades reológicas de una lechada de cemento.

ALCANCE:

El alcance de este procedimiento es caracterizar el comportamiento reológico de una lechada de cemento. La determinación de las propiedades reológicas de las lechadas de cemento puede ser sensible al procedimiento utilizado para determinarlas. Por lo tanto, no se recomienda realizar comparaciones de las propiedades reológicas obtenidas usando procedimientos diferentes. Por esta razón, se ha desarrollado un procedimiento estándar; con la finalidad de generar resultados confiables para la industria petrolera.

INTRODUCCIÓN:

Las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua. El contenido de sólidos en una lechada de cemento puede llegar hasta un 70%. La reología de la lechada de cemento está relacionada con la del líquido de soporte, la fracción volumétrica de los sólidos (volumen de partículas/volumen total) y la interacción entre las partículas.

En una lechada de cemento, el fluido intersticial es una solución acuosa de varias clases de iones y aditivos orgánicos. Por lo tanto, la reología de la lechada difiere de la reología del agua. Los sólidos en una lechada están en función directa a su densidad.

Las interacciones de las partículas dependen principalmente de la distribución de las cargas superficiales. Los dispersantes del cemento, también conocidos como “superplastificadores”, ajustan las cargas superficiales de las partículas para obtener las propiedades reológicas deseadas de la lechada.

Cuando se mezclan cemento en polvo y agua, se forma una estructura de gel en toda la lechada, que impide flujos con esfuerzo cortante menor al esfuerzo de corte dado por el

PRUEBAS DE LABORATORIO

valor de cedencia. Esto es resultado de la interacción electrostática entre las partículas. A esfuerzos de corte menores al valor de cedencia, la lechada se comporta como un sólido. Esto puede originar algunas deformaciones finitas de compresión o, eventualmente, de deslizamiento; pero no fluye.

Arriba del valor de cedencia, la lechada se comporta como un líquido comprendido en el modelo Bingham, con viscosidad plástica bien definida; o puede comportarse de acuerdo al modelo de Ley de Potencias.

Experimentalmente, las curvas de esfuerzo cortante y velocidad de corte son aproximadamente lineales; la pendiente de la línea es la viscosidad plástica y su ordenada al origen es el valor de cedencia. Sin embargo, la viscosidad aparente; representada por la relación entre el esfuerzo de corte/velocidad de corte, no es una constante; en su lugar ésta disminuye con el incremento del esfuerzo de corte.

Una vez que el valor de cedencia es rebasado, la lechada ya no se comporta como unidad; se rompe en partes y agregados de partículas que se mueven entre unas y otras. Estos agregados contienen agua intersticial, lo que da como resultado que el volumen efectivo de la fase dispersa sea mayor que el volumen de los granos de cemento. El volumen de la fase dispersa es el factor clave para determinar la reología de la dispersión.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Consistómetro atmosférico.

Viscosímetro fann modelo 35A resorte No. 1.

Cronómetro.

EQUIPO:

El equipo que debe utilizarse para determinar las propiedades reológicas de las lechadas de cemento es el viscosímetro rotacional. Con este tipo de viscosímetro, la muestra es confinada entre dos cilindros concéntricos de radios R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$), uno de los cuales, el rotor, está girando a una velocidad rotacional constante Ω . El movimiento del rotor en presencia de una muestra de lechada produce un torque que generalmente es medido en la pared del cilindro interior; pero también predomina en la pared del cilindro exterior. El radio del cilindro deberá ser tal que la muestra sea homogénea, y el esfuerzo de corte sea tan uniforme como sea posible.

Descripción y especificaciones de un viscosímetro rotacional típico

Este viscosímetro es un instrumento de indicación directa movido por un motor, con o sin una caja reductora de velocidades. El cilindro exterior o camisa está girando a una velocidad rotacional constante para cada una de las rpm (r/s). La rotación de la camisa sobre la lechada de cemento produce una deflexión sobre la cara interior de ésta, que a su vez es transmitida al bob o péndulo. La torsión de un resorte reprime el movimiento del péndulo, y un disco con escala, sujeto al resorte, mide el desplazamiento del péndulo. Las especificaciones son las siguientes:

Camisa

Diámetro interior: 36.83 mm (1.450 pg).

Longitud total: puede variar ligeramente según el fabricante.

Línea grabada 58.4 mm (2.30 pg) arriba del fondo.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Dos líneas de agujeros de 3.18 mm (1/8 de pg), espaciados 120 grados (2.09 radianes) alrededor de la camisa rotatoria, y centrados 1/8 y 3/8 de pulgada debajo de la línea grabada.

Péndulo

Diámetro: 34.49 mm (1.358 pg).

Longitud del cilindro: 38.00 mm (1.496 pg).

El péndulo consta de una base plana, y una cima cónica con un ángulo de 60°.

Cuando se usa este instrumento, la velocidad nominal de corte y el esfuerzo de corte pueden calcularse directamente de los datos del instrumento usando las expresiones:

$$\gamma = 1.075 * \Omega \quad y$$

$$\tau(\text{lb}_f / 100 \text{ft}^2) = 1.065 * F * \theta$$

donde:

Ω = velocidad del viscosímetro en rpm (r/s).

γ = velocidad nominal de corte en 1/s.

θ = lectura del viscosímetro en grados.

F = factor de torsión del instrumento.

τ = esfuerzo de corte en $\text{lb}_f/100 \text{ft}^2$.



Figura III.5 Viscosímetro rotacional fann 35-A

PROCEDIMIENTO:

Este procedimiento se desarrolló después de un cuidadoso análisis en muchos parámetros que afectan el comportamiento reológico de las lechadas de cemento. La mayoría de datos fueron recabados utilizando lechadas no dispersas; sin embargo, también se evaluaron algunos datos de lechadas dispersas. Los resultados de este análisis mostraron que las lechadas altamente dispersas generalmente proporcionan información menos confiable con este procedimiento, debido posiblemente a la ocurrencia de asentamiento mientras se efectúa la prueba.

Se recomienda cuando se usan viscosímetros atmosféricos o presurizados [para temperaturas superiores a 87 °C (189 °F)]. Por razones de seguridad los viscosímetros atmosféricos no deben usarse a temperaturas superiores a 87 °C. Este procedimiento solo puede modificarse cuando se utilicen viscosímetros presurizados y los cambios se realizarán en función de las características del equipo. El péndulo, la camisa giratoria y el vaso deberán limpiarse y secarse antes de cada prueba.

La lechada de cemento debe prepararse según el procedimiento descrito en la práctica número 1 de este manual.

La lechada, una vez que ha sido preparada, debe vaciarse inmediatamente en la copa del consistómetro atmosférico para preacondicionarla. La copa deberá estar a temperatura

ambiente, para evitar la posibilidad de un choque térmico en los aditivos sensibles a la temperatura. La lechada será entonces calentada a la temperatura de prueba deseada superior a 87 °C (189 °F) en el consistómetro atmosférico. Para lechadas que no sufren choque térmico, la copa puede precalentarse a la temperatura de prueba [± 2 °C (± 5 °F)] o a otra temperatura seleccionada por el operador, antes de verter la lechada dentro de la copa.



Figura III.6 Consistómetro Atmosférico

La lechada de cemento debe agitarse durante 20 minutos después de que la temperatura de prueba deseada ha sido alcanzada, e inmediatamente después, debe vaciarse dentro del vaso del viscosímetro hasta alcanzar la marca.

Con la camisa girando a la velocidad mínima, la copa debe levantarse hasta que el nivel de líquido alcance la línea grabada en la camisa. Esta operación reducirá la gelificación de la lechada y asegurará una distribución uniforme de la lechada.

PRUEBAS DE LABORATORIO

Debe registrarse la temperatura de la lechada antes de tomar la primera lectura. La lectura inicial deberá realizarse después de 10 segundos de rotación continua a la velocidad más baja. Las demás lecturas deben realizarse primero en orden ascendente, y posteriormente en orden descendente; después de una rotación continua de 10 segundos a cada velocidad. El cambio a la velocidad siguiente debe hacerse inmediatamente después de tomar cada lectura. Una vez que se han tomado todas las lecturas, debe registrarse la temperatura de la lechada en la copa del viscosímetro.

La relación de las lecturas ascendentes y descendentes debe calcularse para cada velocidad. Esta relación puede utilizarse para ayudar a clasificar ciertas propiedades de las lechadas:

- a. Si la relación de todas las velocidades es aproximadamente 1, es un indicador de que la lechada no se precipitará, independientemente del tiempo a la temperatura promedio de prueba.
- b. Cuando la relación tiene valores significativamente mayores que 1, puede esperarse asentamiento de sólidos a una temperatura promedio de prueba. Además, si algunas lecturas descendentes son menores que 5 unidades para la misma velocidad, es casi seguro que se tenga precipitación en la lechada.
- c. Si los valores de la relación son menores que 1 puede presentarse geleficación de la lechada.

Cuando existen diferencias significativas en las lecturas es indicativo de que la lechada no es estable; por ejemplo, puede ser propensa a un asentamiento extremo o una gelificación excesiva. Cuando esto ocurra deben realizarse ajustes en la composición de la lechada.

Las lecturas reológicas de la lechada deben reportarse como el promedio de las lecturas ascendentes y las descendentes, tomadas a una temperatura promedio de prueba.

Velocidad de corte (rpm)	Lecturas Ascendentes	Lecturas Descendentes	Relación de Lecturas	Promedio de Lecturas
3	21	24	0.87	22.5
6	40	36	1.11	38
100	65	83	0.78	74
200	84	100	0.84	92
300	100	115	0.87	107.5
600	137			

Tabla III.1 Lecturas realizadas en el viscosímetro

Temperatura inicial de la lechada: 67 °C

Temperatura final de la lechada: 63 °C

Temperatura promedio de la lechada: 65 °C

ESTE LIBRO NO SALE DE LA BIBLIOTECA

Para mejorar la confiabilidad de las mediciones, puede repetirse el procedimiento completo muchas veces utilizando una muestra de lechada fresca cada vez. De ser así, las mediciones deben reportarse como el promedio de todas las lecturas aceptables.

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO GEL

El esfuerzo gel de una lechada de cemento puede medirse inmediatamente después de determinar las propiedades reológicas de la muestra de lechada; o como una observación independiente. Si se observa un incremento en la gelificación durante la medición de las propiedades reológicas un reacondicionamiento de la lechada durante un minuto a 300 rpm puede dispersar los geles y permitir una mejor medición del esfuerzo gel. Para una prueba independiente, la lechada debe prepararse como se indica en la práctica número uno de este manual y acondicionarse en el consistómetro atmosférico como se describió en párrafos anteriores.

- Apagar el viscosímetro por 10 segundos y registrar la temperatura de la lechada.

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Seleccionar una velocidad equivalente a 5.1 1/s en el viscosímetro y comenzar la rotación. Registrar la máxima lectura observada inmediatamente después de encender el instrumento. Utilizar esta lectura para calcular el esfuerzo gel a 10 segundos con la ecuación:

$$\tau(lb_f / 100 ft^2) = 1.065 * F * \theta$$

- Apagar el viscosímetro por 10 minutos y registrar la temperatura de la lechada. Repetir el procedimiento del párrafo anterior para reportar el esfuerzo gel a 10 minutos.

Después de tomar las lecturas, debe registrarse nuevamente la temperatura de la muestra de lechada contenida en la copa del viscosímetro.

Los esfuerzos gel de la lechada deben reportarse a la temperatura promedio de las lecturas registradas.

Para mejorar la confiabilidad de las mediciones, puede repetirse el procedimiento completo varias veces usando una muestra de lechada fresca cada vez. De ser así, los valores de los esfuerzos deben reportarse como el promedio de todos los valores aceptables.

MODELADO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO.

Para ser capaces de caracterizar el comportamiento de flujo (presiones por fricción, régimen de flujo, etc.) de una lechada de cemento en cualquier geometría (tuberías, espacios anulares, etc.), debe seleccionarse el modelo reológico que mejor represente los datos obtenidos. Para hacerlo, las lecturas de velocidad de rotación y el torque, deben convertirse en velocidad de corte y esfuerzo de corte usando las ecuaciones:

$$\gamma = \frac{\pi R_2^2 \times \Omega}{15 R_2^2 - R_1^2}$$

y

$$\tau = 1.44 \frac{T}{2\pi R_1^2}$$

donde:

- γ = velocidad de corte (1/s)
- Ω = velocidad del viscosímetro rotacional (rpm)
- τ = esfuerzo de corte (lb_f/100ft²)
- T = torque por unidad de longitud (lb_f)
- R₂ = radio de la camisa (pg)
- R₁ = radio del péndulo (pg)

Estas ecuaciones se desarrollan haciendo las siguientes suposiciones:

- a. La lechada es homogénea y el esfuerzo de corte es uniforme en el espacio anular.
- b. Existe régimen de flujo laminar en el espacio anular.
- c. El resbalamiento en la pared es cero.
- d. El fluido exhibe esencialmente un comportamiento independiente del tiempo.

El viscosímetro rotacional utilizado debe ser capaz de medir esfuerzos de corte a velocidades de corte dentro de un rango de cerca de cero hasta 511 1/s. Los instrumentos comúnmente usados proporcionan un mínimo de cinco lecturas dentro de ese rango. Los instrumentos que proporcionan menos de cinco lecturas en ese intervalo de velocidad de corte no son recomendables.

El modelo reológico puede seleccionarse por un análisis de regresión o graficando datos de velocidad de corte contra esfuerzo de corte.

MODELOS REOLÓGICOS

Los modelos reológicos describen la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte de un fluido. Los modelos más utilizados para describir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento son el de Plástico de Bingham y el de Ley de Potencias.

Modelo de Plástico de Bingham

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangular cartesiano, el comportamiento de la lechada de cemento como plástico de Bingham resultará en una línea recta con un esfuerzo de corte positivo a una velocidad de corte igual a cero. Para este modelo la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte está expresada por la ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \times \gamma$$

En esta ecuación, τ_0 es el esfuerzo de corte positivo a la velocidad de corte igual a cero y se denomina esfuerzo de cedencia o punto de cedencia (comúnmente denotado como Y_p). Por encima del punto de cedencia, el esfuerzo de corte del fluido es proporcional a la velocidad de corte y la constante de proporcionalidad μ_p se denomina viscosidad plástica (denotada comúnmente como V_p). Si en la ecuación anterior el punto de cedencia es igual a cero, la ecuación se transforma en el modelo reológico más simple: el modelo Newtoniano. Las unidades en esta ecuación están en SI, 1/s para la velocidad de corte. Pa para el esfuerzo de corte y el punto de cedencia, y Pa·s para la viscosidad plástica.

Modelo de Ley de Potencias

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangular cartesiano, este modelo producirá una curva con un valor de esfuerzo de corte igual a cero para una velocidad de corte igual a cero. Cuando se grafica el esfuerzo de corte contra la velocidad de corte en papel doble logarítmico, el comportamiento de la lechada como un fluido ley de potencias resultará una línea recta. Para este modelo la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte está expresado por la siguiente ecuación:

$$\tau = k \times \gamma^n$$

En esta ecuación n es el exponente de la Ley de Potencias o índice de comportamiento de flujo y k es una constante, conocida como índice de comportamiento de flujo. Para fluidos pseudo-plásticos n es un número positivo entre 0 y 1. Las lechadas de cemento normalmente exhiben un comportamiento pseudo-plástico. Para fluidos dilatantes n es un número positivo mayor que 1. Si en esta ecuación n es igual a 1, la ecuación entonces corresponde al modelo Newtoniano. Las unidades son $1/s$ para la velocidad de corte, Pa para el esfuerzo de corte, y $Pa \cdot s^n$ para el índice de consistencia.

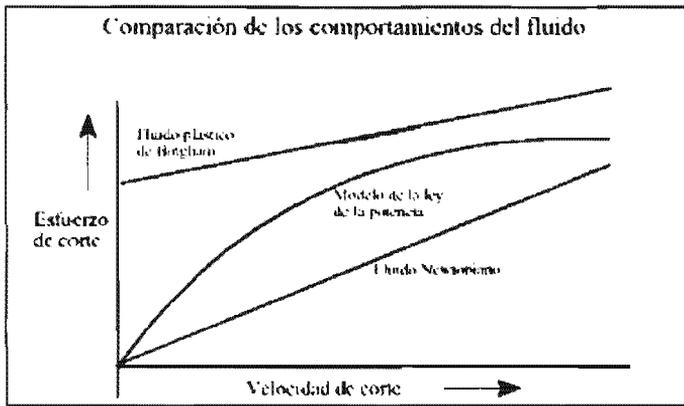


Figura III.7 Modelos reológicos

SELECCIÓN DEL MODELO REOLÓGICO

Los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte de una lechada de cemento deben analizarse con las dos ecuaciones anteriores para determinar que modelo se ajusta mejor a los mismos. La mejor manera de hacerlo es mediante un análisis de regresión. El modelo con el mejor coeficiente de regresión debe seleccionarse como el modelo para describir los datos.

Modelo de Plástico de Bingham

Debe realizarse un análisis de regresión usando la ecuación $\tau = \tau_0 + \mu_p \times \gamma$ para determinar la pendiente A y la ordenada al origen B. Si el esfuerzo de corte τ se expresa en $\text{lb}_f/100\text{ft}^2$ y la velocidad de corte γ en $1/s$, los parámetros del modelo en unidades de campo se expresan de la siguiente forma:

$$\mu_p (\text{cp}) = 478.8 \times A$$

y

$$\tau_0 (\text{lb}_f/100\text{ft}^2) = B$$

Un punto de cedencia negativo es un indicador de que:

- 1) La lechada tiende a asentarse.
- 2) La lechada puede gelificarse mientras se tomen las lecturas para determinar sus propiedades reológicas.

Si esto sucede, se recomienda que la lechada sea mezclada nuevamente y se recalculen sus propiedades reológicas. Si el problema persiste, la lechada puede presentar problemas cuando se introduzca en el pozo, y no se recomienda su utilización; por lo que habrá que diseñar una nueva lechada.

Cuando se utiliza el viscosímetro fann 35A, y la lechada de cemento se comporta como un fluido plástico de Bingham, pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$\mu_p (\text{cp}) = 1.5 \times F \times (\theta_{300} - \theta_{100})$$

$$\tau_0 (\text{lb}_f / 100 \text{ft}^2) = F \times (\theta_{300} - \mu_p)$$

donde θ_{300} y θ_{100} son las lecturas obtenidas en el viscosímetro a las velocidades de corte correspondientes, en rpm.

Modelo de Ley de Potencias

En este modelo, los parámetros se obtienen realizando un análisis de regresión sobre la forma logarítmica de la ecuación que describe el modelo:

$$\log(\tau) = \log(k) + n \log(\gamma)$$

El índice de comportamiento de flujo n es el valor de la pendiente.

Si el esfuerzo de corte τ se expresa en $\text{lb}_f/100\text{ft}^2$ y la velocidad de corte γ en $1/\text{s}$, el índice de consistencia en $\text{lb}_f\text{s}^n/100\text{ft}^2$ puede encontrarse utilizando el valor de la ordenada al origen usando la siguiente expresión:

$$k(\text{lb}_f\text{s}^n/\text{ft}^2) = 0.01 (10^D)$$

Cuando se utiliza el viscosímetro fann 35A, y la lechada de cemento se comporta como un fluido plástico de Ley de Potencias, pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$n = 2.096 \times \log(\theta_{300} / \theta_{100})$$

$$k(\text{lb}_f \cdot \text{s}^n / \text{ft}^2) = (F \times \theta_{300}) \times (100 \times 511^n)$$

RESULTADOS:

Debe entregarse un reporte donde se anoten los valores obtenidos. Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento, los valores deben estar entre los siguientes rangos:

Viscosidad plástica: Máxima, 60 cp; Mínima, 35 cp

Punto de Cedencia máximo: 0.293 kN/m^2 (65 $\text{lb}_f/100 \text{ft}^2$)

III.6 AGUA LIBRE

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar la cantidad de agua libre de una lechada de cemento.

ALCANCE:

El presente procedimiento es aplicable a todas las lechadas de cemento, que son utilizadas para cementar las tuberías de revestimiento de los pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

Los procedimientos del API incluyen una prueba para determinar el volumen de agua libre. Cuando la lechada se deja en reposo, el agua libre se recolecta en la parte superior de la lechada como resultado de la precipitación de partículas de cemento dentro de la lechada. Conforme se sedimentan las partículas, éstas tienden a puentearse. Justo debajo de cualquier área de puenteo, se encuentra una grieta o hendidura que no contiene partículas de cemento, las cuales permanecen después de que el cemento ha fraguado. Si hay un gran número de ellas en la columna de cemento, formarán un canal que puede causar que el cemento ya fraguado falle cuando sea sometido a presión.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Consistómetro atmosférico o de alta presión y alta temperatura.

Probeta graduada de 250 ml.

PROCEDIMIENTO:

La lechada de cemento debe prepararse como se describe en la práctica número 1 de este manual.

Acondicionamiento de la lechada

Colocar la lechada en la copa del consistómetro atmosférico o en el de alta presión y alta temperatura. La copa debe encontrarse a temperatura ambiente para prevenir el choque térmico de las lechadas sensibles a la temperatura. La lechada debe entonces calentarse hasta alcanzar la temperatura de prueba deseada; en el consistómetro atmosférico hasta 80 °C (176 °F); si la temperatura es mayor de éste valor, debe emplearse el consistómetro de alta presión y alta temperatura, aplicando incrementos de temperatura y presión de acuerdo con la cédula que mejor simule las condiciones reales de la operación.

Después de concluir la cédula de calentamiento, la lechada puede mantenerse a la temperatura y presión especificadas por espacio de $30 \pm 1/2$ min, u otro periodo de acondicionamiento deseado antes de proseguir. Si la temperatura de acondicionamiento es mayor que 90 °C (194 °F), verificar por seguridad que la lechada sea enfriada por lo menos a esta temperatura.

Nota: 90 °C (194 °F) es un techo de temperatura de trabajo seguro, considerando el punto de ebullición del agua. Si el punto de ebullición en el área de trabajo es menor, realizar el ajuste adecuado.

Liberar la presión lentamente [alrededor de 14 kg/cm²/s (200 psi/s)]. Sacar la copa del consistómetro, cuidando que conserve su posición vertical para evitar que el aceite se mezcle con la lechada. Remover la barra de transmisión, la rosca y el sello superior. Retirar con una jeringa el aceite depositado en la parte superior del diafragma. Remover

el diafragma y el soporte metálico. Con una jeringa eliminar cualquier remanente de aceite de la cima de la lechada. **Si la contaminación es severa, descartar la lechada e iniciar nuevamente el proceso.** Remover la paleta y agitar la lechada vigorosamente con una espátula; para asegurar la uniformidad de la lechada.

Después de acondicionar la lechada por cualquiera de los dos métodos citados, proceder con el desarrollo de la prueba.

PRUEBA DE AGUA LIBRE CON PERIODO ESTÁTICO, A TEMPERATURA AMBIENTE

Colocar 250 ml de lechada previamente acondicionada, dentro de una probeta de vidrio graduada de 250 ml. La porción graduada de 0 a 250 ml no deberá tener menos de 232 ni más de 250 mm de longitud, con incrementos de graduación de por lo menos 2.0 ml.

La lechada debe agitarse con una espátula mientras se vacía en la probeta, para asegurarse de que sea uniforme. El periodo de prueba de 2 horas inicia cuando la lechada es vaciada dentro de la probeta. La boca de la probeta debe sellarse con una película de plástico o un material equivalente para prevenir la evaporación, y puede inclinarse para simular la desviación del pozo. Se deben tomar las precauciones necesarias para que la probeta quede libre de todo tipo de vibraciones.

Después de 2 horas, medir el agua libre (clara o turbia) que quede en la cima de la lechada). La medición del volumen de agua libre deberá hacerse con una precisión de ± 2 ml.



Figura III.8 Prueba de Agua Libre

PRUEBAS DE LABORATORIO

El porcentaje de agua libre se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Agua Libre} = \frac{(\text{ml de agua libre}) (100)}{\text{ml de lechada}}$$

RESULTADOS:

Debe entregarse un reporte donde se anote el porcentaje de agua libre obtenido. Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento, el valor máximo debe ser de 5.9 % .

III.7 PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar la pérdida de fluido por filtrado en una lechada de cemento.

ALCANCE:

El presente procedimiento es aplicable a todas las lechadas de cemento, que son utilizadas para cementar las tuberías de revestimiento de los pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

Esta práctica provee varios procedimientos para realizar pruebas de pérdida de fluido a condiciones estáticas. Para pruebas a temperaturas menores de 90 °C (194 °F), puede usarse una celda para pérdida de fluido estática después de acondicionar la lechada en un consistómetro atmosférico o presurizado, o usando una celda para pérdida de filtrado con agitación. Para pruebas a temperaturas mayores de 89.4 °C (193 °F), debe acondicionarse la lechada en un consistómetro presurizado o en una celda para pérdida de filtrado con agitación. Sin importar como sea acondicionada la lechada, el valor de pérdida de fluido se determina bajo condiciones estáticas.

La pérdida de fluido de una lechada resulta de la aplicación de una presión diferencial sobre una interfase permeable. Esta presión libera agua de la lechada y hace cambiar las características de la misma. En la mayor parte de las aplicaciones, una baja pérdida de filtrado se considera menor de 100 cm³ en 30 min, bajo una presión diferencial de 70 kg/cm² (1000 psi), a través de una malla 325 y a la temperatura de circulación del pozo a cementar.

Esta característica de la lechada es particularmente importante durante la operación de bombeo, ya que un valor bajo de la misma previene la deshidratación prematura del cemento, mantiene fluida la lechada y previene el daño a la formación ocasionado por la

disminución de la permeabilidad. Con un valor bajo de pérdida de fluido, la lechada permanecerá bombeable durante un tiempo bastante cercano al valor de diseño en el laboratorio.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Consistómetro atmosférico.

Filtro prensa.

Probeta graduada de 100 ml.

Llave española de ¼ pg.

Guantes de carnaza.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO:

El equipo a utilizar es una celda de alta presión y alta temperatura para pérdida de filtrado provista con un filtro malla 325 soportado por una malla 60.

La temperatura de la lechada es medida usando un termocople tipo J montado en la pared de la celda o inmerso en la lechada. La localización del termocople debe registrarse en el reporte. Un termocople montado en la camisa de calentamiento medirá la temperatura de la camisa. Esta temperatura normalmente es mayor que la temperatura dentro de la celda para pérdida de fluido.

Los indicadores de presión deben tener una escala que permita leer con una precisión de ± 50 psi. Los indicadores deben calibrarse anualmente.



Figura III.9 Filtro Prensa

SEGURIDAD

Estos procedimientos requieren del manejo de equipo a alta temperatura y presión; además de materiales peligrosos. **Sólo personal entrenado debe efectuar estas pruebas.**

PROCEDIMIENTO:

PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO.

La lechada debe prepararse de acuerdo con lo establecido en la práctica número 1 de este manual.

PROCEDIMIENTO PARA ACONDICIONAR LA LECHADA

Los acondicionamientos de las lechadas deben iniciar a 26.7 ± 1.1 °C (80 ± 2 °F), o a una temperatura apropiada para las condiciones de pozos. Y debe calentarse de acuerdo a la cédula apropiada.

PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA A TEMPERATURAS MENORES DE 90 °C (194 °F)

Acondicionamiento a Presión Atmosférica

- En no más de un minuto después de haber preparado la lechada, colocarla dentro del contenedor del consistómetro atmosférico.
- Calentar la lechada hasta alcanzar la temperatura circulante de fondo de pozo, de acuerdo con la cédula de tiempo bombeable que mejor simule las condiciones reales del pozo.
- Si el consistómetro atmosférico no está equipado para medir la temperatura de la lechada, el baño de temperatura debe ser calentado de acuerdo con la cédula apropiada.
- Después de acondicionar, quitar la paleta y remover rápidamente con una espátula para asegurar que la lechada sea uniforme.
- Llenar la celda del filtro prensa como se indica en la sección correspondiente.

Acondicionamiento Presurizado

- Colocar la lechada en el contenedor del consistómetro presurizado.
- Aplicar presión y temperatura de acuerdo a la cédula de tiempo de bombeabilidad que mejor simule las condiciones reales del pozo.
- Al concluir la cédula, alcanzar la temperatura de prueba, desactivar los calentadores y liberar la presión a una velocidad aproximada de 14 kg/cm²/s (200 psi/s).

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Remover la lechada de la copa del consistómetro, teniendo cuidado de no invertir la posición de ésta para evitar que el aceite se mezcle con la lechada.
- Quitar el aro del extremo superior de la copa, el collar y la barra guía de la flecha así como la cubierta del diafragma.
- Con una jeringa absorber el aceite que se encuentre sobre el diafragma de neopreno.
- Remover el diafragma de neopreno y el aro que lo soporta.
- Con una jeringa retirar el aceite que pudiese estar en la superficie de la lechada. **Si la contaminación es severa, descartar la lechada y comenzar nuevamente la prueba.**
- Remover la paleta y agitar la lechada vigorosamente con una espátula para asegurarse de que esté homogénea.
- Llenar la celda del filtro prensa como se indica en la sección correspondiente.

PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA A TEMPERATURAS MAYORES DE 89 °C (193 °F)

Acondicionamiento usando el Consistómetro Presurizado

- Colocar la lechada en el contenedor del consistómetro presurizado y comenzar la prueba de tiempo de bombeabilidad.
- Aplicar presión y temperatura de acuerdo a la cédula de tiempo de bombeabilidad que mejor simule las condiciones reales del pozo.
- Al concluir con la cédula, apagar los calentadores y enfriar tan rápido como sea posible.

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Después de que la lechada sea enfriada hasta aproximadamente 87.8 °C (190 °F), liberar la presión lentamente a una velocidad aproximada de 14 kg/cm²/s (200 psi/s).
- Remover la lechada de la copa del consistómetro, cuidando de no invertir la posición para no mezclar el aceite con la lechada.
- Remover el aro superior, el collar y la barra guía de la flecha; así como la cubierta del diafragma.
- Con una jeringa absorber el aceite que esté encima del diafragma.
- Remover el diafragma y el aro de soporte.
- Con una jeringa eliminar cualquier remanente de aceite que pudiese existir en la cima de la lechada. **Si la contaminación es severa, descartar la lechada y comenzar una nueva prueba.**
- Remover la paleta y agitar la lechada vigorosamente con una espátula para asegurar que la lechada sea uniforme.
- Llenar la celda del filtro prensa como a continuación se indica:

Llenado de la celda del Filtro Prensa

- Preparar la celda de pérdida de filtrado, ésta debe estar lista para llenarse cuando se complete el acondicionamiento de la lechada. Debe estar limpia y seca.
- Precalear la celda a 90 ±3 °C (194 ±5 °F) cuando se realicen pruebas a temperaturas mayores. Para realizar lo anterior se deben presionar los botones del control de temperatura (EUROTHERM) hasta alcanzar la temperatura objetivo deseada. Posteriormente, se deben activar los calentadores, el controlador de

PRUEBAS DE LABORATORIO

temperatura empezará a calentar la camisa de calentamiento hasta alcanzar la temperatura objetivo.

- Unos segundos antes de terminar el acondicionamiento de la lechada, retirar la celda de la camisa de calentamiento y colocarla en su base.
- Verificar que la válvula inferior de la celda se encuentre cerrada.
- Vaciar la lechada dentro de la celda hasta 3/4 pg por debajo del tope de la cámara para la lechada.
- Enroscar la tapa superior apretando firmemente con las llaves.

Calentamiento

Las pruebas, independientemente de la temperatura a que sean realizadas deben iniciar tan rápido como sea posible, como máximo seis minutos después de terminar el acondicionamiento de la lechada.

Preparación del equipo

- Cerrar todas las válvulas.
- Colocar nuevamente la celda en la camisa de calentamiento y apretar la tuerca de ensamble entre la celda y la válvula de suministro de nitrógeno.
- Colocar una probeta de 100 ml justo debajo de la válvula inferior de la celda.
- Abrir la válvula del tanque de nitrógeno.
- Regular la presión del sistema con la perilla hasta alcanzar $70 \pm 3.5 \text{ kg/cm}^2$ (1,000 ± 50 psi.).

Prueba de Pérdida por Filtrado

- Cuando todo se encuentre listo para ejercer presión sobre la lechada, abrir la válvula de suministro de nitrógeno, y las válvulas superior e inferior de la celda, en ese orden, y comenzar a tomar el tiempo.
- La temperatura en la camisa de calentamiento debe mantenerse al valor seleccionado hasta que concluya la prueba.
- Colectar el filtrado y registrar el volumen a 30 segundos y a 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 25 y 30 min. Si el nitrógeno fluye por la válvula inferior de la celda en menos de 30 min, registrar el volumen y el tiempo a los que se presenta el flujo.
- Calcular la pérdida de filtrado API. Para pruebas que duran los 30 min sin que exista salida de nitrógeno, medir el volumen recolectado, multiplicar por 2 este valor y reportarlo como la pérdida de filtrado. Para las pruebas en las que existe salida de nitrógeno antes de 30 minutos, se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida por Filtrado API Calculada} = 2Q_t \frac{5.477}{t}$$

Donde:

Q_t es el volumen (ml) recolectado al tiempo t en que ocurre la salida de nitrógeno.

Cuando se reporta la pérdida por filtrado de una lechada de cemento, aquellas en las que la medición fue realizada hasta alcanzar 30 minutos sin que se presentara salida de nitrógeno, se reportarán como “Pérdida de Fluido API”, mientras que aquellas para las cuales se presentó salida de nitrógeno antes de los 30 minutos, serán reportadas como “Pérdida de Fluido API Calculada”.

Terminación de la prueba y limpieza del equipo

- Cerrar la válvula del tanque de nitrógeno, la de suministro de presión a la celda; así como la superior e inferior de la celda.
- Apagar los calentadores.
- Abrir la válvula de desfogue **LENTAMENTE** para liberar la presión.
- Después de que la presión ha sido liberada, quitar la tuerca de ensamble e inclinar la camisa de calentamiento para sacar la celda.
- Colocar la celda en un chorro de agua dentro de la tarja para enfriarla, antes de desensamblarla. Es frecuente que la presión quede atrapada dentro de la celda, aún cuando la válvula inferior de la celda esté abierta o se haya quitado.
- Una vez que la celda está fría, abrir las válvulas superior e inferior de la misma.
- Desensamblar la celda en orden inverso al de armado.
- Limpiar todas las partes de la celda con agua para remover los residuos de la lechada. Hacer circular agua a presión a través de las válvulas.
- Secar e inspeccionar todas las partes para verificar que no estén dañadas. Reemplazarlas si es necesario.
 - a) Revisar la malla a contraluz. Cualquier área sombreada indica taponamiento de la malla y requiere una limpieza minuciosa con un cepillo suave mientras se encuentren bajo un chorro de agua. Si el agua no limpia la malla lo suficiente, remojar la malla en ácido clorhídrico al 10 %. Debe reemplazarse si se observa que existen rasguños u hoyos en su superficie, o si no pudieron removerse los residuos de cemento.

PRUEBAS DE LABORATORIO

- b) Los sellos de plástico deben estar sin cortaduras y no deben estar deformados.
No deben engrasarse.

Notas:

1. Lechadas con sedimentación significativa dan valores erróneos de pérdida por filtrado.
2. Las pruebas que no completan los 30 min tienen un error potencial que es mayor a medida que disminuye el tiempo al que se registra la salida de nitrógeno.
3. Las pruebas que llegan a 30 min muestran generalmente un porcentaje de variación de 5 %. Aquellas que duran menos de 5 min pueden tener una variación de más de 30 %.

RESULTADOS:

Debe entregarse un reporte donde se anote la Pérdida de Fluido por Filtrado. Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento el valor es del orden de $1,000 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$.

III.8 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar el tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento.

ALCANCE:

El presente procedimiento es aplicable a todas las lechadas de cemento, que son utilizadas para cementar las tuberías de revestimiento de los pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

El tiempo de bombeabilidad es aquel en el cual una lechada de cemento se mantiene en condiciones de ser bombeada en el interior del pozo; de acuerdo a la publicación RP 10B del American Petroleum Institute (API), es el tiempo requerido para que una lechada de cemento alcance 100 unidades de consistencia Bearden (Bc), que equivalen a un torque de 2,080 gr-cm.

El resultado de la prueba de laboratorio para tiempo bombeable sirve como un indicador del tiempo disponible para bombear una lechada dentro del pozo. Las condiciones de prueba en el laboratorio deben representar el tiempo, la presión y la temperatura a las que una lechada de cemento estará expuesta durante la operación de bombeo.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Consistómetro presurizado.

Llave española de ¼ pg.

Llave española de 13/16 pg.

Guantes de carnaza.

EQUIPO:

Se requiere un consistómetro de alta presión y alta temperatura. Éste incluye una celda rotatoria cilíndrica que sirve para colocar la lechada de cemento, la celda está equipada con una paleta estacionaria; todo esto encerrado en una cámara capaz de resistir las condiciones de presión y temperatura del pozo. El espacio entre la celda que contiene la lechada y las paredes de la cámara deben llenarse completamente con aceite mineral que tenga las siguientes propiedades físicas:

Viscosidad = 49 – 350 SSU @ 100 °F

Calor específico = 0.5 – 0.58 Btu/lb×°F
2.1 – 2.4 kJ/9kg×°K

Conductividad térmica = 0.0685 – 0.0770 Btu/h×°F
0.119 – 0.133 W/(m×°K)

Gravedad específica = 0.85 – 0.91

Únicamente si la temperatura de prueba excede el punto flash del aceite, debe usarse aceite sintético con las propiedades adecuadas. Se requiere un sistema de calentamiento capaz de elevar la temperatura del baño de aceite a una velocidad de al menos $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($5\text{ }^{\circ}\text{F}/\text{min}$). Deben existir sistemas de medición de la temperatura tanto de la lechada de cemento, como del baño de aceite. El contenedor de la lechada debe rotar a una velocidad de $150 \pm 15\text{ rpm}$. La paleta y todas las partes de la celda expuestas a la lechada deben ser construidas con materiales resistentes a la corrosión.

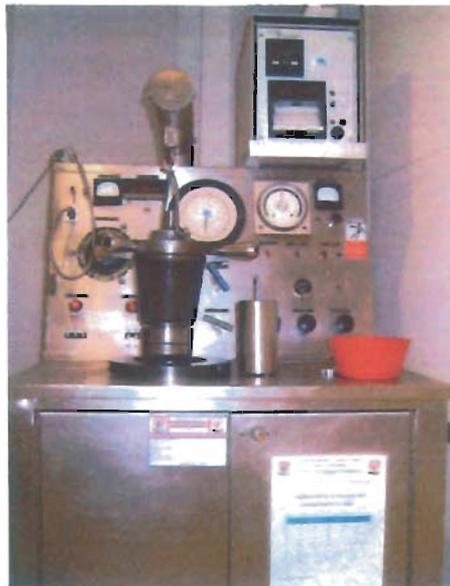


Figura III.10 Consistómetro de Alta Presión y Alta Temperatura

Consistencia

La consistencia de una lechada de cemento se expresa en unidades de consistencia Bearden (B_c). Este valor es medido por un potenciómetro y un circuito medidor de voltaje.

SEGURIDAD

Este procedimiento requiere del manejo de equipo a altas temperaturas y presiones; además de materiales peligrosos. **Sólo personal entrenado debe efectuar estas pruebas.**

PROCEDIMIENTO:

- Seleccionar la cédula de prueba a seguir según el tipo de operación que vaya a realizarse en el campo, la profundidad, y el gradiente de temperatura. Si se trata de un control de calidad para el cemento clase H, utilizar la cédula 5 de la norma API 10A “Especificaciones para Cementos y Materiales utilizados en Cementación de Pozos”. Las cédulas para simular las condiciones de pozo pueden tomarse de tablas o calcularse a partir de ecuaciones. Estas cédulas se basan en la consideración de que los pozos son verticales. La elección de la tabla se basa en la profundidad del pozo. La elección de la columna dentro de la tabla se basa en el gradiente térmico.
- Calcular la velocidad de calentamiento y la temperatura circulante de fondo de pozo.
- Encender el control maestro del consistómetro. Esto proporcionará energía eléctrica a los componentes del consistómetro.
- Programar el controlador de temperatura con los valores calculados.
- Verificar que la llave de agua que sirve para el enfriamiento de la cámara esté cerrada.

Ensamblado y Llenado de la Celda

- Limpiar y lubricar las roscas de la copa.
- En la parte superior de la copa insertar el aro de acero, haciéndolo descansar sobre el borde interior de la copa.
- Inspeccionar el diafragma y colocarlo sobre el aro de acero.

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Colocar sobre el diafragma el elemento metálico de sello entre el diafragma y la rosca.
- Asegurar el elemento metálico de sello con la rosca, apretándola únicamente con las manos.
- Insertar el ensamble paleta-flecha, haciendo pasar la parte superior de la flecha a través del diafragma.
- Invertir la celda y colocarla sobre la base de ensamble, teniendo cuidado que los orificios localizados en la rosca embonen perfectamente con los topes de la base. Volver a apretar la rosca haciendo girar la celda mientras su parte superior se encuentra fija en la base de ensamble.
- Colocar y apretar con las manos la tapa inferior, así como el tapón de la celda
- Retirar la celda de la base y colocarla en posición normal para verificar que la paleta gira libremente.
- Colocar la barra transmisora en la flecha, verificando que tenga la elevación mínima con respecto al elemento metálico de sello para girar libremente sobre él.
- Invertir la celda y colocarla en la base nuevamente.
- Quitar el tapón y la tapa inferior de la celda.
- Preparar la lechada conforme a lo descrito en la práctica número 1 de este manual.
- Llenar la copa con la lechada, dejando libre una distancia aproximada de $\frac{1}{4}$ pg entre el nivel de la lechada y el borde de la copa. Mientras es llenada la copa, se debe golpear la superficie cilíndrica con un martillo que tenga cabeza de goma

PRUEBAS DE LABORATORIO

para reducir el volumen de aire que queda atrapado. La lechada puede experimentar segregación durante la operación de llenado; este fenómeno se disminuye acortando el periodo que transcurre entre el término de la mezcla y el llenado de la celda.

- Enroscar la tapa inferior de la celda, asegurándose que la lechada invada ligeramente el orificio central de la tapa. Para esto se fija la celda en los tornillos de la base de ensamble.
- Atornillar el tapón de la tapa inferior con la llave de $\frac{1}{2}$ ".
- Retirar la lechada de la superficie de la copa.
- Verificar nuevamente que la flecha gire libremente.

Inicio de la Prueba

- Acoplar la celda sobre la base rotatoria del consistómetro.
- Revisar que las válvulas de liberación de aceite; así como de entrada, suministro y salida de aire se encuentren cerradas.
- Encender el motor.
- Colocar el potenciómetro sobre la copa revisando que éste haya ensamblado perfectamente bien sobre la barra guía de la flecha.
- Corroborar que el potenciómetro esté bien ensamblado activando el indicador de voltaje del consistómetro, éste debe marcar 15 volts. Si el valor que registra es muy aproximado, se ajusta a 15 volts con la perilla que se encuentra debajo del mismo; si no es así, se debe revisar la posición del potenciómetro o en caso

PRUEBAS DE LABORATORIO

necesario, se debe revisar el funcionamiento adecuado del potenciómetro y calibrarlo.

- Cerrar la cámara. Debe enroscarse la tapa de la cámara al tope y aflojarla 1/8 de vuelta.
- Verificar que la rosca del termocople se encuentre completamente arriba.
- Introducir el termocople en la flecha de la celda y apretar ligeramente la rosca del elemento de sello.
- Llenar la cámara con aceite; para hacerlo, se abre la válvula de suministro de aire.
- Esperar a que el aceite invada completamente el interior de la cámara, un indicador de este hecho es que la tapa del consistómetro ya no puede ni abrirse ni cerrarse.
- Purgar el aire atrapado en la cámara aflojando el elemento de sello. Se debe procurar que la corriente de aire y aceite se dirija hacia una franela o papel con una dirección apropiada, para seguridad de la persona que realiza la prueba.
- Cuando solamente salga aceite por el orificio de purga del piñón, apretar la tuerca del termocople con la llave de 13/16".
- Presurizar la cámara. Se debe elevar gradualmente la presión mediante la válvula reguladora de aire hasta alcanzar la presión inicial de la prueba, según la cédula correspondiente.

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Una vez que todo está listo, se da inicio a la prueba activando el control de temperatura, los calentadores, el graficador, la alarma y el cronómetro en el menor tiempo posible. La alarma puede fijarse en dos valores de consistencia: 70 y 100 B_c.
- Durante el desarrollo de la prueba, se debe revisar que la presión y la temperatura alcancen los valores indicados en la cédula seleccionada.
- El tiempo de bombeabilidad es el tiempo que transcurre desde la aplicación inicial de presión y temperatura hasta el tiempo en que la lechada alcanza un valor de consistencia en el que se considera imbombeable (normalmente 70 o 100 B_c). Debe registrarse el valor de consistencia al que concluyó la prueba de tiempo bombeable.
- En el momento en que suena la alarma se para el cronómetro, se apaga el motor y se registra el tiempo de bombeabilidad obtenido.
- Con el graficador se obtiene el registro de las temperaturas de la lechada y la cámara, así como el comportamiento de la consistencia de la lechada a lo largo del desarrollo de la prueba.

Terminación de la prueba y limpieza del equipo

- Desactivar la alarma. Colocar el interruptor en la posición de apagado.
- Desactivar el controlador de temperatura oprimiendo simultáneamente los botones “▼” y “▲” de la pantalla del eurotherm.
- Desactivar los calentadores llevando el interruptor a la posición de apagado.
- Apagar el graficador.

- Cerrar la válvula de suministro de aire.
- Abrir la válvula de salida de aire.
- Abrir la llave de agua para que al circular por el exterior de la cámara ayude a su enfriamiento.
- Depresionar la cámara abriendo **CON EXTREMO CUIDADO** la válvula de liberación de aceite y sólo lo suficiente para que se observe una ligera disminución en la presión. De no hacerlo así, se puede causar la contaminación del aceite mineral del consistómetro con el cemento que se encuentra dentro de la celda, lo que implicaría la necesidad de realizar un trabajo de mantenimiento mayor en el consistómetro. Con la disminución de la temperatura en la cámara debida a la circulación de agua, la presión de la cámara debe reducirse gradualmente hasta llegar a cero.
- Verificar que el registrador de la presión en la cámara tenga un valor de 0 psi.
- Abrir la válvula de entrada de aire.
- Esperar a que se desplace el aceite hacia la parte inferior del consistómetro. El indicador de este hecho es la aparición de humo blanco en la parte posterior del consistómetro.
- Asegurarse de que el aire ha invadido completamente la cámara, aflojando el elemento de sello del termocople.
- Cerrar la válvula de entrada de aire.
- Sacar el termocople.

- Aflojar y retirar la tapa de la cámara.
- Apagar el control maestro.
- Sacar la celda teniendo cuidado de vaciar hacia la cámara el aceite que queda en la parte superior.
- Desarmar la celda y lavar todas las piezas.

RESULTADOS:

Debe entregarse un reporte donde se anote el tiempo de bombeabilidad obtenido. Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento, este valor debe encontrarse entre 90 y 120 min.

III.9 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO COMPRESIVO

OBJETIVO:

Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar la resistencia al esfuerzo compresivo de un bloque de cemento fraguado bajo condiciones de presión y temperatura que simulan las condiciones de fondo de pozo.

ALCANCE:

Este procedimiento es aplicable a todas las lechadas de cemento, que son utilizadas para cementar las tuberías de revestimiento de los pozos petroleros y geotérmicos.

INTRODUCCIÓN:

La resistencia a la compresión es el grado de resistencia del cemento fraguado a una fuerza compresiva por unidad de área, de tal manera que tienda a colapsarlo; generalmente se expresa en libras sobre pulgada cuadrada.

El endurecimiento del cemento deberá desarrollar suficiente resistencia a la compresión, para asegurar el revestimiento en el agujero y soportar las presiones diferenciales que se tendrán a lo largo de la columna. La resistencia a la compresión se incrementa con la densidad de la lechada. Una resistencia mínima a la compresión puede ser de 35 kg/cm² (500 psi), que es generalmente recomendada antes de reanudar las operaciones de cementación.

La temperatura afecta la resistencia a la compresión del cemento. Altas temperaturas reducen el tiempo necesario para que la lechada pueda alcanzar los niveles de compresibilidad recomendados. Sin embargo, a temperaturas superiores a 110 °C (230 °F), la resistencia a la compresión comienza a disminuir. En tales casos se recomienda la utilización de arena sílica para atenuar este fenómeno.

SUBSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO:

Substancias:

1 kg de cemento clase H.

1 litro de agua.

Cantidad suficiente de aditivos a utilizar.

Material y equipo necesario:

Frasco de vidrio con capacidad de 1 litro o una bolsa de plástico.

Cucharón de plástico.

Espátula-cuchara de acero inoxidable.

Mezcladora.

Balanza electrónica o mecánica.

Autoclave para cementos.

Prensa hidráulica.

Llave española de ¼ pg.

Llave española de 13/16 pg.

Desarmador de punta plana.

Cinta de aislar.

Guantes de carnaza.

PROCEDIMIENTO:

Preparación y llenado de los moldes

Las caras interiores del cubo pueden estar cubiertas con grasa para facilitar la obtención de los cubos de cemento fraguado. Debe ponerse cuidado en que no existan acumulaciones de grasa en el interior del molde. Posteriormente:

- Ensamblar los moldes.

- Preparar la lechada conforme a lo establecido en la práctica número 1 de este manual.

- Vaciar la lechada de cemento dentro de los moldes hasta que el nivel de la lechada llegue a la mitad.
- Acomodar la lechada contenida en los moldes con la varilla de vidrio aproximadamente 30 veces. Agitar la lechada que queda en el vaso de la mezcladora para homogeneizarla.
- Llenar completamente cada molde y volver a acomodar como en el paso anterior.
- Colocar las cubiertas de los moldes limpiando los residuos de lechada que pudieran existir.
- Unir los moldes y sus cubiertas con cinta adhesiva verificando que no existan fugas.

Curado

- Después de que los moldes han sido llenados y cubiertos, colocarlos inmediatamente en la celda para curado de la autoclave de cementos a la temperatura de inicio de prueba deseada; normalmente $27 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($80 \pm 5 \text{ }^\circ\text{F}$).



Figura III.11 Autoclave para cementos

PRUEBAS DE LABORATORIO

- Aplicar los incrementos de temperatura y presión en la autoclave para cementos, de acuerdo con la cédula elegida.
- Para muestras curadas hasta 90 °C (194 °F), mantener la presión y la temperatura de prueba hasta 45 min antes de realizar la prueba.
- Para muestras curadas a temperaturas mayores que 90 °C, interrumpir el calentamiento para permitir que las muestras se encuentren a 90 °C o menos 45 min antes de realizar la prueba. Mantener la presión de curado durante el proceso de enfriamiento.
- 45 min antes de realizar la prueba, liberar la presión gradualmente y sacar los moldes de la celda para curado.
- Inmediatamente después, extraer los cubos de cemento y colocarlos en un baño de agua a 27 ± 3 °C \pm (80 ± 5 °F) hasta que las muestras sean sometidas a esfuerzo compresivo.

Realización de la prueba

- Realizar la prueba inmediatamente después de sacar las muestras del baño de enfriamiento.
- Colocar la muestra en la placa inferior de la prensa hidráulica e imprimir una presión de 71.7 ± 7.2 kN/min ($16,000 \pm 1,600$ lb_f/min). Para muestras de 4 pg², esta velocidad puede lograrse ajustando el ritmo de carga para obtener un incremento en la lectura del indicador de 2,000 a 6,000 lb_f en 15 segundos.



Figura III.12 Prensa Hidráulica

RESULTADOS:

Reportar la resistencia al esfuerzo compresivo como: la fuerza requerida para romper la muestra, dividida entre el área de contacto con las placas de la prensa hidráulica.

Promediar las resistencias al esfuerzo compresivo de las muestras obtenidas para un diseño de lechada. Aproximar los resultados a decenas de psi. En el reporte debe incluirse el número de la cédula utilizada.

Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento este valor debe ser:

- Para 8 horas de curado, a 38 °C y presión atmosférica: 2.068 MPa (300 lb/pg²) mínimo.
- Para 8 horas de curado, a 60 °C y presión atmosférica: 10.342 MPa (1,500 lb/pg²) mínimo.

IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IV.1 CONCLUSIONES

- Las cementaciones son operaciones que se realizan utilizando cemento con el fin de lograr cuatro objetivos específicos en los pozos petroleros: proteger y soportar la tubería de revestimiento, prevenir el movimiento de fluidos a través del espacio anular fuera de la tubería de revestimiento, detener el movimiento de fluidos dentro de formaciones vugulares o fracturadas y sellar un intervalo abandonado del pozo.
- La tecnología de cementación de pozos es una amalgama de varias disciplinas científicas y de ingeniería. Cada una de ellas es esencial para lograr una adecuada operación de cementación.
- La capacidad de un pozo petrolero para alcanzar su potencial de producción se ve influenciada de manera importante por el grado de aislamiento o sello, alcanzado durante la cementación. La calidad de la columna de cemento es el factor más importante del aislamiento zonal. Por consiguiente, la cementación tiene una importancia crítica para cualquier empresa petrolera.
- Es responsabilidad del ingeniero petrolero tanto en diseño como en operación, la selección de la mejor composición de la lechada de cemento y la mejor técnica de colocación para cada operación en particular, de modo que el cemento tenga un comportamiento adecuado durante su bombeo hacia la zona donde será colocado y exhiba características que le permitan cumplir de manera apropiada con las funciones requeridas para cada operación de cementación en particular;

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

dentro de las mejores condiciones de seguridad para el personal involucrado, el medio ambiente y el equipo; buscando los menores costos para hacer más rentable al pozo.

- Cada trabajo, debe diseñarse de manera que la densidad y la longitud de cemento generen la presión de fondo de pozo suficiente para controlar el flujo de los fluidos de la formación hacia la superficie, y al mismo tiempo asegurar que no se fracture la misma. Así mismo, deben hacerse las consideraciones necesarias con respecto a los fluidos contaminantes con los que el cemento tendrá contacto dentro del pozo.
- De acuerdo con los objetivos que se desea alcanzar, las cementaciones se clasifican en tres grandes grupos: cementaciones primarias, cementaciones forzadas y taponos de cemento.
- La cementación primaria es el proceso que consiste en colocar cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta, con el objetivo de aislar determinados intervalos dentro del pozo.
- El procedimiento para realizar la cementación primaria debe ser cuidadosamente planeado y ejecutado, ya que solamente hay una oportunidad para realizar el trabajo exitosamente.
- La cementación forzada es el proceso mediante el cual se fuerza la lechada de cemento a través de orificios o aberturas hacia el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la pared del pozo, con esto, las partículas sólidas se filtran sobre la superficie de la formación, al mismo tiempo que la fase acuosa entra en la matriz de la roca.
- Un tapón de cemento involucra un volumen relativamente pequeño de lechada de cemento que se introduce al pozo con los propósitos siguientes: servir de apoyo para desviar la trayectoria del pozo, taponar un pozo o algunos intervalos dentro del mismo, resolver problemas de pérdida de circulación durante la perforación y para aislar formaciones débiles durante las pruebas de formación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es necesario conocer las diferentes clases de cemento que pueden emplearse en los trabajos de cementación; con el fin de poder seleccionar la adecuada para las condiciones de presión, temperatura, esfuerzos mecánicos y procesos químicos de cada pozo en particular.
- El cemento utilizado en la industria petrolera es el Pórtland, el cual consiste en una mezcla compleja de caliza, sílice, fierro y arcilla; molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forman un cuerpo que al fraguar desarrolla resistencia a la compresión, exhibe baja permeabilidad y es insoluble en agua.
- En la actualidad, los procesos para elaborar cemento espumado integran programas de ingeniería, personal calificado, pruebas de laboratorio especializadas, equipo automatizado y agentes espumantes con tecnología de vanguardia con el objetivo de obtener un cemento espumado estable, suficientemente dúctil, capaz de deformarse elásticamente y absorber los esfuerzos de expansión/contracción sin fracturarse; con esto se logra una mayor vida útil y un mejor control de la migración de gas y agua. Ofrecen una buena opción para cementar tuberías de revestimiento en yacimientos depresionados; y tuberías de revestimiento superficiales en pozos de aguas profundas, donde la inestabilidad del agujero representa un grave problema debido a la importancia que tiene el control de la presión hidrostática ejercida para no exceder los límites que establecen las presiones de formación y de fractura.
- Es posible modificar el comportamiento de la lechada mediante el uso de aditivos. Sin embargo, es necesario realizar las pruebas de laboratorio para corroborar que el efecto positivo en una propiedad de la lechada no altere de manera inconveniente a otra.
- Existen varios factores que deben considerarse en el diseño de lechadas de cemento, su efecto es analizado en los laboratorios de compañías petroleras, de servicios y centros de investigación. Los datos obtenidos de estos análisis son una fuente de información indispensable para lograr el éxito en una cementación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las pruebas que se realizan en el laboratorio al cemento y a los aditivos que se utilizan para cementar, constituyen una parte fundamental dentro del proceso integral de las cementaciones; éstas inician en las plantas de fabricación para monitorear la calidad del producto, y continúan durante el diseño de la lechada en los laboratorios de las compañías petroleras, de servicio y centros de investigación.
- La evaluación correcta de la lechada no es posible a menos que las pruebas sean efectuadas utilizando una muestra representativa de los componentes de la misma; por esta razón, los componentes de la lechada en las pruebas de laboratorio deben ser los mismos que se utilizarán para llevar a cabo la operación en campo.
- Otro aspecto fundamental, dentro del desarrollo de las pruebas de laboratorio, es la confiabilidad de la información disponible correspondiente a la presión y a la temperatura de fondo de pozo a la que se realizará la cementación, con el fin de que en el laboratorio sean reproducidas de la mejor manera las condiciones a las que se verá sometida la lechada de cemento durante el trabajo de cementación.
- El establecimiento, y estricto seguimiento de un programa de calibración; para todos los equipos e instrumentos con los que se realizan las pruebas de laboratorio, es condición indispensable para obtener resultados correctos.
- Dentro del laboratorio de cementaciones, como en toda la actividad petrolera, la cultura de la seguridad juega un papel primordial en el logro de los objetivos propuestos, disminuyendo el riesgo de accidentes que pueden ocasionar pérdidas económicas por afectación al equipo, así como el atraso en la realización de las actividades. Y lo más importante, reduce el riesgo de daño al más valioso de los elementos que intervienen dentro de una organización: el humano.

IV.2 RECOMENDACIONES

- En las operaciones de cementación debe darse especial atención a los resultados de las pruebas de laboratorio que se efectúan a las lechadas. Para que estas pruebas ofrezcan resultados confiables, han de simular de la mejor manera posible las condiciones a las que se verá sujeta la lechada; por esta razón la información necesaria para efectuarlas debe ser correcta, los materiales utilizados deben ser los mismos, el equipo debe estar calibrado y deben seguirse estrictamente los procedimientos establecidos.
- Dentro del laboratorio de Perforación y Terminación de Pozos es conveniente la adquisición de equipo adicional, materiales consumibles y refacciones; con el propósito de asegurar el desarrollo normal de las actividades que ahí se programen.
- Es importante, que al inicio de cada semestre, se continúe proporcionando una plática de seguridad a los alumnos que tendrán actividades dentro de los diferentes laboratorios del área de Ingeniería Petrolera en la Facultad de Ingeniería.
- Se debe promover un vínculo más estrecho entre las instituciones de educación superior y Petróleos Mexicanos (PEMEX) junto con sus filiales; a efecto de que se establezcan condiciones propicias para que las primeras coadyuven a enfrentar los retos que enfrenta la industria petrolera nacional. De esta forma podrá iniciarse un proceso de generación de tecnología y recursos humanos calificados.
- Mantener una interacción directa con las compañías prestadoras de servicios, a fin de conocer las nuevas tecnologías en cementaciones. De esta forma se tendrá información sobre la tecnología de vanguardia.
- Es necesaria una mayor divulgación de la tecnología disponible a todos aquellos que tienen que ver con la planeación y ejecución de las operaciones de cementación. Esto representa un área de oportunidad bastante importante para la

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Facultad de Ingeniería. En noviembre de 2004 se impartió el primer curso de Laboratorio de Cementaciones al personal de PEMEX que se encuentra comisionado para realizar estudios de Maestría en Perforación; este es un ejemplo de cómo la Universidad puede contribuir a la difusión del conocimiento, aprovechando las oportunidades que ofrece el establecer relaciones formales con diversas empresas, tanto nacionales como extranjeras.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Petroleum Institute. Recommended Practice for Testing Well Cements. Washington, API Publishing Services, 1997. pp. 134.
2. American Petroleum Institute. Specification for Cements and Materials for Well Cementing. Washington, API Publishing Services, 1997. pp. 45.
3. Aspdin, J. "An Improvement in the Models of Producing Artificial Stone". British Patent No. 5022 (1824).
4. ASTM, "Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes". (Philadelphia, E.U.), 1949, Special Tech. Pub. No. 99.
5. Bengé, O.G. "Foamed Cement - Solving Old Problems with a New Technique". 1982, SPE 11204.
6. Bolaños, Antonio y Fernando González. Cementación de Pozos Petroleros. Tesis de Licenciatura, UNAM, 1998.
7. Bonifacio, Raúl. Curso "Nuevas Tecnologías de Cementaciones". Facultad de Ingeniería, UNAM, 2004.
8. Burgoyne, Adam. Applied Drilling Engineering, SPE Series vol. 2, 1991.
9. Fidan, E. "Use of Cement As Lost Circulation Material - Field Case Studies". SPE 88005, 2004.
10. Garaicochea Petreirena, Francisco. Temas Selectos sobre cementaciones de Pozos. Facultad de Ingeniería, UNAM, 1986.
11. Goode, J.M. "Gas and Water Permeability Data for Some Common Oilwell Cements". JPT, agosto de 1962.
12. Harms, W.M. "Cementing of Fragile-Formation Wells With Foamed Cement Slurries". SPE 12755, 1985.
13. Johnson, Ashley. "Gas Migration: Fast, Slow or Stopped". SPE 29342, 1995.
14. Loeffler, N.R. "Foamed Cement: A Second Generation". SPE 12595, 1984.
15. Matson, R.P. "The effects of Temperature, Pressure, and Angle of Deviation on Free Water and Cement Slurry Stability". SPE 22551, 1991.
17. Nelson, Eric B. Well Cementing. Houston, ELSEVIER, 1990.
18. Petróleos Mexicanos. "Norma de Referencia para el Cemento Clase H empleado en Pozos Petroleros". México, 2002.
19. Sabins, Fred L. "Problems in Cementing Horizontal Wells". JPT, abril de 1990.

BIBLIOGRAFÍA

21. Smith, Dwight. Cementing. Dallas, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1976.
22. Spoerker, H.F. "Field Experience with Applying Foamed Cement Slurries in Mature Depleted Formations". SPE 77215, 2002.
23. Talabani, Sora, "Gas Channeling and Micro-Fractures in Cemented Annulus", SPE 26068, 2005.
24. Tejeda Arias, Jabal. "Apuntes del curso de laboratorio de cementaciones". Facultad de Ingeniería, UNAM, 2004.
25. Terrazas Romero, Martín. "Apuntes del curso de Ingeniería de Pozos". Facultad de Ingeniería, UNAM, 2004.
26. Unidad de Perforación y Mantenimiento de Pozos de Petróleos Mexicanos. Un Siglo de la Perforación en México. t. VII. "Ingeniería de Cementaciones".