



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

## MANUAL DE PRÁCTICAS PARA LECHADAS DE CEMENTO

**INFORME DE TRABAJO PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO PETROLERO**  
P R E S E N T A  
**FERNANDO RAMOS GONZÁLEZ**

ASESOR: ING. MARÍA CRISTINA AVILÉS ALCÁNTARA



MÉXICO D.F. CD. UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2009

## ÍNDICE

### PRUEBAS DE LABORATORIO A LAS LECHADAS DE CEMENTO

#### Contenido

Introducción.....	II
Prólogo.....	IV
Capítulo 1. Cemento y aditivos.....	1
Capítulo 2. Diseño de lechadas de cemento.....	12
Capítulo 3. Prácticas de laboratorio.....	17
3.1.- Preparación de la lechada.....	17
3.1.1.- Introducción.....	17
3.1.2.- Substancias, material y equipo necesario.....	18
3.1.3.- Características del equipo.....	18
3.1.4.- Procedimiento.....	19
3.1.5.- Resultados.....	23
3.1.6.- Conclusión.....	23
3.2.- Densidad de una lechada de cemento.....	24
3.2.1.- Introducción.....	24
3.2.2.- Equipo requerido.....	24
3.2.3.- Calibración.....	25
3.2.4.- Procedimiento.....	26
3.2.5.- Observación.....	28
3.3.- Comportamiento reológico de una lechada de cemento.....	29
3.3.1.- Introducción.....	29
3.3.2.- Alcance.....	29
3.3.3.- Equipo requerido.....	30
3.3.4.- Descripción y especificación de un viscosímetro rotacional típico.....	32
3.3.5.- Calibración.....	33
3.3.6.- Procedimiento para la determinación de propiedades reológicas.....	34
3.4.- Pérdida de fluido por filtrado.....	39
3.4.1.- Equipo requerido.....	39

3.4.3.- Acondicionar el equipo.....	41
3.4.4.- Conclusión.....	44
3.5.- Determinación de la resistencia al esfuerzo compresivo.....	45
3.5.1.- Introducción.....	45
3.5.2.- Equipo requerido.....	46
3.5.3.- Procedimiento.....	47
3.5.4.- Realización de la prueba.....	48
3.5.5.-Resultados.....	49
3.6.- Prueba de tiempo bombeable.....	50
3.6.1.- Equipo requerido.....	50
3.6.2.- Procedimiento de prueba.....	53
3.6.3.- Inicio de la prueba.....	55
3.6.4.- Resultados.....	57
Conclusiones.....	58
Glosario.....	59
Tabla de materiales.....	62
Referencias.....	65

## **INTRODUCCIÓN**

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 porosas, permeables 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; 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.

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.

## **PRÓLOGO**

El presente trabajo es una recopilación de todas y cada una de las pruebas que diariamente se practican en los laboratorios de cementaciones. Aunque este manual no está concebido para hacer del lector un experto en la materia, sí está orientado para que, toda aquella persona que se desempeñe de manera cotidiana en las actividades de cementación de pozos petroleros, adquiera de una manera sencilla y práctica los conocimientos necesarios y suficientes que le permitan tener una visión clara, amplia y precisa acerca de las pruebas y procesos desarrollados en el laboratorio.

En este manual se hará mención del por qué a una lechada de cemento se le practica, por ejemplo, la prueba de Pérdida por Filtrado y cuál es el criterio a seguir o punto de referencia a tomar para establecer si el resultado obtenido es o no satisfactorio. Se le practicarán a las lechadas pruebas para la determinación de los siguientes parámetros: agua libre, reología, densidad, pérdida por filtrado, tiempo bombeable, resistencia al esfuerzo compresivo.

El manual contempla el procedimiento para calcular la temperatura estática, temperatura circulante y gradiente de temperatura de fondo de pozo, necesarios para poder elaborar cualquier lechada. De igual forma, se presentan planteamientos para calcular el requerimiento de agua y rendimiento de una lechada de densidad conocida. Aprenderemos: qué consideraciones tomar en cuenta para la elaboración de una lechada, cuándo y por que utilizamos tal o cual aditivo, y cómo se clasifican éstos últimos según su uso. También sabremos interpretar las gráficas de tiempo bombeable, tiempo de transición y resistencia al esfuerzo compresivo.

En suma, el propósito del presente curso es que el participante al final del mismo, tenga mayores elementos de juicio, .que le permitan normarse un criterio más amplio acerca de lo que es y representa una prueba de laboratorio practicada a una lechada de cemento.

## **CEMENTO Y ADITIVOS**

El primer tipo de cemento usado en un pozo petrolero fue el llamado cemento **Portland**, el cual fue desarrollado por Joseph Aspdin en 1824, esencialmente era un material producto de una mezcla quemada de calizas y arcillas.

El cemento **Portland** es un material cementante disponible universalmente. Las condiciones a las cuales es expuesto en un pozo difieren significativamente de aquellas encontradas en operaciones convencionales de construcciones civiles.

Este tipo de cemento es el ejemplo mas común de un cemento hidráulico, los cuales fraguan y desarrollan resistencia a la compresión como un resultado de la hidratación. Este fenómeno involucra una serie de reacciones químicas entre el agua y los componentes del cemento.

Por definición, el cemento Portland es el que proviene de la pulverización del clínker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento.

## **FABRICACIÓN DEL CEMENTO**

Se puede hablar de un esquema básico de procesamiento para la fabricación del cemento. La diferencia de una fabrica y otra se basa en el tipo y disposición de maquinarias que estén usando y su disposición particular.

Se fabrica por una mezcla de arcilla, caliza y otros materiales a temperatura que causa la fusión parcial de esta mezcla. Este producto se llama ESCORIA O CLÍNKER que al molerse y mezclarse con el yeso da origen a lo que llamamos CEMENTO.

Para fabricar cementos hay dos procesos:

**\*Vía seca.**

**\*Vía húmeda.**

Esta denominación se da de acuerdo a como sea la molienda.

Trátase de vía húmeda o vía seca los pasos o etapas a seguir son similares y solo hay algunas etapas intermedias que presentan diferencias en uno y otro proceso.

A continuación se muestra el proceso de manufactura del cemento el cual se divide en las siguientes etapas:

### **A-Canteras**

Las materias primas que participan en la fabricación del cemento:

Caliza..... 50-73%

Arcilla..... 20-25%

Arena..... 6-15%

Mineral de hierro..... 1-6%

El lugar donde se extraen estos minerales se denominan canteras. De acuerdo a la dureza y cohesión que presentan estos materiales para su obtención en la cantera, se pueden utilizar métodos de voladura por explosivos en el caso de la caliza, o por excavaciones en el caso de la arcilla y la arena.

**B-Trituración**

Los materiales obtenidos en las canteras, por lo general, son enormes rocas, que deben ser reducidas. Los materiales reducidos por la trituradora (tamaño máximo una pulgada); son transportados mediante bandas hacia los patios de almacenamiento.

**C-Almacenamiento de la materia prima**

Aquí vemos una diferencia entre la vía húmeda y seca. En la vía seca hay lo que se denomina pre-homogeneización. Consiste en una mezcla de materiales con una composición química diferente, a fin de conseguir un material de composición deseada y uniforme. Este material está distribuido en capas individuales dispuestas una encima de la otra.

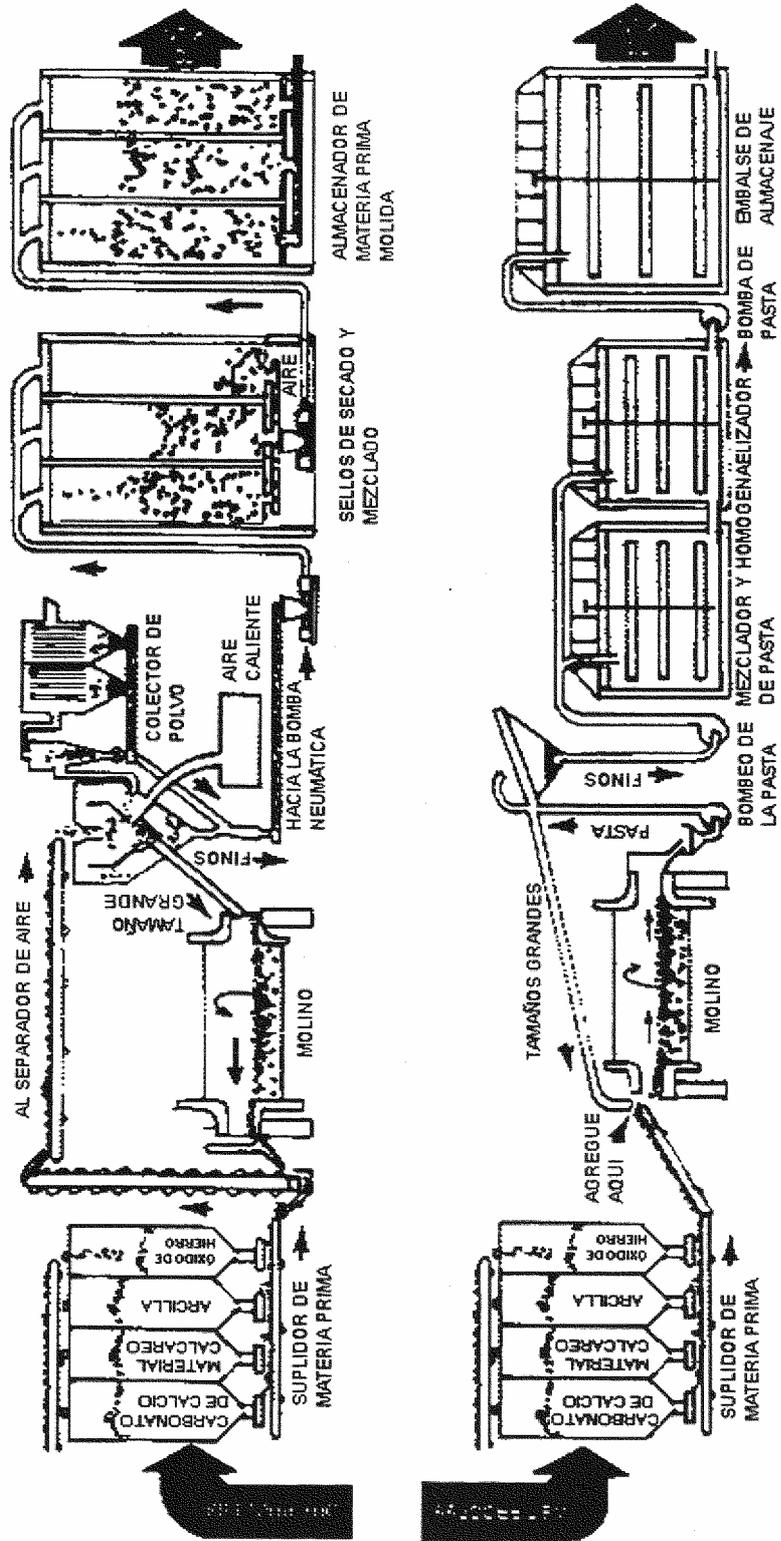
En la vía húmeda los materiales son depositados en las diferentes zonas del patio formando pilas individuales.

**D-Molienda de la materia prima**

El molino se alimenta, tanto de las tolvas de pre-mezcla, como de las tolvas de materiales correctivos. Estas contienen los siguientes materiales puros: caliza, arena, mineral de hierro. Estos materiales se utilizan para corregir cualquier diferencia con respecto a la composición requerida.

Esta molienda se realiza en un molino de crudo de circuito cerrado.

La molienda de crudo por vía húmeda, se realiza en molinos tubulares húmedos estos trabajan en circuito abierto, conjuntamente con agua, obteniéndose una mezcla viscosa llamada "pasta cruda". Luego esta pasta es transportada por medio de bombas hacia los sitios de homogeneización.



Etapas de la fabricación del cemento Continuación...

## **E-Homogeneización**

Por vía seca se utilizan cuatro silos, dos de homogeneización y dos de almacenamiento, la homogeneización se logra inyectando aire a altas presiones a través de la capa porosa que se construye en los silos de homogeneización. Una vez homogeneizado se vierte en el silo de almacenamiento. En el proceso húmedo cada vez que se llena el silo de pasta, se procede a su homogeneización por medio de aire comprimido durante 25 minutos, se analiza la mezcla para determinar si cumple con los requisitos de composición del crudo.

## **F-Cocción**

En el proceso por vía seca la cocción está dividida en tres secciones: a) Torre de precalentamiento, b) Horno y c) Sistema de enfriamiento.

El precalentamiento es un sistema en contracorriente con los gases calientes del horno, lográndose así una descarbonatación del 40%.

Este material pasa al horno el cual está dividido en cuatro zonas de temperatura.

El material semi-descarbonatado pasa a la zona de entrada y luego a la zona de calcinación, donde termina de completarse el ciclo de descarbonatación a una temperatura de 800 a 1100 °C. En la zona de cocción y a una temperatura de 1450 °C se realizan las transformaciones fisicoquímicas que dan origen al clínker.

De la zona de salida del horno y a 1450 °C el clínker pasa al enfriador que consiste en un sistema de enfriamiento rápido el cual reduce la temperatura de 1450 a 90°C.

Este material con un tamaño máximo de una pulgada es transportado hacia los silos de clínker, desde donde se alimentan los silos de cemento.

La cocción por vía húmeda se realiza en un horno rotatorio con una inclinación de 5%.

El calor necesario para el proceso de cocción lo proporciona un quemador instalado en el extremo opuesto de la alimentación. La pasta se introduce en la parte alta de los hornos mediante un regulador de caudal.

En la zona de precalentamiento se produce la evaporación del agua y la deshidratación de la arcilla contenida en ella. En estos hornos se efectúa el mismo proceso que por vía seca.

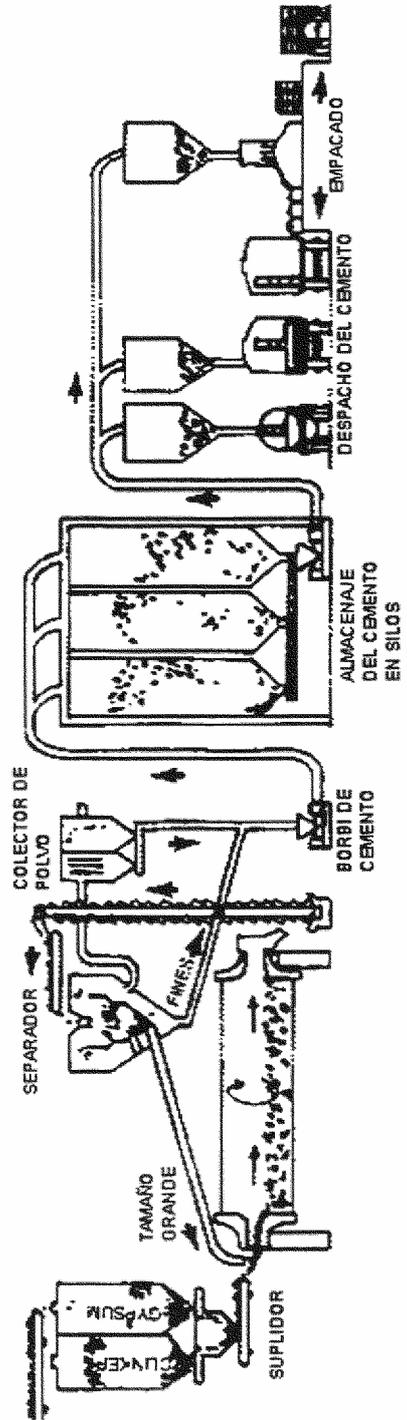
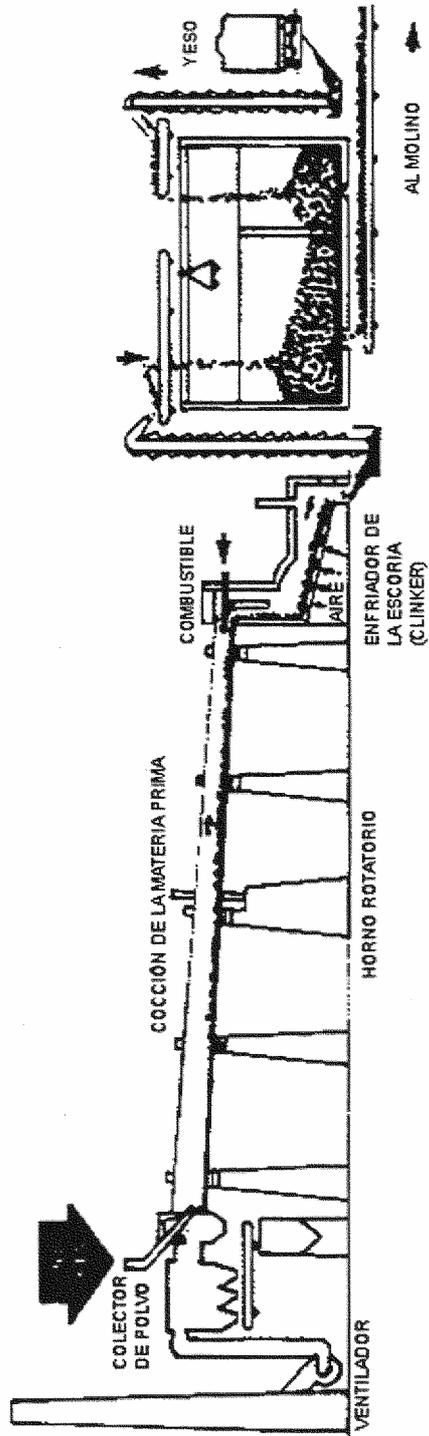
### **F-Elaboración del cemento**

Se lleva a cabo en un molino de bolas que trabaja en circuito cerrado con turbo separadores. En esta parte se adiciona sulfato de calcio (yeso) dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), el cual se añade al clinker en proporciones variables entre límites del 4 al 8% para tener como resultado que el cemento fragüe en tiempo y condiciones óptimas.

La proporción de clinker y yeso es regulada por medio de balanzas dosificadoras. Los separadores seleccionan las partículas finas de las gruesas usando la fuerza centrífuga y el arrastre en una corriente de aire. Las gruesas regresan al molino para ser reprocesadas y los finos son transportados por medio de bombas neumáticas hacia silos de cemento.

Se utiliza normalmente inyección de agua para enfriar y evitar la deshidratación del yeso lo cual provocaría problemas de fraguado, es importante la refrigeración en esta etapa ya que el yeso se deshidrata al pasar los 110°C. La fineza del cemento se controla regulando los mecanismos de los turbo separadores.

El cemento producido es llevado a los silos de cemento por medio de bombas neumáticas.



Etapas de la fabricación del cemento Continuación...

## Composición química del cemento

Se distinguen cuatro componentes principales del cemento:

- Silicato dicálcico
- Silicato tricálcico
- Aluminato tricálcico
- Aluminoferrito tetracálcico.

**Silicato dicálcico ( $2\text{CaOSiO}_2$ ).**- Es el componente responsable de la baja hidratación del ambiente y esto hace que desarrolle su resistencia a largo plazo (después de los 28 días), también es conocido como  $\text{C}_2\text{S}$ .

**Silicato tricálcico ( $3\text{CaOSiO}_2$ ).**-Es el componente de mayor concentración y es el responsable de la resistencia compresiva temprana (1 a 28 días), también conocido como  $\text{C}_3\text{S}$ .

**Aluminato tricálcico ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ).**- Es el responsable de proporcionar una hidratación rápida del cemento y es el componente que controla el tiempo de fraguado. Es el responsable de la susceptibilidad al ataque de los sulfatos, entre mas aluminato tenga un cemento mas débil será ante el ataque químico, también conocido como  $\text{C}_3\text{A}$ .

**Aluminoferrito tetracalcico ( $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).**- Este compuesto es de bajo calor de hidratación y no influye en el tiempo de fraguado, es conocido también como  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Los cementos tienen ciertas características físicas y químicas y en base al uso que se les puede dar en cuanto a rango de profundidad, presiones y temperaturas a soportar, etc. Según el **API**, los cementos pueden ser clasificados en:

**Clase A:** usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando no se requieren propiedades especiales. La relación agua/cemento recomendada es 5.2 gal/sxs.

**Clase B:** usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando hay condiciones moderadas a altas resistencia al sulfato. La relación agua/cemento recomendada es 5.2 gal/sxs.

**Clase C:** usado generalmente para pozos desde superficie hasta 6000', cuando se requieren condiciones de alto esfuerzo. La relación agua/cemento recomendada es 6.3 gal/sxs.

**Clase D:** usado generalmente para pozos desde 6000' hasta 10000', para condiciones moderadas de presión y temperatura. Está disponible para esfuerzos moderados a altos. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.

**Clase E:** usado generalmente para pozos desde 10000' hasta 14000', para condiciones altas de presión y temperatura. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.

**Clase F:** usado generalmente para pozos desde 10000' hasta 16000', para condiciones extremas de presión y temperatura. Está disponible para esfuerzos moderados a altos. La relación agua/cemento recomendada es 4.3 gal/sxs.

**Clase G y H:** usado generalmente para pozos desde superficie hasta 8000' o puedan ser usados con aceleradores o retardadores para cubrir una amplia variedad de rangos de presión y temperatura. La relación agua/cemento recomendada es 5,0 gal/sxs.

## ADITIVOS

Los aditivos tienen como función adaptar los diferentes cementos petroleros a las condiciones específicas de trabajo, son elementos químicos que al mezclarse con el cemento modifican sus propiedades físicas. Pueden ser sólidos y/o líquidos (solución acuosa).

Hoy en día existen más de 100 aditivos para cementos petroleros, generalmente se conocen ocho categorías de aditivos:

**Aceleradores:** se usan en pozos donde la profundidad y la temperatura son bajas. Para obtener tiempos de espesamiento cortos y buena resistencia a la compresión en corto tiempo. Pueden usarse: cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ , más usado), silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), ácido oxálico ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), etc.

**Retardadores:** hacen que el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia a la compresión del cemento sea más lento. Los más usados son: lignitos, lignosulfonato de calcio, ácidos hidroxicarboxílicos, azúcares, derivados celulósicos, etc.

**Extendedores:** se añaden para reducir la densidad del cemento o para reducir la cantidad de cemento por unidad de volumen del material fraguado, con el fin de reducir la presión hidrostática y aumentar el rendimiento ( $\text{pie}^3/\text{saco}$ ) de las lechadas. Entre los más usados se tienen: bentonita, silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), materiales pozzolánicos, etc.

**Densificantes:** aditivos que aumentan la densidad del cemento o que aumentan la cantidad de cemento por unidad de volumen del material fraguado, con el fin de aumentar la presión hidrostática. Los más usados: barita, hematita, ilmenita, etc.

**Controladores de Filtrado:** aditivos que controlan la pérdida de la fase acuosa del sistema cementante frente a una formación permeable. Previenen la deshidratación prematura de la lechada. Los más usados son: polímeros orgánicos, reductores de fricción, etc.

**Antiespumantes:** ayudan a reducir el entrapamiento de aire durante la preparación de la lechada. Los más usados son: éteres de poli-glicoles y siliconas.

**Dispersantes:** se agregan al cemento para mejorar las propiedades de flujo, es decir, reducen la viscosidad de la lechada de cemento. Entre ellos tenemos: polinaftaleno sulfonado, polimelamina sulfonado, lignosulfonatos, ácidos hidrocarboxílicos, polímeros celulósicos.

---

## DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO

### Introducción

En la cementación de pozos, las lechadas de cemento se diseñan rutinariamente, para temperaturas que oscilan desde el punto de congelamiento hasta los 700 °F en pozos geotérmicos. Las cementaciones de pozos se efectúan en rangos de presiones ambientales en pozos someros y hasta 30, 000 psi en pozos profundos. Además de las temperaturas y presiones severas las lechadas deberán ser diseñadas para contener formaciones débiles y porosas, zonas con ataque químico (fluidos corrosivos) y zonas con presión anormal. Todas estas condiciones pueden ser ajustadas solo a través del desarrollo de aditivos para el cemento. Los aditivos modifican el comportamiento del cemento, permitiendo que las operaciones de cementación se realicen con éxito.

### Pasos a seguir en el diseño de lechadas de cemento

1. Determinar la geometría del agujero perforado, el peso del lodo, el tipo de lodo, la altura de la columna de cemento y los tipos de formación expuesta.
2. Determinar la presión de fractura en el fondo para seleccionar la densidad máxima de la lechada y la tasa de bombeo máxima.
3. Determinar la temperatura estática y circulante de fondo(BHST y BHCT)
4. Determinar si existen condiciones especiales que requieran del control de la pérdida de fluido, prevención de la migración de gas, etc.
5. Estimar el tiempo de bombeo, el factor de seguridad y el régimen de flujo.
6. Seleccionar el diseño inicial de la lechada para la prueba.

**Cementación primaria:** Consiste en mezclar y colocar lechadas de cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y las paredes del agujero, con el objetivo principal de fijar la tubería de revestimiento para garantizar la

perforación de la próxima fase, así como el aislamiento de las formaciones perforadas para evitar la migración de fluidos.

Esta cementación es realizada inmediatamente después que se corre una tubería de revestimiento en el agujero. Se realiza a presiones suficientes para que la mezcla de cemento sea desplazada a través de la zapata y ascienda por el espacio anular hasta cubrir la distancia calculada que debe estar rellena de cemento.

### **Diseño de una cementación primaria**

El programa de cementación debe diseñarse para obtener una buena cementación primaria. El trabajo debe aislar y prevenir la comunicación entre las formaciones cementadas y entre el hoyo abierto y las formaciones someras detrás de la tubería de revestimiento. Debe considerarse el no fracturar alrededor de la zapata del conductor o de la sarta de superficie durante las subsiguientes operaciones de perforación o cuando se corren las otras sarta de revestimientos.

Al planificar una cementación, independientemente del tipo de tubería de revestimiento debe considerarse información sobre:

- Referencia de pozos vecinos.
- Geometría del hoyo (diámetro/forma).
- Tipo de fluido de perforación existente en el sistema.
- Problemas presentados durante la perforación.
- Efectuar pruebas API para cada una de las lechadas.
- Equipos y herramientas a utilizar por la compañía de cementación.
- Centralización de la tubería de revestimiento.

### **Condiciones óptimas de una cementación primaria**

- Tener la densidad apropiada.
- Ser fácilmente mezclable en superficie.

- 
- Tener propiedades reológicas óptimas para remover el lodo.
  - Mantener sus propiedades físicas y químicas mientras se está colocando
  - Desarrollar esfuerzo lo más rápido posible una vez que ha sido bombeado.
  - Desarrollar una buena adherencia entre la tubería de revestimiento y la formación.
  - Tener una permeabilidad lo más baja posible.
  - Mantener todas sus propiedades bajo condiciones severas de presión y temperatura.

**Cementación forzada:** pueden definirse como procesos de bombear una lechada de cemento en el pozo, bajo presión, forzándola contra una formación porosa, tanto en las perforaciones de la tubería de revestimiento o directamente en la pared del pozo, es el tipo más común de cementación, el proceso comprende la aplicación de presión hidráulica para forzar cemento en un orificio abierto a través de perforaciones en la tubería de revestimiento, para corregir ciertas anomalías.

- Cuando se diseña una cementación forzada se debe considerar:
- Tipo de cemento.
- Tiempo total de bombeo requerido.
- Tiempo para alcanzar las condiciones del pozo.
- Control de filtrado.
- Resistencia del cemento.
- Desplazamientos y cálculos básicos en condiciones del pozo.
- La cementación forzada puede hacerse: con empacador y/o con retenedor.

### **Tapones de Cemento:**

Operación que consiste en colocar una columna de cemento en un hoyo abierto o revestido, con cualquiera de los siguientes objetivos:

- Aislar una zona productora agotada.
- Pérdida de control de circulación.
- Perforación direccional.
- Abandono de pozo seco o agotado.

Pruebas de Tapones de Cemento: el método más común para probar la calidad de la resistencia de un tapón de cemento es bajar una mecha, tubería de Perforación o presurizando. El tiempo de fraguado después de la colocación de un tapón varía de 8 a 72 horas, dependiendo del uso de aceleradores o el tipo de pozo.

## **SEGURIDAD EN EL LABORATORIO**

La seguridad de los alumnos dentro del laboratorio es parte primordial y es obligación de toda persona que haga uso del equipo del laboratorio utilizar el siguiente equipo de seguridad:

Bata

Guantes de látex

Cubre bocas

Lentes de protección

Guantes contra temperatura

Guantes de carnaza

Mascarilla para aditivos

### **El laboratorio cuenta con:**

Sistema de seguridad contra incendios (sensores y alarma)

Extintores

Lavaojos de emergencia

Regadera a presión

Botiquín de primeros auxilios (básico)

Ruta de evacuación

Hoja de seguridad en aditivos

### **3.1.- PREPARACIÓN DE LA LECHADA**

#### **3.1.1.- 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.

#### **3.1.2.- SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO**

##### **Sustancias:**

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.

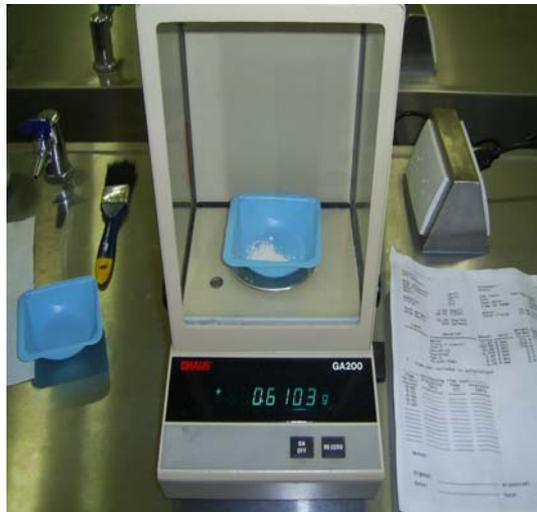
Jeringa de 20 ml.

**3.1.3.- CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO:****Balanza electrónica**

El peso indicado en la pantalla de la balanza deberá tener una exactitud de  $\pm 0.1$  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.



Balanza electrónica



Balanza analítica

**Mezcladora**

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

El vaso de mezclado, así como las espas, deberán estar contruidos de algún material resistente a la corrosión. El ensamble de mezclado deberá estar contruido de tal manera que las espas 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 espas; 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 espas 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.



Mezcladora (Hasta 12000 rpm)

#### **3.1.4.- 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<sup>3</sup>. Ésta variación puede dar como resultado una desviación de la densidad de las lechadas de hasta 0.048 gr/cm<sup>3</sup> 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.

### **Temperatura del Agua y el Cemento**

La temperatura del agua de mezcla, del cemento seco o mezclado y de los instrumentos utilizados para 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**

Utilizaremos las cantidades obtenidas a partir del cálculo de materiales, cemento "H" 860.82 (gr) y agua 327.18 (gr). 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 impida la salida de material cuando se agiten manualmente, antes de ser añadidos al fluido de la mezcla.

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 espas. 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.



Preparando la mezcladora



Mezclando la lechada de cemento

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  $45 \pm 1$  segundos.

Una vez que se alcanzan los 60 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.

### **3.1.5.- 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.

### **3.1.6.- CONCLUSIÓN**

**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.**

### **3.2.- DENSIDAD DE UNA LECHADA DE CEMENTO.**

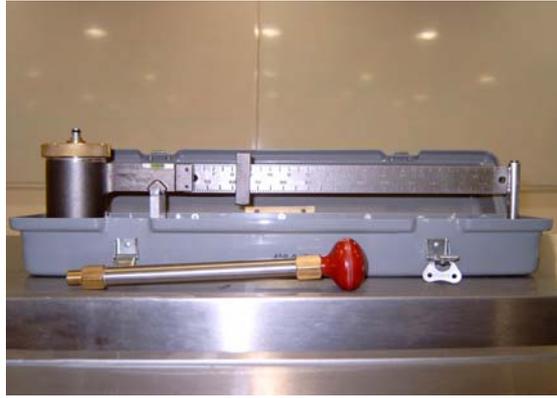
#### **3.2.1.- INTRODUCCIÓN**

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 hierro. 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.

#### **3.2.2.- EQUIPO REQUERIDO**

El método aprobado para medir la densidad de una lechada de cemento es utilizando la balanza presurizada. La balanza presurizada es similar en operación a la convencional para lodos, la diferencia está en que el volumen de lechada puede ser colocada en la copa de muestra de la balanza bajo presión.

**BALANZA PRESURIZADA**

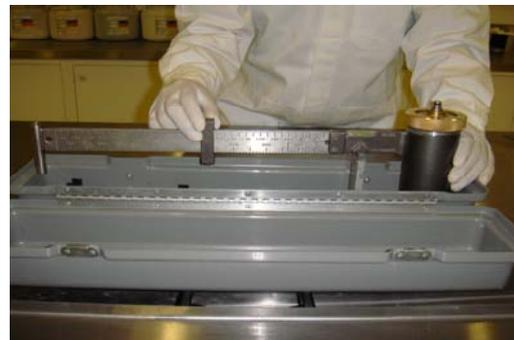
El propósito de colocar la muestra bajo presión es para minimizar el efecto del aire entrampado en la lechada, dando como resultado lecturas erróneas. El mayor problema que se presenta en las lechadas al medir su densidad, es que estos fluidos generalmente retienen una considerable cantidad de aire cuando se les está mezclando. Presurizando la copa de muestra de la balanza, cualquier cantidad de aire retenido en la muestra será minimizado a un volumen despreciable, por lo que la medición de la densidad estará mas apegada las condiciones de fondo de pozo.

### 3.2.3.- CALIBRACION

El aparato deberá ser calibrado colocando agua o algún fluido pesado de densidad conocida en la copa de muestra de la balanza, o usando pesos específicos conocidos colocados igualmente en la copa de muestra.



Vaciar el fluido dentro de la celda.



Comprobar la densidad conocida.

### 3.2.4.- PROCEDIMIENTO

La copa para muestra deberá ser llenada a un nivel ligeramente abajo de la orilla superior (aproximadamente  $\frac{1}{2}$  cm del tope).

Colocar la tapa de la con la válvula “check” en posición abierta. Enroscar la pieza metálica la cual ajustará la tapa contra la copa hasta conseguir que haga sello el empaque. El exceso de lechada deberá liberarse a través de la válvula “check”. Cuando la tapa haya quedado correctamente colocada en la copa, jalar la válvula check para ponerla en posición cerrada y remover con agua la lechada derramada sobre la tapa. Sujetar la tapa a la copa utilizando la rosca.

Deberá extraerse con la bomba un cierto volumen de lechada del vaso mezclador, la función de la bomba es similar al de una jeringa. Entonces el pistón deberá ser impulsado hacia arriba, succionando con esto la lechada y a la vez llenándose de fluido el cilindro.



Extracción del fluido



Presurización con la bomba

La punta de la bomba deberá colocarse sobre la válvula de la tapa de la copa de la balanza, haciendo presión hacia abajo. Cuando el pistón se haya desplazado por completo hacia abajo, y manteniendo la presión sobre el cilindro, deberá inyectarse la lechada a la copa hasta que el pistón se desplace hacia arriba por efectos de la presión de la lechada

Se comprobará que la presión ha quedado atrapada en la copa, intentando retirar la rosca sin conseguirlo. Si lográramos retirar la rosca, entonces será

necesario inyectar más lechada a la copa, hasta conseguir que la rosca no pueda ser retirada manualmente.

La lechada derramada deberá limpiarse de la copa. Seguidamente la balanza deberá colocarse sobre el soporte que se encuentra dentro del estuche. Colocando el indicador en el sitio exacto donde la burbuja niveladora esté centralizada. El valor de densidad se obtiene mediante la lectura de la misma en cualquiera de las 4 escalas que nos presenta el brazo de la balanza.



Determinación de la densidad de la lechada

Resultados:

$$D_L = 1.98 \text{ (gr/cc)}, = 858 \text{ (psi/gal)}, = 16.5 \text{ (lbs/gal)}, = 123.7 \text{ (lbs/ft}^3\text{)}$$

**NOTA:** El anterior resultado deberá coincidir con el obtenido en el desarrollo de cálculo de materiales.

Liberaremos la presión de la copa empujando la válvula check con la punta de la bomba y al mismo tiempo extrayendo un cierto volumen de lechada. La copa y la bomba deberán ser vaciadas y limpiadas perfectamente. Para un mejor funcionamiento de la válvula y bomba, estas deberán engrasarse ligeramente.

### **3.2.5.- OBSERVACIÓN**

**Altas presiones de poros, agujeros inestables y formaciones plásticas/deformables, son controladas por altas presiones hidrostáticas. Para estas condiciones, se requieren densidades de lodos de 2.16 gr/cc. Para mantener el control de dichos pozos también se requieren lechadas de igual o mayor densidad.**

**Un método para aumentar la densidad de una lechada de cemento es simplemente reducir la cantidad de agua de mezcla. Para mantener la bombeabilidad, se requiere además, un dispersante. La desventaja principal de “las lechadas preparadas con poca agua” es la dificultad de lograr simultáneamente un adecuado control de pérdida de fluido por filtrado, una reología aceptable de la lechada y evitar asentamiento de sólidos. Si no se tiene un adecuado control en la pérdida de fluido por filtrado, el riesgo de que ocurra un taponamiento durante el bombeo de dicha lechada es mayor. La máxima densidad alcanzada para una lechada de este tipo es de 2.16 gr/cc. Cuando se requieran lechadas de mayor peso, se agregaran materiales con una gravedad específica alta. Para que un densificante sea aceptable, deberá contar con las siguientes propiedades:**

- La distribución del tamaño de las partículas del material debe ser compatible con el cemento. Las partículas grandes tienden a decantarse, mientras que las partículas pequeñas tienden a aumentar la viscosidad de la lechada.**
- El requerimiento de agua debe ser bajo.**
- El material deberá ser inerte a la hidratación del cemento y compatible con los aditivos de la lechada.**

### **3.3.- COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA DE CEMENTO.**

#### **3.3.1.- INTRODUCCIÓN**

La reología se define como el estudio del flujo y deformación de fluidos. Describe las relaciones entre la tasa de flujo (velocidad de corte) y la presión (esfuerzo de corte) necesaria para desplazar un fluido determinado. La tasa de corte, se define como la diferencia en velocidad de dos partículas de fluido divididas entre la distancia que hay entre ellas. El esfuerzo del corte, es la fuerza de fricción producida por dos partículas al rozarse una con otra. La viscosidad es la medición de la resistencia de un fluido a fluir y es igual al esfuerzo de corte dividido entre la tasa de corte.

Basado en las relaciones de tasa y esfuerzo, un fluido puede definirse por varios modelos matemáticos que incluyen: la unidad newtoniana, la unidad plástica Bingham o la ley de potencia. A un fluido se le puede describir más ampliamente por los tres tipos de flujo: tapón, laminar y turbulento. Los fluidos newtonianos exhiben dos regímenes solamente; laminar y turbulento, mientras que los fluidos no-newtonianos (unidad plástica bingham y la ley de potencia) exhiben los tres dependiendo de la velocidad.

#### **3.3.2.- ALCANCE**

La determinación de las propiedades reológicas de una lechada de cemento puede ser sensible a los procedimientos que están siendo utilizados. El alcance de este procedimiento es la caracterización del comportamiento geológico de las lechadas de cemento. Por tanto, una comparación de propiedades reológicas de lechadas de cemento, obtenidas mediante diferentes procedimientos no es recomendada. Un procedimiento estandarizado ha sido desarrollado para generar resultados reproducibles para la industria petrolera.

### 3.3.3.- EQUIPO REQUERIDO

Un equipo conforme al enseguida descrito puede ser usado para determinar las propiedades reológicas de las lechadas de cemento:



VISCOSÍMETRO ROTACIONAL FANN 35<sup>a</sup>.

Con este tipo de viscosímetro, la muestra es confinada entre dos cilindros concéntricos de radio  $R_1$  y  $R_2$  ( $R_2 > R_1$ ), uno de ellos, el rotor está girando a velocidad rotacional constante  $\Omega$ . La rotación del rotor en la presencia de la muestra produce una deflexión, que usualmente es medida por la pared interna del cilindro, pero esto también prevalece sobre la cara externa del cilindro. El radio del cilindro deberá ser tal que la muestra esté homogénea, y el esfuerzo de corte sea uniforme tanto como sea posible. Estas condiciones son asumidas para ser satisfechas si:

$$(R_1/R_2) > 0.9 \quad (1)$$

y

$$R_2 - R_1 > 10 \times \Phi \quad (2)$$

Donde:

$\Phi$  = diámetro de la partícula mas larga de la muestra.

La velocidad de corte nominal  $\gamma$ , y el esfuerzo de corte nominal,  $\tau$ , son calculados en la pared interna del cilindro por las siguientes expresiones:

$$\gamma = \frac{\pi}{15} \left( \frac{R_2^2 \Omega}{R_2^2 - R_1^2} \right) \quad (3)$$

$$\gamma = 4R_2^2 \Omega / R_2^2 - R_1^2 \quad (4)$$

Donde  $\gamma$  está en l/s y  $\Omega$ , la velocidad rotacional del viscosímetro, está en rpm (r/s), y:

$$\tau = 1.44 \times T / 2 \pi R_1^2 \quad (5)$$

$$\tau = T / 2 \pi R_1^2 \quad (6)$$

Donde  $\tau$  está en lbf/100 pies<sup>2</sup> (Pa);  $T$ , la deflexión por unidad de longitud, está en lbf (N); y  $R_1$  y  $R_2$  está en pulgadas (m). Las siguientes suposiciones son usadas en la derivación de las ecuaciones de la 3 a la 6:

- La lechada es homogénea y el esfuerzo de corte es uniforme en el anular.
- El régimen de flujo en el espacio anular es laminar.
- El desliz de la lechada contra la pared es ignorado.
- El fluido exhibe esencialmente independencia en su comportamiento.

El viscosímetro rotacional puede ser capaz de medir esfuerzo y velocidad de corte, en el rango de cero hasta una lectura tan alta como 1022 segundos recíprocos (1/s). Los instrumentos típicamente usados proveen de un mínimo de 5 lecturas en este rango. Equipos con menos de 5 lecturas no se recomiendan.

### 3.3.4.- DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN 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 y que a su vez es transmitida al bob o péndulo. Una torsión de un resorte reprime el movimiento del péndulo, y un disco con escala, atado al resorte, mide el desplazamiento del bob. Las especificaciones son las siguientes:

a) Camisa:

1. Diámetro interior: 1.450 pulgadas (36.83 mm).
2. Longitud total puede variar ligeramente según el fabricante.
3. Línea grabada a 2.30 pulg. (58.4 mm) arriba del fondo.
4. Dos líneas de agujeros de 1/8 de pulgada (3.18 mm), espaciados 120 grados (2.09 radianes) alrededor de la camisa rotatoria, y centrados 1/8 y 3/8 de pulgada abajo de la línea grabada.

b) Bob o péndulo.

1. Diámetro: 1.358 pulgadas (34.49 mm).
2. Longitud del cilindro: 1.496 pulgadas (38.00 mm).
3. El péndulo consta de una base plana, y una cima cónica con un semi – ángulo de 60 grados.

Cuando se usa este instrumento, la velocidad y esfuerzo de corte se puede calcular con los datos directos del instrumento, usando la siguiente expresión.

$$\gamma = 1.705 \times \Omega \quad (7)$$

$$\gamma = 32.55 \times \Omega \quad (8)$$

y

$$\tau \text{ (lbf/100 pies}^2\text{)} = 1.065 \times F \times \theta \quad (9)$$

$$\tau \text{ (Pa)} = 0.5099 \times F \times \theta \quad (10)$$

Donde:

- $\Omega$  = velocidad del viscosímetro en rpm (r/s)
- $\gamma$  = velocidad nominal de corte en l/s
- $\theta$  = lectura del viscosímetro en grados.
- F = factor de torsión del resorte del instrumento.
- $\tau$  = esfuerzo de corte en lbf/100 pies<sup>2</sup> (Pa).

Contador de Intervalo

Usar un cronómetro o reloj eléctrico.

Medidor de Temperatura.

Usar un termómetro o termocople capaz de medir temperatura entre  $\pm 1^\circ\text{F}$  ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ).

### 3.3.5.- CALIBRACIÓN

El procedimiento de calibración para un viscosímetro dado deberá hacerse como lo indique el fabricante, o asegurándose de la repetitividad de los resultados. La operación correcta de un viscosímetro de indicación directa depende, entre otras cosas de un mantenimiento de la tensión correcta del resorte. El procedimiento para probar la tensión del resorte puede hacerse a través del método de un simple peso muerto, o por la medición de un fluido Newtoniano de viscosidad conocida a una específica temperatura. La velocidad rotacional deberá ser verificada con un tacómetro. En adición, es importante asegurarse que cuando el peso sea cero, el instrumento marque cero cuando la camisa gire a cualquier velocidad.

Aunque el instrumento típicamente usado está generalmente provisto de un resorte de torsión con un factor de 1 como estándar, otros resortes con otro

factor están disponibles para la medición de fluidos con alta o baja viscosidad. Cada vez que sea cambiado un resorte de torsión, el equipo deberá ser recalibrado. Cuando el equipo está provisto de un resorte con un factor mayor de 1, la lectura obtenida en la escala de equipo deberá ser multiplicada por el factor F apropiado.

El ensamble péndulo-camisa deberá ser verificado para centralizar estos, antes de su uso. Esto deberá ser hecho encendiendo el motor y colocando un espejo debajo del ensamble. Cualquier descentralización deberá ser corregida.

### **3.3.6.- PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS.**

Este procedimiento es recomendado cuando se está usando un consistómetro atmosférico o uno presurizado (para temperaturas superiores a 189°F, 87°C). Por razones de seguridad, el viscosímetro atmosférico no debe usarse a temperaturas superiores de 189°F. Este procedimiento sólo podrá ser alterado cuando se utilice un viscosímetro presurizado, y esta variante será de acuerdo a las características de equipo. Los instrumentos (péndulo o bob, camisa giratoria o sleeve y el vaso de muestra o copa), deberán ser limpiadas y secadas antes de cada prueba.

La lechada de cemento deberá ser preparada de acuerdo a lo establecido en la preparación de la lechada (prueba #1).

La lechada de cemento deberá ser colocada inmediatamente dentro de la copa de la lechada del consistómetro atmosférico o uno presurizado, para un acondicionamiento. La copa de la lechada deberá estar inicialmente a temperatura ambiente, para evitar la posibilidad de un choque térmico en aditivos sensibles a la temperatura. La lechada deberá ser entonces calentada a la temperatura de prueba deseada arriba de 189°F en el consistómetro atmosférico, o a la temperatura y presión elevadas y deseadas, en un consistómetro presurizado, y aplicar la apropiada cédula de calentamiento para el tiempo bombeable. Para lechadas que no incluyen aditivos que no se vean

afectados por un choque térmico, la copa de la lechada puede estar pre-calentada ( $\pm 5^{\circ}\text{F}$ ,  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) a la temperatura de prueba, o a cualquier otra temperatura inicial de prueba seleccionada por el operador, antes de colocar la lechada dentro de la copa de la lechada.



Lechada en la copa del consistómetro. Acondicionamiento de la lechada.

**Nota:** En este caso no hay problema si pre-calentamos el consistómetro a la temperatura de prueba ya que no estamos utilizando aditivos, recordemos que estamos trabajando con una lechada base (cemento “H” y agua).

La lechada de cemento deberá ser puesta en agitación por un periodo de 20 minutos después de que la temperatura y presión de acondicionamiento han sido alcanzadas. Si el pre-acondicionamiento se hiciese en un consistómetro presurizado, la lechada deberá entonces ser enfriada tan cerca de  $189^{\circ}\text{F}$  como sea posible, o a la temperatura de prueba si esta es menor de  $189^{\circ}\text{F}$ , antes de desfogar la presión del consistómetro. El consistómetro presurizado deberá abrirse con cuidado. Cualquier cantidad de aceite que pudiese haber invadido la copa de prueba durante el pre-acondicionamiento de la lechada, deberá ser retirado de la cima de la lechada. Luego de que el aceite se haya separado, la paleta de agitación deberá ser retirada y la lechada deberá ser removida vigorosamente con una espátula por 5 segundos para redispersar los sólidos que pudiesen haberse precipitado en el fondo de la copa.

La lechada de cemento deberá ser inmediatamente puesta dentro de la copa del viscosímetro llenándolo hasta la línea. El péndulo, copa y camisa deberán ser mantenidos a temperatura ( $\pm 5^{\circ}\text{F}$ ,  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) de prueba mientras ésta se realiza, utilizando una chaqueta de calentamiento lo suficientemente grande para que tenga un buen control de temperatura (según se indica en el punto 12.6, la máxima temperatura no deberá exceder los  $189^{\circ}\text{F}$  si se utiliza un viscosímetro atmosférico). Durante los pasos 12.6.3 y 12.6.4, deberá evitarse que la lechada permanezca periodos estáticos.



Con la camisa girando a la más baja velocidad en rpm, la copa precalentada deberá ser alzada hasta que el nivel del líquido coincida con la línea marcada en la cara externa de la camisa rotatoria. Esta operación minimizará la gelificación y asegura una distribución uniforme de la lechada.

La temperatura de la lechada en la copa del viscosímetro deberá ser registrada antes de tomar la primera lectura. La lectura inicial del dial deberá ser tomada 10 segundos después de rotación continua a la más baja velocidad. Todas las lecturas remanentes deberán ser tomadas primero en orden ascendente y luego en orden descendente, después de una continua rotación de 10 segundos para cada velocidad. El cambio a la siguiente velocidad deberá ser hecho inmediatamente después de tomar cada lectura. La mas alta lectura tomada deberá registrarse para una velocidad de corte de alrededor de 511 l/s. Exponiendo la lechada a velocidades de corte arriba de 511 l/s, se ha demostrado que se obtienen resultados inconsistentes. Si se desea, después

de haberse tomado las lecturas ascendentes y descendentes, el esfuerzo de gel puede ser tomado a velocidad superior a los 511 s/l. Después de haberse tomado todas las lecturas, la temperatura de la lechada en el viscosímetro deberá registrarse.

La relación de las lecturas ascendentes y descendentes deberá ser calculadas para cada velocidad. Esta relación puede ser usada para ayudar a calificar ciertas propiedades de la lechada.



Lechada en el vaso del consistómetro



Lecturas en el viscosímetro Fann.

Cuando la relación para todas las velocidades es aproximadamente 1, esto es indicativo de que la lechada no tenderá a precipitarse, independientemente del tiempo y temperatura promedio de prueba.

Valores bastante más altos que 1 pueden sugerir asentamiento de sólidos para las temperaturas promedio de prueba. En adición, para cualquier velocidad, si la lectura ascendente resultara ser 5 unidades más baja que la lectura descendente para esa misma velocidad, esto nos estará indicando de una posible precipitación.

Relación de valores más bajos que 1 pueden sugerir gelificación de la lechada.

Cuando hay diferencias significativas en las lecturas es indicativo de que la lechada de cemento no es estable, es decir, presentará problemas de precipitación extremadamente altos o por el contrario, presentará excesiva gelificación, y deberán considerarse ajustes en la composición de la lechada.

Las lecturas reológicas de las lechadas deberán ser reportadas como el promedio de las lecturas (ascendente mas descendente entre 2), para el promedio de temperatura registrada en el paso. Un ejemplo es muestra en la Tabla 9.

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

Tabla 9. Lecturas realizadas en el viscosímetro

Temperatura inicial de la lechada = 150°F

Temperatura final de la lechada = 146°F

Propiedades reológicas reportadas a temperatura promedio = 148°F.

**NOTA:**

**Para obtener resultados más confiables en las lecturas, el procedimiento puede repetirse varias veces utilizando una muestra fresca cada vez, con esto se logra un promedio de todas las mediciones aceptables.**

---

### 3.4.- PÉRDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO

#### 3.4.1.- EQUIPO REQUERIDO

Una celda para alta presión y alta temperatura provista de un filtro malla 325 soportado por una malla 60.

Los manómetros deberán tener una escala tal que la presión pueda ser leída a  $\pm 50$ psi; estos deberán ser calibrados anualmente.

#### SEGURIDAD

Estos procedimientos requieren el manejo de equipo y materiales calientes, que son peligrosos y pueden causar daños. *Solamente personal entrenado deberá correr estas pruebas.*

Se realiza la mezcla de la lechada conforme a la práctica No.1

#### PROCEDIMIENTOS DE ACONDICIONAMIENTO

Todas las lechadas deberán iniciar su acondicionamiento a  $80^{\circ}\text{F}$ ,  $\pm 2^{\circ}\text{F}$ , o a una temperatura apropiada para las condiciones del pozo, y calentar de acuerdo a la cédula apropiada.

#### 3.4.2.- PROCEDIMIENTO PARA PRUEBA A TEMPERATURA MENOR QUE $194^{\circ}\text{F}$

Acondicionamiento a Presión Atmosférica.

En no más de un minuto después de haber preparado la lechada, colocar esta dentro del contenedor del consistómetro atmosférico.

Calentar la lechada a PBHCT o PSqT de acuerdo a la cédula de tiempo bombeable que mas se acerque o simule las condiciones actuales del pozo. (Ver opcionalmente el paso 10.6.4, "Acondicionamiento Extra a Temperatura de Prueba.)



Consistómetro atmosférico



Acondicionamiento de la lechada.

Después de haber acondicionado la lechada, remover la paleta y agitar la lechada perfectamente bien para asegurarse de que esté uniforme y proceder al llenado de la celda del filtro prensa.

### LLENADO DE LA CELDA

Prepare la celda de pérdida por filtrado (esta deberá estar lista para ser llenada cuando el tiempo de acondicionamiento de la lechada haya sido completado). Esta deberá estar limpia y seca.

Precalentar la celda a la temperatura de prueba  $194, \pm 5^{\circ}\text{F}$  para pruebas a  $194^{\circ}\text{F}$ , o mayores.

Con la válvula suplidora de  $\text{N}_2$  cerrada, poner la lechada dentro de la celda a  $1''$ ,  $\pm \frac{1}{4}''$  abajo del hombro sobre el que descansa el filtro en la celda de  $5''$  o  $2''$ ,  $\pm \frac{1}{4}''$  en la celda de  $10''$ . *Si la celda se sobrellena puede haber peligro por una expansión térmica.*

Colocar el filtro y sellos en la celda y asegurar la tapa en la celda. Aplicar  $500, \pm 50$  psi. No cerrar la válvula.



Colocación de la malla #325.

### CALENTAMIENTO

Para pruebas a temperaturas menores que 194°F, la prueba deberá ser iniciada tan rápidamente como sea posible, pero no deberán transcurrir más de seis minutos entre que termine el acondicionamiento de la lechada e inicie la prueba (abriendo la válvula del fondo).

#### 3.4.3.- ACONDICIONAR EL EQUIPO

Cerrar la válvula superior de la celda, liberar la presión de la línea suministradora de N<sub>2</sub> y desconectar la línea de N<sub>2</sub>.

Invertir la posición de la celda de tal suerte que el filtro o malla quede en el fondo.

Conectar la celda, enroscando la parte superior a la línea de N<sub>2</sub>.

Aplicar una presión diferencial de 1000, ±50 psi. Abrir el tubo de admisión de la celda y aplicar y mantener una presión diferencial de 1000 psi ±50psi.



Presión en el filtro - prensa (1000 psi)

## PRUEBA DE PERDIDA POR FILTRADO



Conexión del sistema presurizado.



Inicio de la prueba de filtrado.

Abrir la válvula del fondo de la celda (aquí inicia la prueba). La prueba deberá iniciar dentro de los próximos 30 segundos de que se haya invertido la celda. La temperatura será mantenida en el valor especificado por la duración de la prueba.



Abrir válvula de flujo.



Volumen acumulado.



Reportar filtrado API.

Colectar el filtrado y registrar el volumen para  $\pm 1$  ml a 30 segundos y 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 25 y 30 minutos. Alternativamente el filtrado debe ser continuamente pesado y registrado. La forma de reporte para el resultado de pérdida por filtrado, puede ser usada para registrar datos y otra información pertinente acerca de la prueba. Si el fluido recuperado es pesado, la gravedad específica de este puede ser calculada y reportada a 80°F, haciendo las corrección correspondiente.

Si la lechada llegase a deshidratarse antes de los 30 minutos de prueba, registrar el volumen y tiempo en que esto haya ocurrido. Cerrar todas las válvulas de la celda y apagar la unidad de calentamiento.

Calcular la pérdida por filtrado API. Para pruebas que se hayan llegado a los 30 minutos de prueba, la pérdida por filtrado se reportará midiendo en ml el volumen recuperado y se multiplicará por dos.

Pérdida por Filtrado API=  $2 Q_t$

Donde  $Q_t$  es el volumen en ml de filtrado recuperado.

En caso de que la deshidratación de la lechada ocurra antes de los 30 minutos, use la siguiente ecuación para hacer el cálculo:

Pérdida por Filtrado API Calculado=  $2 Q_t \frac{5.477}{\sqrt{t}}$

$$\sqrt{t}$$

Donde  $Q_t$  es el volumen en ml de filtrado recuperado, para el tiempo  $t$  en minutos.

### TERMINACIÓN DE LA PRUEBA Y LIMPIEZA DEL EQUIPO

Enfriar la celda para un manejo seguro de la temperatura y liberación de la presión.

**PRECACUCIÓN:** No es común que quede entrampada la presión dentro de la celda, siempre que la válvula del sistema esté abierta.

Asegurarse que la presión en su totalidad ha desaparecido, desensamblar la celda e inspeccionar el filtro o malla para verificar que los agujeros no estén dañados. Si hubiese daños en los sellos o malla, descartar los resultados de la prueba y repetirla.

Cuidadosamente limpiar la malla o filtro para remover el cemento o residuos de la prueba.

Limpiar y secar la celda de filtrado en preparación para la siguiente prueba. Poner especial atención en la limpieza de los sellos y válvulas de la celda.

### **3.4.4.- CONCLUSIÓN**

Una propiedad importante de la lechada a controlarse es la tasa de pérdida de fluido. Varios aditivos están disponibles para controlar la tasa de pérdida de fluido de la lechada de cemento para mantener la proporción apropiada agua-cemento como se discutió anteriormente. Estos aditivos evitan la deshidratación de la lechada ya que si el cemento se encuentra con formaciones permeables en el agujero perforado durante la cementación, la pérdida de solamente una porción de agua, puede alterar notablemente las propiedades del cemento, el tiempo de espesamiento de la lechada se verá reducido con la pérdida de agua. A profundidades mayores se requieren tiempos de bombeo más prolongados y el tiempo de espesamiento deberá ser predicho para esas condiciones. Cualquier pérdida en la proporción de agua durante la operación de cementación puede reducir el tiempo de espesamiento, si existe una excesiva pérdida de fluido, entonces la lechada experimentará una deshidratación importante de modo tal que el trabajo de cementación termine prematuramente.

Por lo tanto se deberá poner atención durante el diseño de la lechada y el uso de los aditivos controladores de filtrado, los resultados de las pruebas de laboratorio serán contundentes tomando en cuenta las siguientes observaciones:

- 1.- Lechadas con significativa sedimentación da resultados erróneos.
- 2.- Las pruebas que no llegan a totalizar los 30 minutos, llegan a tener un error potencial que se hace más grande cuanto mas corto es el tiempo de prueba.
- 3.- La prueba que llega a los 30 minutos, presenta normalmente una variación típica de 5%. Las pruebas que duran menos de 5 minutos tienen una variabilidad de más del 30%.

### **3.5.- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO COMPRESIVO**

#### **3.5.1.- INTRODUCCIÓN**

La prueba de la resistencia a la compresión de un cemento fraguado, se efectúa sometiendo un cubo de cemento de 2 pg<sup>2</sup> para determinar la fuerza con la cual se rompe la muestra. Aunque el método destructivo se ha empleado por más de 40 años en la industria petrolera, estableciendo el tiempo de fraguado del cemento y así reiniciando las operaciones de perforación/limpieza, no necesariamente indica la adherencia del cemento/formación, y cemento/revestidor.

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 psi.

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/cm<sup>2</sup> (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.

## OBJETIVO

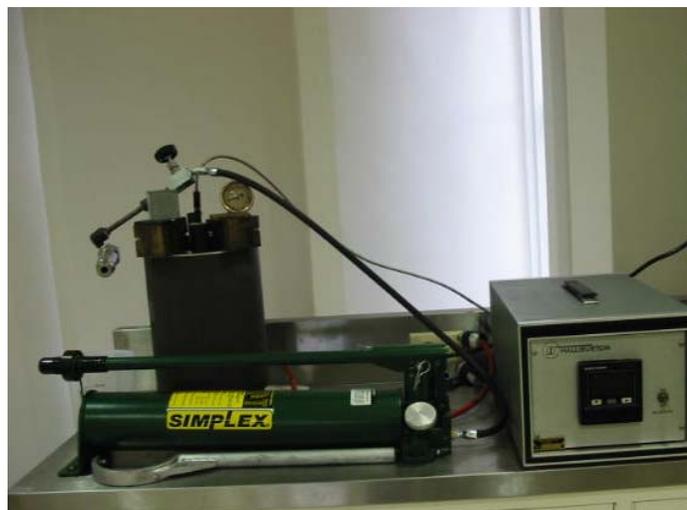
Describir de manera clara y específica el procedimiento para determinar la resistencia al esfuerzo compresivo de un bloque de cemento fraguado bajo condiciones de presión y temperatura que simulan las condiciones de fondo de pozo.

## ALCANCE

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.

### 3.5.2.- EQUIPO REQUERIDO

El equipo que utilizaremos para esta práctica será el *autoclave* para curado de cubos de cemento, en el fraguará el cemento bajo condiciones específicas de presión y temperatura y la prensa hidráulica para la realización de la prueba destructiva, en la que se someterá a presión cada uno de los cubos de cemento fraguados en el autoclave, dicha presión quedará señalada en el manómetro de la prensa en (psi).



Autoclave para curado de cubos de cemento

### 3.5.3.- 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  $27 \pm 3$  °C ( $80 \pm 5$  °F).

- 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  $27 \pm 3$  °C  $\pm$  ( $80 \pm 5$  °F) hasta que las muestras sean sometidas a esfuerzo compresivo.

#### **3.5.4.- 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  $71.7 \pm 7.2$  kN/min ( $16,000 \pm 1,600$  lb<sub>f</sub>/min). Para muestras de 4 pg<sup>2</sup>, 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<sub>f</sub> en 15 segundos.



Prensa Hidráulica

### 3.5.5.-RESULTADOS

Reportar la resistencia al esfuerzo compresivo o 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/pg<sup>2</sup>) mínimo.
- Para 8 horas de curado, a 60 °C y presión atmosférica: 10.342 MPa (1,500 lb/pg<sup>2</sup>) mínimo.

### 3.6.- PRUEBA DE TIEMPO BOMBEABLE

#### GENERALIDADES

Los procedimientos para la determinación de la prueba de tiempo bombeable de una lechada de cemento, está contemplada en esta sección. El resultado de la prueba de laboratorio para tiempo bombeable nos sirve como un indicador del tiempo del que disponemos para bombear una lechada dentro de un pozo. Las condiciones de prueba en el laboratorio, pueden representar el tiempo, presión y temperatura a las que una lechada de cemento estará expuesta durante la operación de bombeo.

#### 3.6.1.- EQUIPO REQUERIDO

Se requiere un consistómetro presurizado, el aparato más comúnmente usado consta de un cilindro rotatorio contenedor de lechada, equipado con una paleta estacionaria, todo encerrado en un cilindro de acero capaz de simular las condiciones de temperatura y presión del pozo. El espacio entre el contenedor de la lechada y la pared del pozo de presión puede ser completamente llenado con aceite derivado de hidrocarburos. El aceite seleccionado deberá tener las siguientes propiedades físicas:

Viscosidad = 49 - 350 SSU @ 100°F (7 - 75 cSt)

Calor Específico = 0.5 - 0.58 Btu/lb x °F  
[2.1 - 2.4 kJ/9kg x K]

Conductividad Térmica = 0.0685 - 0.0770 Btu/h x ft<sup>2</sup> x °F/ft)  
[0.119 - 0.133 W/(m x K )]

Gravedad Específica = 0.85 - 0.91

Solamente si la temperatura de prueba excediera el punto de flash del aceite, entonces habría que cambiar el tipo de aceite por uno de origen mineral que cumpla con las especificaciones antes mencionadas.

Un sistema de calentamiento capaz de elevar la temperatura del baño de aceite a una velocidad de al menos  $5^{\circ}\text{F}$  ( $2.8^{\circ}\text{C}$  por minuto) es requerido. La medición de la temperatura deberá ser monitoreada para la lechada de cemento y también, opcionalmente, para el baño de aceite.



Consistómetro presurizado para medir el tiempo bombeable.

El contenedor de la lechada deberá rotar a una velocidad angular de  $150\text{ rpm}$ ,  $\pm 15$  ( $2.5$ ,  $\pm 0.25\text{ rev/seg}$ ). La consistencia de la lechada de cemento deberá ser medida continuamente. La paleta y todas las partes del contenedor de lechada expuestas a esta última, deberán estar construidas de materiales resistentes a la corrosión.

## CALIBRACIÓN

La medición del parámetro Tiempo de Espesamiento (TB) de una lechada de cemento, requiere calibración y mantenimiento del sistema operativo del Consistómetro presurizado, incluyendo el medidor de consistencia, sistema de medición de temperatura, controladores de temperatura, velocidad del motor, reloj y manómetros.

## Consistencia

La consistencia del cemento está expresada en unidades de consistencia Bearden (Bc). Este valor es medido por el mecanismo de un potenciómetro y la medición de voltaje de una resistencia. Este deberá ser calibrado mensualmente, y siempre que se calibre el resorte, deberán ajustarse la resistencia y el brazo de contacto o reemplazarlos. Uno de los siguientes métodos debe ser usado.

La carga de un peso aplicada al resorte, produce una serie de deformaciones al resorte equivalentes a valores para consistencia que pueden ser usados para calibración, definidos por la siguiente ecuación:

$$T = 78.2 + 20.02 Bc$$

Donde:

T = torque o deformación del resorte en gr\*cm

Bc = Unidades Bearden de consistencia

Los pesos empleados para aplicar torque al resorte del potenciómetro, usan el radio de la armazón de este como un brazo de palanca. Al aplicársele un peso al potenciómetro, el brazo de contacto es desplazado generándose una señal eléctrica en voltios (DC), la que será registrada y usada para determinar los grados Bc como se indica en la tabla 3 (ver manual de instrucciones del fabricante para procedimientos). En algunos equipos estas unidades se puede leer directamente en una pantalla (display). Un método alternativo para la calibración del potenciómetro es usando el aceite calibrador, con una relación viscosidad-temperatura con valores conocidos en un rango de 5 a 100 unidades Bc de consistencia (el aceite de calibración deberá desecharse luego de haberse usado).

**Sistema de Medición de la Temperatura**

El sistema de medición deberá ser calibrado con una precisión de  $\pm 3^{\circ}\text{F}$  ( $\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ ). La calibración deberá hacerse a intervalos no menores de 1 mes.

**Velocidad del Motor**

La rotación del contenedor de la lechada deberá ser 150,  $\pm 15$  rpm (2.5,  $\pm 0.25$  rev/seg), y deberá ser verificada con una frecuencia no menor a 3 meses.

**Reloj**

El cronómetro deberá ser verificado anualmente. Este deberá tener una exactitud de  $\pm 30$  segundos por hora

**Manómetro**

La calibración deberá hacerse anualmente

**3.6.2.- PROCEDIMIENTO DE PRUEBA****Instrucciones de Operación**

Los detalles de instrucciones de operación, como los provistos por el equipo manufacturado, son aplicables bajo éste método y deberán seguirse, conforme a los procesos contenidos aquí. En caso de conflicto, estos procedimientos deberán suspenderse. No exceder los límites de seguridad del fabricante.

**PRECAUCIÓN**

Estos procedimientos requieren del manejo de equipos con temperaturas elevadas y alta presión, materiales peligrosos que pueden causar daño. Sólo personal entrenado deberá correr estas pruebas.

Ensamblado y Llenado del Contenedor de la Lechada. El ensamble y llenado del contenedor de la lechada es como sigue:

- a. Limpiar y lubricar el interior de la copa o cilindro.

- b. En la parte superior de la copa insertar el o-ring de acero, haciéndolo descansar sobre la ceja interior de la copa.
- c. Inspeccionar el diafragma y colocarlo sobre el o-ring del inciso b).
- d. Insertar el soporte del diafragma.
- e. Asegurar el soporte del diafragma con la rosca respectiva.
- f. Insertar el ensamble paleta - flecha, haciendo pasar la parte superior de la flecha a través del diafragma.
- g. Asegurar la flecha con el disco y barra guía.
- h. Colocar la tapa inferior y el tapón de la misma en la copa, para verificar que la paleta gira libremente.
- i. Destapar la copa e invertir su posición original para llenarla con la lechada, dejando 1/4" libre entre la cima del cemento y el borde de la copa.



Celda lubricada lista para armarse

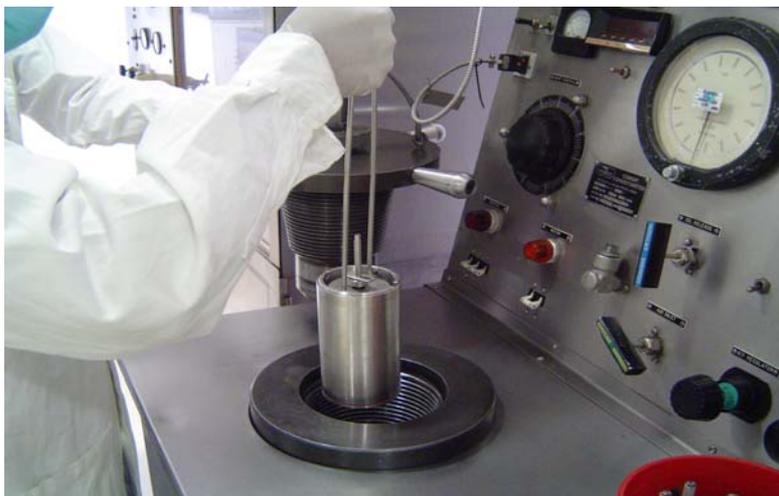


Lechada en el interior de la celda.

**NOTA.** La lechada puede experimentar una segregación durante la operación de llenado. Esto puede ser reducido agitando la lechada en el vaso de mezclado con una espátula, mientras llenamos la copa. Este fenómeno se puede evitar si el tiempo entre que cesa la agitación y el llenado de la copa es mínimo.

- j. Golpear la copa, con un martillo con cabeza de goma, para sacar el aire de la lecha.

- k Colocar la tapa de la copa y el tornillo de la copa, asegurándose de que la flecha ha quedado centrada.
- l Retirar todo el cemento de la superficie de la copa.
- m Asegurarse de que la flecha gira libre y suavemente.
- n Introducir la copa en el pozo del Consistómetro.



Introducción de la celda dentro del consistómetro presurizado.

### 3.6.3.- INICIO DE LA PRUEBA

Ensanche el contenedor de la lechada sobre la mesa rotaria dentro del pozo de prueba, encender el motor y colocar el potenciómetro sobre la copa, verificando que éste haya ensamblado perfectamente bien sobre la barra guía de la flecha de la copa. Si esto ocurre, la flecha no deberá girar más. Iniciar a llenar con aceite el pozo de prueba, y se procederá a tapan el pozo. Insertar el sensor de temperatura a través del orificio central de la tapa del pozo. Cuando se haya llenado de aceite el pozo, se procederá a cerrar el orificio de purga. La prueba deberá iniciarse en un máximo de 5 minutos luego de haber cesado la agitación en la mezcladora.



Colocación del potenciómetro

### Control de Presión y Temperatura

Durante este periodo de prueba, la temperatura y presión de la lechada de cemento, se irá incrementando de acuerdo con la cédula apropiada. La cédula puede ser calculada o tomada de las tablas. La temperatura del cemento deberá ser tomada mediante un termocople Tipo J (clasificación especial de ASTM) localizado en el centro del contenedor de la lechada.



Preparación

### **3.6.4.- RESULTADOS**

#### **Tiempo Bombeable**

El tiempo bombeable es aquél que transcurre desde el momento mismo en que se inicia a aplicar presión y temperatura a la lechada, y hasta que ésta alcanza una consistencia lo suficientemente alta lo cual ocasiona que la lechada ya no permita ser bombeada (70 o 100 Bc). El tiempo bombeable obtenido será entonces el tiempo con el se cuenta para llevar a cabo la cementación.

## CONCLUSIONES

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.

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.

Por lo tanto las operaciones de cementación fincarán su éxito en el adecuado diseño de las lechadas de cemento, en la excelente calidad de los aditivos así como la correcta realización de las pruebas de laboratorio.

Este trabajo constituye una guía para el alumno que cursa la materia de ingeniería de pozos y permitirá llevar a cabo las prácticas de laboratorio de cementaciones con la descripción detallada de los procedimientos de prueba estandarizados de acuerdo a las prácticas recomendadas de las **Normas ANSI / API 2005 10B**

## **GLOSARIO**

### **1 Cemento Pórtland**

Mezcla de materiales principalmente carbonatos, silicatos de calcio hidráulicos y aluminatos por lo general conteniendo una o varias formas de sulfato de calcio adicional a la mezcla.

### **2 Clases y tipos de cemento**

Designación utilizada en el sistema ISO de las clasificaciones de cemento para pozos de acuerdo a su función.

### **3 Grado del cemento**

Designación utilizada en el sistema ISO denotando la resistencia a los sulfatos de un cemento en particular.

### **4 Aditivo**

Material adicionado a la lechada de cemento para modificar o mejorar alguna de sus propiedades.

### **5 Espacio anular**

Espacio comprendido entre la tubería y la pared del pozo.

### **6 Unidades de consistencia Bearden**

Unidades utilizadas para expresar la consistencia de una lechada de cemento determinada, la cuál se mide en un consistómetro.

**Nota:** El símbolo utilizado para expresar unidades Bearden es **B<sub>c</sub>**.

## **7 Blowout**

Momento en que la primera burbuja de gas fluye a través de la muestra, en una prueba de pérdida de fluido.

## **8 Clínger**

Material calcinado durante la fabricación del cemento, el cuál se muele y mezcla con sulfato de calcio di-hidratado para formar el cemento.

## **9 Compatibilidad**

Es la capacidad para formar una mezcla fluida que no sufre reacciones químicas o físicas indeseables.

## **10 Esfuerzo compresivo**

Fuerza que se aplica a un bloque de cemento para medir su resistencia.

**Nota:** Esta fuerza se mide como fuerza por unidad de área ( $\text{Kg/cm}^2$  y/o Psi)

## **11 Consistómetro presurizado**

Equipo o dispositivo utilizado para medir el tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento bajo condiciones específicas de presión y temperatura.

## **12 Filtrado**

Líquido que es forzado a salir de una lechada de cemento durante la prueba de “pérdida de fluido por filtrado”.

### **13 Ceniza (fly ash)**

Polvo residual resultado de la combustión del carbón el cuál tiene propiedades pozzolonicas.

### **14 Agua libre**

Líquido transparente que se ha separado de la lechada, el cuál se acumula en la superficie de la misma.

### **15 Puzolona**

Material silíceo o silíceo-aluminoso muy fino que reacciona con el hidróxido de calcio para formar un material cementante.

### **16 Lechada base**

Mezcla hecha únicamente de cemento y agua.



## TABLA DE MATERIALES

### CÁLCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Para llevar a cabo la preparación de una lechada de cemento, primero tendremos que calcular las cantidades de material a mezclar, en este caso hablamos de una lechada base (únicamente intervienen cemento “H” y agua)

La norma API 10B, nos indica un volumen de lechada para el laboratorio el cuál será de 600 (cc).

#### 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 mezclado. Los requerimientos de laboratorio para la mezcla pueden ser calculados usando las siguientes fórmulas.

$$\ell_L = M_T / V_T$$

Para trabajar en el laboratorio (API 10RB): V= 600 (cc)

$$M_T = \ell_L * 600 \text{ (cc)}$$

MATERIAL	PESO (Kg)	AGUA (Lt)	RENDIMIENTO (Lt)	FRACCIÓN
CEMENTO	50	19	15.82	.7246
AGUA	19		19	.2754
<b>TOTAL</b>	<b>69</b>		<b>34.82</b>	<b>1.0</b>

Requerimiento de agua del cemento 38%

$$\text{Rend} = W_{mat} / \&_{mat}$$

$$\text{Fracción} = W_{mat} / W_{total}$$

$$\ell_L = M_T / V_T \text{ (rendimiento)}$$

$$\begin{aligned} \ell_L &= 69 \text{ (kg)} / 34.82 \text{ (lt)} = 1.98 \text{ (kg/lt)} \\ &= 1.98 \text{ (gr/cc)} \end{aligned}$$

Para obtener la cantidad a pesar de cada material en el laboratorio, la norma API 10RB nos indica un  $V = 600$  (cc) y conociendo la densidad de la lechada  $D_L = 1.98$  (gr/cc), únicamente despejamos la masa y tenemos:

$$M_T = \ell_L * 600 \text{ (cc)}$$

$$M_T = 1.98 \text{ (gr/cc)} * 600 \text{ (cc)} = 1188 \text{ (gr)}$$

Ahora para calcular la cantidad de cemento "H" presente en la mezcla:

$$M_c = 1188 \text{ (gr)} * .7246 = 860.82 \text{ (gr)}$$

Por lo tanto la cantidad de agua será:

$$M_a = 1188 \text{ (gr)} * .2754 = 327.18 \text{ (gr)}$$

Donde:

$\ell_L$  = densidad de la lechada (kg/lt) ó (gr/cc)

$V_T$  = volumen total de lechada (lt)

$M_T$  = masa total, cemento "H" y agua (kg)

$M_c$  = masa del cemento (gr)

$M_a$  = masa de agua (gr)

$W_{mat}$  = peso del material (kg)

$\gamma_{mat}$  = peso específico del material (kg/lit)

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

## **CONCLUSIÓN**

**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.**

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Normas ANSI /API 2005 10B**
- **Cementing Practices, OGCI (Oil and Gas Consultants Internacional Inc.)**
- **Normas ANSI /API 2005 10B**
- **Un siglo de la perforación en México. (Ingeniería de cementaciones)**
- **Industria petrolera (<http://industria-petrolera.blogspot.com>)**