



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

8  
2ej

CEMENTOS, ADITIVOS Y SU APLICACION  
A LA INDUSTRIA PETROLERA.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE;

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

MARIA ISABEL CABRERA MONTERO



MEXICO, D. F.

1990



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## I N D I C E

### INTRODUCCION.

#### I. HISTORIA Y DESARROLLO.

- A. Cemento natural.
- B. Cemento portland.
- C. Manufactura.

#### II. COMPOSICION QUIMICA.

#### III. TIPOS DE CEMENTO.

- A. Para uso industrial o para construcción.
- B. Para uso en pozos petroleros.
- C. Cementos especiales.

#### IV. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS.

#### V. PRUEBAS DE LABORATORIO.

#### VI. ADITIVOS.

#### VII. SISTEMAS ESPECIALES DE CEMENTACION.

#### VIII. ADITIVOS ESPECIALES.

#### IX. MEZCLA DE CEMENTOS CON ADITIVOS.

#### X. CEMENTACIONES.

- A. Cementación primaria.
- B. Cementación forzada.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### BIBLIOGRAFIA.

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

Se ha visto como la industria del petróleo ha continuado su rápida expansión, tanto en su magnitud como en la diversidad de sus productos. En la actualidad el uso de estos productos aumenta en casi todas las ramas de la industria.

La demanda del petróleo continuará regida por la expansión económica mundial. Además, sin la disponibilidad de suministros suficientes de energía, esta expansión económica sería imposible. Los costos son altos y tanto la exploración como la producción demandan ahora más de la mitad de las inversiones del capital de la industria.

Es por eso que se debe señalar la vital importancia del cemento en la industria petrolera porque de él depende el éxito en las terminaciones de pozos productores que aseguran las reservas. Este trabajo se refiere al cemento y su empleo en los pozos petroleros.

## I. HISTORIA Y DESARROLLO.

### A. Cemento Natural.

Se han hallado evidencias de que los materiales de cementación fueron usados en la construcción aún antes de los inicios de la historia escrita. Los egipcios utilizaron un yeso calcinado impuro o cal hidráulica mezclada con arena u otros materiales de ligamento para rellenar los bloques de piedra de las pirámides. Posteriormente, durante los períodos griego y romano, se desarrollaron los cementos hidráulicos, usando mezclas de varias - tierras volcánicas, calizas y otros materiales naturales. Estos materiales calcinados y mezclados con agua, producen una mezcla que se fija perfectamente ya sea en el aire o sobre el agua.

El desarrollo reciente de estos cementos hidráulicos se debe a mejores depósitos minerales que se usan en la manufactura del cemento. La roca que se utiliza para la elaboración del cemento puede ser una caliza impura conteniendo aproximadamente las proporciones apropiadas de carbonato de calcio, aluminatos y silicatos.

El material se procesa calentándolo a una temperatura lo suficientemente alta para causar la calcinación, pero no lo bastante alta para su fusión.

### B. Cemento Portland.

La aparición del primer cemento portland se le acreditó a la investigación de los científicos e ingenieros europeos, culminando en una patente inglesa expedida en 1824 a Joseph Aspdin. Al producto de Aspdin se le dió - nombre después de ver su semejanza con una roca natural en la isla de Portland; el término cemento Portland ha sido desde entonces generalmente aplicado a los cementos hechos por la calcinación de una mezcla proporcionada -

apropiadamente de caliza, aluminatos y silicatos. Los cementos portland como se conocen actualmente son esencialmente los mismos que en tiempos de Aspdin.

### C. Manufactura.

El material bruto o materia prima básica utilizada para la manufactura del cemento, es el carbonato de calcio y las sales minerales (dióxido de silicio) de las arcillas.

La mezcla de estos materiales es fundida a temperaturas de 2600°F a 3000°F en hornos rotatorios y el material obtenido se conoce con el nombre de "Clinker del Cemento"; una vez enfriado se pulveriza y se mezcla con una cierta cantidad de yeso en proporción de 1.5 % a 3 %, el cual controla el tiempo de fraguado.

## II. COMPOSICION QUIMICA.

Los componentes esenciales del cemento portland son cal, silicato y alúmina que se combinan.

Se llama cemento portland al producto previamente pulverizado de la calcinación de la mezcla artificial de materiales calcáreos y arcillosos. Este producto debe contener cuando menos 1.7 partes en peso de sílice, más alúmina con óxido férrico, no más de 4% de magnesio y no más de 1.75% de ácido sulfúrico anhidro, el cual se le agrega después de la calcinación.

Los materiales en bruto deben ser mezclados en proporciones muy exactas. Calcinando estos materiales a fusión incipiente, se garantiza una densidad alta, indispensable en el cemento portland.

Se admite 1.75% de ácido sulfúrico cuya presencia se debe a los componentes sulfurosos y al combustible; además, los compuestos de azufre son inevitables al agregar yeso en sus diferentes formas para regular el tiempo de fraguado.

El cemento portland es el más importante de todos los usados en construcciones de mampostería y en trabajo estructural en general, cede su primer lugar al acero.

Los componentes del cemento se encuentran libres en la naturaleza pero no en forma tal que puedan ser usados en la manufactura del cemento; la cal es la excepción y de no encontrarse libre se usa en forma de carbonato de calcio. Se utilizan la sílice y la alúmina en forma de barro, pizarra u otros materiales arcillosos.

Las rocas que se usan en la manufactura del cemento se combinan, las

mas usadas en América son: Piedras calizo-arcillosas y piedra caliza-pura; mármol y barro o barro arcillosos; piedra caliza, barro arcillosos o barro; "Clinker" de alto horno y piedra caliza.

### Piedra Caliza.

Consiste ésta esencialmente de carbonato de calcio ( $\text{Ca CO}_3$ ) con algunas impurezas como carbonato de magnesio, sílice, hierro, álcalis y azufre. No sirve una piedra caliza que contenga más de 50% de carbonato de magnesio. La sílice cuando se encuentra sola no se combina con la cal en el horno; cuando está mezclada con alúmina se combina con la cal durante el proceso de beneficio, razón por la cual esta roca es el material más importante en la manufactura del cemento Portland. No se debe permitir que lleguen a 5% la sosa y la potasa cáusticas.

Los componentes de las piedras calizas usadas en México son aproximadamente los siguientes:

Componente	% aproximado	% recomendable
$\text{Ca CO}_3$	88.0-98.0	93.0-97.0
$\text{Si O}_2$	0.3- 8.0	0.4- 3.0
$\text{Al}_2 \text{O}_3 + \text{Fe}_2 \text{O}_3$	0.2- 2.1	0.5- 1.3
$\text{Mg CO}_3$	0.2- 4.2	1.0- 2.5

### Piedra Calizo Arcillosa.

Consiste esta de caliza conteniendo de 68 a 72% de carbonato de calcio; 18 a 27% de material barroso, y no más de 5% de carbonato de magnesio. Tiene un color que va del gris al negro y es más suave que la piedra caliza.

### Mármol.

Esta roca es de carbonato de calcio relativamente puro, debido a la sedimentación del mármol. Realizándole un análisis se tienen los valores siguientes: 90 a 97% de carbonato de calcio y magnesio; menos de 1% de óxido de silicio; menos de 1% de alúmina y sesquióxido de hierro; pequeñas cantidades de materias orgánicas.

Cuando este material se usa en la fabricación del cemento Portland, debe agregarse de 15 a 20% de barro.

### Arcilla, Pizarra y barro arcillosos.

Estos materiales pueden ser considerados como constituidos por los mismos componentes químicos. Difieren solamente en su estructura más o menos compacta. Todas las arcillas tienen su origen en la desintegración de las rocas.

La arcilla pura consiste de un silicato de alúmina hidratada ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ). Esta arcilla resulta inservible para la fabricación del cemento si contiene hormigón y arena.

La proporción en que debe estar la sílice es de 55 a 65% cuando menos, y la alúmina combinada con el óxido de hierro debe tener la proporción de entre un tercio y un medio de la cantidad de sílice. Los barro arcillosos son arcillas endurecidas por presión, formados estos por depósitos sedimentarios. Este material es preferible al barro suave por ser similar a la piedra caliza en su carácter físico.

Tiene además menos agua y por lo tanto requiere menos secado, la arcilla es preferible cuando se le usa combinada con el mármol. La pizarra es barro sometido a muy altas presiones durante mucho tiempo y que se ha solidificado en estructura laminar; este material se usa en forma limitada en la fabricación del cemento Portland.

#### "Clinker" del alto horno.

Es este un silicato fusible que se forma durante la fundición del material mineral del hierro, de la combinación del fundente con la llamada ganga del mineral. El "clinker" usado en la manufactura del cemento tiene carácter fuertemente básico, siendo mejor a medida que es más alto en cal.

El siguiente análisis típico del "clinker" obtenido en cementos de segunda clase: Sílice, 33.1%; óxido de hierro y alúmina, 12.6%; cal, 49.98%; magnesio, 2.45%.

La calcinación de los materiales para la fabricación del cemento Portland debe ser precedida por dos procesos:

- a.- Reducción de los materiales a polvo.
- b.- Mezcla de los materiales en proporciones adecuadas.

Después de la mezcla de estos materiales se completa la pulverización.

#### Calcinación.

En la calcinación de los materiales usados para el cemento Portland se

verifican los siguientes procesos: la evaporación del agua, la desintegración de los carbonatos de calcio y magnesio, la expulsión de los álcalis y la combinación de la cal y magnesio con la sílice, alúmina y óxidos férricos para formar silicatos, aluminatos y ferritos que dan la estructura del cemento.

La mayor parte de la humedad se desprende cuando se rebasan los 100°C. El carbonato de magnesio se desintegra probablemente entre los 800 y 900°C, para la mayor parte de los cementos comerciales se ha encontrado que la temperatura más adecuada es la de 1500°C que asegura una perfecta combinación de la cal con los compuestos de arcillas.

#### Extracción, Trituración y Secado de la Piedra Caliza.

Los materiales en bruto empleados para el proceso en seco de la elaboración de cemento consisten, por lo general, de una roca de mediana compactación que es la piedra caliza y el material arcilloso. La extracción se hace por lo regular a un costado del cerro en explotación, extrayendo banco y quebrando a un tamaño razonable la piedra, la cual se conduce en carros de vía Decauville a la trituración inicial. El tamaño a que se acostumbra triturar, es entre 5 y 8 centímetros de diámetro.

Algunas ocasiones se tiene que secar la piedra con el objeto de mejorar los rendimientos del molino y la quebradora. Para secar esta piedra se usan hornos rotatorios que emplean los gases de escape de los hornos usados en la manufactura del cemento.

### Trituración, Mezcla y Pulverización de los Materiales.

Se tritura el material después de haberse secado; la trituración es entre uno y 6 mm o aún menos. Se realiza esto con el material ya revuelto o por separado; más tarde esta mezcla de materiales se pulveriza finamente en molinos cuyo tipo depende de las características del material empleado. Después se debe hacer un análisis cuidadoso para proporcionar el material - que esté escaso.

Parece ser que el factor más importante para la calidad de un cemento es la pulverización fina y la mezcla de los componentes debido a que el cemento en su proceso no se funde sino que se escarifica en forma incipiente. En el caso de que no se lleve a cabo una mezcla, la reacción no se verifica adecuadamente; al no difundirse la cal, la alúmina y la sílice a una temperatura que no excede de 1600°C, no llega a la fusión.

### Calcinación de la mezcla para cemento.

El único horno que dá resultado satisfactorio para esta operación, es el rotatorio de trabajo continuo.

Como combustible se usa gas natural, petróleo crudo o carbón mineral pulverizado. El "clinker" bien calcinado es negro verdoso y algo vidriado; el tamaño más apropiado es como de 1.5 cm de diámetro. Uno de los medios - para conocer el estado de calcinación del "clinker" es el color y su apariencia. Cuando le ha faltado calor tiene puntos cafés o negros o es café en su totalidad.

Teniendo condiciones medias, un horno para cemento mediano rotatorio, de 2.4 m de diámetro por 30 m de largo, produce 300 toneladas en 24 horas y uno de 2.7 m de diámetro por 45 m de largo, produce 375 en el mismo tiempo.

La eficiencia en estos hornos es extremadamente baja, razón por la que en una fábrica de cemento se procura usar el calor de escape del horno en otra parte del proceso, o bien, hacer pasar estos gases por calderas de plantas termo-eléctricas que generan energía utilizable en la misma fabricación del cemento.

El cemento cuya elaboración se ha descrito es muy rápido de fraguado. Con el propósito de lograr un tiempo de fraguado más propio, se le agrega antes de la pulverización del clinker, un retardador. El retardador usado es piedra yesera ( $\text{Ca CO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$ ) en la proporción de 2% y nunca más del 3%. El cemento regular fragua más rápido o más lento controlando la granulometría de la molienda durante su manufactura.

El tiempo de fraguado puede también variar agregando al cemento productos químicos adecuados al cemento seco o bien al cemento mezclado con agua. En cierto tipo de cemento, el tiempo de fraguado puede también aumentar o disminuir variando la cantidad de agua para la lechada.

### III. TIPOS DE CEMENTO.

#### A. Para uso industrial o para construcción.

Se manufactura el cemento Portland para este caso de acuerdo a especificaciones dadas por la Sociedad Americana para prueba de materiales (American Society for Testing Materials).

#### B. Para uso en pozos petroleros.

El amplio rango de condiciones que se encuentra en los pozos petroleros ha hecho que se desarrollen cementos con varios tiempos de espesamiento. El cemento fragua más rápido al aumentar la presión y la temperatura; el cemento debe modificarse para tener un tiempo de fraguado adecuado a la profundidad de los pozos. Todos los cementos para pozos petroleros tienen sulfato resistencia alta.

La clasificación de las diferentes clases de cemento ha sido desarrollada por el Instituto Americano del Petróleo. Los cementos para los pozos son básicamente los mismos que los usados para la construcción. La química de los cementos es algo complicada, la densidad de una lechada es de 1.4 por lo general, aunque puede ser más alta.

Los cementos clasificados de la A a la H, se usan de la superficie - hasta los 2440 m (8000 pies). Pueden utilizarse a profundidades mayores usando aceleradores y retardadores para cubrir un rango mayor de profundidades y temperaturas en el pozo.

Algunas veces se tiene una última clasificación que es la J que cubre profundidades hasta de 4880 m bajo condiciones de presión y temperatura extremadamente altas. Todos los cementos antes enunciados tienen resis-

tencia al sulfato sea ordinaria, moderada o alta según sea necesario.

### C. Cementos Especiales

Además de la anterior clasificación de cementos del API existen numerosos tipos de cementos especiales. Algunos de los más importantes son:

#### 1.- Cementos Puzolanas.

Los materiales artificiales o naturales que contienen un porcentaje suficientemente grande de sílice susceptible de combinarse con el hidróxido de calcio y formar un cemento de propiedades hidráulicas, son conocidos con el nombre de puzolanas. Las puzolanas pueden usarse como un aditivo para un cemento ordinario o preparado como combinación puzolana-cal.

Ambas clases de puzolanas natural (de origen volcánico) y el sintético están en uso. Una forma común más reciente es la ceniza muy fina (fly-ash) que es el producto de la combustión de carbón pulverizado como se obtiene en las plantas generadoras de vapor. El cemento puzolana-cal ha probado que es bueno usarse en pozos profundos.

Los cementos puzolanas incluyen todas aquellas clases de morteros hidráulicos que están hechos por la incorporación de puzolanas artificiales con cal hidratada sin calcinación posterior. El cemento puzolana, con frecuencia llamado cemento de escoria, hecho por la incorporación de la escoria del alto horno, al hidróxido de calcio, sin calcinación posterior no debe confundirse con el cemento Portland que está hecho de la pulverización de la escoria (clinker) derivada de la calcinación de una mezcla hecha íntimamente de materiales similares. Se han observado considerables variaciones en las propiedades de las puzolanas, y se requiere que sean

probados individualmente.

## 2.- Cementos Diace1.

Este nombre se le dá a cementos modificados por uno o más aditivos como Diace1 D, L W L y A de la tabla I. Tales cementos tienen un rango extenso de densidades y tiempos de espesamiento, lo que les dá un campo amplio de aplicabilidad. La arena fina (95% pasada por malla 200) se agrega algunas veces para aumentar la primera concentración de la lechada.

## 3.- Cemento Latex.

Este es un cemento muy especial compuesto de latex cemento, un agente activador de superficie y agua. Ha probado su utilidad en aplicaciones especiales como lo son trabajos de taponamiento para la exclusión de agua.

Es especialmente resistente a la contaminación con aceite y/o lodo y tiene un alto poder de unión con otros materiales (tubería, rocas, etc.)

## 4.- Cementos aceite-diesel (DOC).

Mezclas de cemento portland, aceite, diesel o querosina y un dispersante químico se han empleado con éxito en trabajos de reparación de pozos para sellar la comunicación con el estrato de agua. Este material no se fija hasta que esté en contacto con el agua y tenga en consecuencia un tiempo ilimitado de bombeo. Ha sido usado también para la prevención de pérdida de circulación.

## 5.- Cementos de emulsión de aceite en agua.

Son cementos de baja pérdida de agua, y de baja densidad, pero de -

adecuada concentración y tiempo de fraguado; se preparan con kerosina, agua, cemento y bentonita en un 2 a 4%. El lignosulfonato de calcio - se usa como agente emulsificante y retardador. Tales cementos tienen aplicación en las cementaciones primarias y de reparación.

#### 6.- Cementos de resinas.

Son la combinación apropiada de resinas sintéticas, agua y un cemento portland; son a menudo usados para proveer un aumento en la unión formación-cemento en ciertas operaciones de reparación. El costo prohíbe el uso de este material para una cementación rutinaria de las tuberías de ademe.

#### 7.- Cementos de Yeso.

Estas son mezclas especiales que tienen una concentración alta de ingredientes y tiempos de colocación fácilmente controlables. El yeso es el ingrediente básico. Su uso principal es el de proveer tapones temporales durante los trabajos de pruebas y de reparación.

La selección del cemento apropiado para un trabajo específico es un tema de conjetura. En pozos muy profundos con alta presión debe usarse una mezcla especial. En pozos superficiales con temperatura moderada se tienen varios tipos de cemento y su selección depende de las condiciones que caractericen a cada caso particular. Por experiencias en los pozos petroleros se debe tener una unión entre la tubería de ademe y el agujero.

En el espacio anular entre la tubería y el agujero se han colocado diversos materiales; se dice que los chinos usaron breá en los pozos de sal. En la industria petrolera, se ha utilizado paja, cáscara de -

nuez, cáscara de arroz, lodo espeso y una gran variedad de otros materiales. El cemento Portland ha probado ser el más eficiente, y es usado extensamente.

En la preparación de una lechada de cemento una gran cantidad de factores deben tomarse en consideración, como son tiempo de espesamiento, peso, volumen y otras propiedades de la mezcla. Todas las lechadas son afectadas por la cantidad de agua usada para hacerlas. La mínima cantidad de agua usada para hacer una lechada es aquella que la hace apenas bombeable; la máxima cantidad de agua es aquella que puede agregarse antes que la separación de la misma ocurra; esta separación afecta al producto colocado.

Entre estos dos límites se pueden seleccionar densidad de mezclas, volúmenes y tiempos de fraguado. Aunque el ratio cemento-agua se varíe no se tendrá un rango tal que sea lo suficientemente amplio para que las propiedades de la lechada puedan satisfacer las necesidades de todos los pozos; por eso, se usan otros materiales con el cemento para modificar sus propiedades.

#### 8.- Cementos de Baja Pérdida de Agua.

Se han preparado cementos que contienen aditivos especiales para reducir la pérdida de agua a una cantidad muy pequeña cuando se prueban en la filtro-prensa de lodo. El uso de estos cementos es ventajoso en algunas inyecciones de cemento, lo mismo que en una cementación de tuberías donde la pérdida de agua sea un factor importante.

El cemento normal tiene una pérdida de fluido extremadamente alta. Bajo ciertas condiciones, como lo es la alta permeabilidad de la zona productora, la presión alta, etc., el cemento normal se deshidrata y de

ja un enjarre grueso en la pared del agujero que puede pegar la tubería. Si en el pozo prevalecen estas condiciones puede usarse con una ventaja el cemento de baja pérdida de agua.

El cemento más reciente de este tipo utiliza dos aditivos especiales: El carboximetilhidroxiethylcelulosa (CMHEC), y un tipo especial de tierra diatomáceas (DE). El CMHEC se usa para controlar la pérdida de agua y retardar el tiempo de espesamiento, mientras que el DE permite el uso de porcentajes más altos de agua en el cemento para obtener mezclas fluidas de baja densidad.

#### IV. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS.

Modificación de las propiedades de la lechada con el uso de aditivos.

Peso. Se ve afectada esta propiedad al colocar la tubería en varios tipos de formaciones debido a las distintas presiones que se ejercen sobre la misma que hacen que existan pérdidas de cemento. Los aditivos que se le agregan a la lechada son ya sea para aligerar o aumentarle su peso.

Volumen y Costo. Siempre se desea obtener el mayor volumen posible de una lechada de cemento al más bajo costo. Agentes expansores o dilata-dores como son el material gelatinoso, las nuzolanas y la perlita se usan frecuentemente para este propósito.

Todos estos agentes requieren grandes cantidades de agua en la mezcla, y la resistencia del producto generalmente decrece mientras la relación cemento-agua se incrementa.

Viscosidad. Al agregar cemento y los aditivos de bajo peso al agua, la tendencia inmediata es que las partículas densas del cemento se hundan y las partículas de los agregados floten. La viscosidad es la propiedad del cemento que controla el rango de colocación de esas partículas y es un factor importante en el apropiado mantenimiento de la uniformidad de la lechada.

La viscosidad influye también en el control de pérdida de la lechada en la formación pues los fluidos viscosos no pueden penetrar fácilmente dentro de pequeñas hendiduras y fisuras.

Se cree que una lechada de viscosidad alta es un agente limpiador de cortes en el pozo pero necesita una presión alta de bombeo. Las lechadas

de una viscosidad baja tienden a mezclarse con el lodo y llegan a contaminarse. Esta es la razón por la cual el agua es bombeada antes de la lechada en algunos trabajos. Para mejores resultados, la viscosidad de una lechada de 1.88 Kg/l (15.7 lb/gal) deberá ser entre 2500 a 7000 centipoises; el cemento limpio tiene 1000 centipoises y tendrá una densidad de 3.15 Kg/l (26.3 lb/gal).

Tiempo de Fraguado. Es el tiempo en que la mezcla resulta bombeable; lo afecta la temperatura y la presión. El cemento fragua cuando ciertas reacciones químicas tienen lugar; como en muchos procesos químicos se alcanzan altas temperaturas durante la reacción. La presencia de agentes químicos en el agua de mezcla puede también afectar el tiempo de fraguado. El cloruro de sodio se encuentra algunas veces en el agua que se usa en el campo; en concentraciones arriba del 2% por peso del cemento esta sal acelera el fraguado de las mezclas; si la concentración aumenta más allá del 12%, la reducción en el tiempo de fraguado llega a ser menos pronunciada. Los aceleradores o retardadores aumentan o bajan el tiempo de fraguado de la lechada; se agregan a la mezcla o el agua. Es necesario el uso de un acelerador en pozos muy someros y de baja temperatura.

Resistencia. Se ve afectada la resistencia por la relación agua-cemento y por cualquier aditivo usado. Si se usa mayor cantidad de agua en la requerida para la hidratación completa del cemento se observa una disminución en la resistencia y la separación posible del agua de la lechada después que la misma esté ya colocada.

La bentonita y la perlita necesitan agua extra, debilitando el producto. La resistencia inicial de la lechada es importante al colocarse las sartas someras de tuberías de ademe por el deseo de disminuir el tiempo en las operaciones de perforación. Al colocar grandes columnas de tubería donde prevalecen altas temperaturas la operación se efectúa usualmente entre 12 y 24 horas.

En la práctica el efecto de sello y llenado de la mezcla de cemento - aumenta por la adición de materiales escamosos, fibrosos o granulares; es tos materiales con el cemento tienden a cerrar los espacios porosos y canales en la formación y promueven la construcción de un enjarre de pared que restringe el flujo de fluidos dentro de la formación.

Otros materiales como son el Cello-Flake, la perlita, cáscaras de nuez y la gilsonita se agregan al cemento cuando se esperan pérdidas en la formación.

Pérdidas de agua. Es el enjarre el que previene la pérdida de agua en la mayoría de los pozos mientras se realiza la operación de cementación; - se usan los raspadores para remover el enjarre de las áreas donde se necesita una buena unión entre la formación y la tubería. El filtrado de las mezclas de cemento puede introducirse a una zona productora formando una - emulsión o un bloque de agua.

La pérdida de agua reduce el volumen de la mezcla y consecuentemente se contrae. El uso de una mezcla con baja pérdida de agua tiene la ventaja de evitar la posibilidad de comunicación de los fluidos entre las diferentes zonas. Los cementos limpios tienen una pérdida de agua de 400 a 1000  $\text{cm}^3$  en 30 minutos en la prueba API.

Permeabilidad. Esta propiedad aumenta al usar aditivos inertes no porosos. La pérdida de permeabilidad del cemento limpio fraguado es muy baja; sucederá que la acción de aguas ácidas filtrará algunos componentes solubles y abran así canales a través del cemento.

Las puzolanas combinadas con cal libre son especialmente buenas para aumentar la permeabilidad; al aumento de la permeabilidad acompaña un retroceso en la resistencia a la compresión del cemento.

Densidad. Esta propiedad debe ser igual que la del lodo en el pozo en el momento de la cementación; esto minimiza las ocasiones de reventones o pérdidas de circulación en la cementación. La bentonita es el material más común usado para disminuir la densidad; sin embargo, la reducción es inicialmente debido al aumento del contenido de la mezcla por la presencia de la arcilla y el Diacel D; una tierra diatomácea especial trabaja en el mismo principio siendo de más baja densidad que la bentonita.

La perlita expandida se usa como un agente de unión para disminuir la densidad; la perlita es un material volcánico que se ha expandido por calentamiento a su punto de fusión y luego se enfría. La perlita tiene una textura celular que rompe bajo la acción de presiones altas. Se usa en la proporción de dos a seis por ciento de la bentonita.

Coffer, Reynolds y Clark propusieron el uso de pequeñas esferas de arcilla huecas (burbujas) para reducir la densidad de la mezcla. Como regla general la cantidad de un aditivo particular usado en una mezcla es del uno por ciento del cemento seco.

Las pruebas de laboratorio indican que las densidades de las mezclas tan bajas como 1.20 Kg/l (10 lb/gal) se pueden obtener manteniendo el esfuerzo satisfactorio.

Resistencia a la Corrosión. Ofrece un grado de protección a la tubería la cubierta de cemento del agua de formación que es corrosiva. En algunas áreas donde el contenido de sulfato en el agua es alto hace de la resistencia a la corrosión un factor importante en la selección del cemento, pues muchos cementos se deterioran en tales ambientes.

Este nuevo obstáculo disminuye con altas temperaturas; en consecuencia es más frecuente en pozos superficiales. Los cementos cuyo contenido

de aluminato tricálcico sea bajo son menos susceptibles a la acción del sulfato. La consideración de todos los factores anteriores muestra claramente que la selección del tipo apropiado de cemento puede ser un problema demasiado serio. Ninguna regla especial llenará todas las situaciones que se puedan presentar. En estos casos debe hacerse una conciente investigación de las propiedades de la lechada de cierta calidad de cemento que debe usarse.

La siguiente tabla es un resumen de algunas de las más comunes limitaciones de varias de las muchas mezclas que existen para la cementación.

T A B L A I  
ADITIVOS DE CEMENTO

<u>NOMBRE COMUN</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>FUNCION (ES)</u>
Gel	Bentonita	Reduce la densidad, aumenta las cualidades de suspensión (resistencia gel), reduce la pérdida de filtración, incrementa las características de perforación.
Burbujas de Ar cilla.		Reduce la densidad.
Diacel D.	Tierra especial de Diatomáceas.	Reduce la densidad.
Perlita Expandida	Mineral volcánico expandido (hecho celular por calentamiento al punto de fusión).	Reduce la densidad, actúa como un material de puente para pérdida de circulación.
Puzolanas		Reduce la densidad, incrementa las características de perforación, aumenta el tiempo de espesamiento, suministra propiedades de cementación por la combinación con cal.
Hidrocarburos	Aceite diesel, querosina.	Reduce la densidad, también usado en cementos especiales.
Barita	Ba SO <sub>4</sub>	Aumenta la densidad.
Cloruro de Calcio.	Ca Cl <sub>2</sub>	Colocación rápida, baja la temperatura de enfriamiento del agua de mezcla.
Cloruro de Sodio.	Na Cl	Acelera la colocación (reduce el tiempo de espesamiento), la temperatura de enfriamiento del agua de mezcla baja.*
Diacel A	Silicato de Sodio especial.	Colocación rápida.
Diacel L W L	Carboximetil hidroxietil celulosa.	Reduce la pérdida de filtración, retrasa la colocación.
	Lignosulfonatos de calcio.	Retardador, dispersante y emulsificador.

NOMBRE COMUNDESCRIPCIONFUNCION (ES)

Hojuelas de celo  
fán, cáscaras de  
nuez, etc.

Previene la pérdida de circula-  
ción.

\* Esto es de interés particular en trabajos superficiales de oleoductos  
en el invierno.

#### V. PRUEBAS DE LABORATORIO A QUE SE SOMETEN LOS CEMENTOS.

Todos los cementos que se manufacturan para usarse en los pozos petroleros deben llenar los requisitos señalados por el API. Las pruebas a las que se someten los cementos son:

1. Agua libre (determinación del contenido de agua de la lechada).
2. Determinación de la densidad de la lechada.
3. Pruebas de sanidad y finura.
4. Pruebas de resistencia a la compresión.
5. Pruebas de tiempo de espesamiento.
6. Pruebas de pérdida de fluido.
7. Pruebas de permeabilidad.
8. Pruebas para determinar las propiedades reológicas del cemento.
9. Pruebas para determinar la superficie específica del cemento.

Las pruebas anteriores sirven para evaluar las propiedades físicas y químicas de los cementos que se utilizan en los pozos petroleros de aceite o de gas.

## VI. ADITIVOS.

Muchas áreas tienen formaciones que tienden a tomar los fluidos de perforación o las lechadas de cemento con un leve aumento en la presión ejercida en el fondo.

La presión ejercida en un pozo durante la cementación es una combinación de la presión de la bomba necesaria para circularlo y la presión hidrostática del fluido (lodo de perforación y lechada) en el espacio anular. Debido a que muchas veces poco se puede hacer para reducir la presión de bombeo, la mayor parte de la reducción de presión debe efectuarse disminuyendo la densidad de la lechada. A su vez esto reduce la presión hidrostática ejercida por la columna de cemento.

A continuación se citan varios materiales que actúan como aditivos en cualquier tipo de lechada de cemento, así como los efectos que crean sobre ellos. Cabe señalar que con esta información y la que se tenga en el campo del pozo se puede seleccionar los componentes de la lechada que debe usarse de acuerdo a un plan que promete los mejores resultados.

### A. Bentonita (Gel).

La bentonita es el aditivo normal usado para obtener pesos de lechada entre 1.5 a 1.85 Kg/l (12.5 a 15.5 lb/gal). Puede prepararse una mezcla diferente agregando al cemento Portland una arcilla bentonítica y un agente dispersante, que es un material arcilloso formado por la alteración de rocas ígneas. Tiene la singular característica muchas veces de poder absorber su propio peso en agua, aumentando así su volumen original. La bentonita origina una disminución en el peso de la mezcla y además mejora las propiedades tixotrópicas de la lechada, asegurando mejores sellos en las fisuras, canales, etc., de la formación. Permite una mejor penetración al per

forar con la ventaja de ser más bajo el costo de operación por  $m^3$ ; los beneficios citados anteriormente son balanceados parcialmente por la disminución de la resistencia.

El uso de la bentonita como aditivo aumenta la viscosidad de la lechada. Cuando llega a usarse en cantidades mayores de un 8 a 10% por peso del cemento en la mezcla se debe incluir un dispersante para reducir la viscosidad; en este caso se recomienda usar al lignosulfonato de calcio. Si se usa menor cantidad de agua que la máxima permitida, los tiempos de espesamiento se incrementan.

En el caso especial de pozos de aceite de alta temperatura la gran mayoría de los cementos tratados con diferentes tipos de retardadores resulta más efectivo en ellos el uso de la bentonita.

El tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión de las lechadas de cemento clase E y la gelatinosidad varían por el tipo de molineta del cemento.

#### B. Aceleradores y aditivos para aumentar la resistencia.

Los aceleradores son usados para aumentar la resistencia inicial del cemento. Se usan generalmente en pozos que tienen temperaturas de fondo -- abajo de  $52^{\circ}C$  ( $125^{\circ}F$ ) y son indispensables cuando las temperaturas de fondo están abajo de  $24^{\circ}C$  ( $75^{\circ}F$ ). Los aceleradores más comúnmente usados son el cloruro de calcio y el cloruro de sodio.

La cantidad de acelerador se expresa por lo general como un porcentaje del peso del cemento. El cloruro de calcio reduce la viscosidad de la lechada porque actúa como dispersante. El cloruro de sodio se usa como aditivo en el cemento o en el agua de mezcla, usando de dos a cuatro por cien

to de cloruro de sodio sobre la base de cemento ofrece el máximo efecto de aceleración en el tiempo de espesamiento de los cementos API clases A, B o C. En muchos casos esta cantidad aumenta la resistencia a las 24 horas.

El efecto del cloruro de calcio varía con cada clase API de cemento y la molienda del mismo. El cloruro de calcio es mejor acelerador que el cloruro de sodio; pero este es tres veces más barato que el cloruro de calcio.

Las partículas de celofán permanecen suspendidas en la lechada; puesto que es no absorbente no contribuye a un rápido fraguado. Usado en cantidades de 114 a 454 gramos (1/4 a 1 libra) por saco de cemento, puede agregarse a la tolva durante el mezclado con el volumen de cemento total.

Las cáscaras de nuez vienen empacadas en tres grados: Grueso, mediano y fino. Los tamaños mediano y grueso son los usados en las lechadas de cemento para suspender la pérdida por circulación dependiendo del tamaño de las aberturas que tengan que ser selladas. La mejor forma de determinar esto es por experiencia de campo. Cuando más de 1800 granos (cuatro libras) de cáscaras gruesas de nuez se agregan al cemento se usa un cuatro por ciento de gelatina para ayudar a conservarlas en suspensión.

Las cáscaras de nuez pueden ser agregadas en la tolva durante el mezclado con el volumen del cemento.

Todos estos materiales antes mencionados restauran o evitan la pérdida de circulación. Muchos materiales fibrosos usados en los fluidos de circulación para este propósito no son satisfactorios para la preparación de cemento fluido ya que son perjudiciales al fraguado del cemento.

### C. Descontaminantes.

Cuando se está bombeando el cemento en el pozo, inicialmente la lechada no desplaza por completo el lodo de perforación del espacio anular y --  
 tiende a canalizarse. De esta forma, el lodo y el cemento llegan a entre-  
 mezclarse. Esto no sólo altera la lechada y da origen a un radio cemento-  
 agua alto, sino que la lechada puede contaminarse con los productos quími-  
 cos orgánicos que se utilizan en el fluido de perforación. Ambos factores  
 afectan el tiempo de espesamiento de la lechada y reduce la resistencia -  
 del producto colocado. Entre los productos químicos usados en el lodo de -  
 perforación que afectan el cemento están los agentes dispersantes y los -  
 agentes de pérdida de agua. Entre los primeros se encuentran los taninos -  
 (quebracho), materiales ligníticos, lignosulfatos o fosfatos complejos.

Los coloides orgánicos se usan ampliamente en lodos de perforación pa-  
 ra aumentar el poder sellante; el almidón es el más usado y en orden decre-  
 ciente se tiene la carboximetilcelulosa de sodio. Las gomas naturales y -  
 los polímeros sintéticos se usan de igual forma para este propósito.

La gran mayoría de estos productos químicos solos o combinados, tienen  
 un efecto errático en el tiempo de espesamiento de las lechadas y pueden -  
 producir un debilitamiento extremo del producto colocado o aún evitar el -  
 fraguado completamente.

Para aislar el horizonte productor de aceite o gas de zonas de agua -  
 vecinas debe usarse lechada con máximas propiedades sellantes. Bajo condi-  
 ciones normales el cemento limpio es mejor en muchas ocasiones para cemen-  
 taciones primarias o forzadas en una sección húmeda. Desafortunadamente -  
 otras características de la lechada reducen su habilidad de aislamiento del  
 aceite de zonas de agua de alta presión.

El cemento limpio contaminado con agua ácida cuando se perfora con pistola puede destrosarse, su permeabilidad aumenta mientras el hidróxido de calcio se filtra fuera.

Los canales de flujo resultantes hacen fácil el acceso del agua a la zona productora. Estas características indeseables se reducen al usar el cemento latex.

Las mezclas con latex tienen una baja pérdida de agua y tienden a resistir la contaminación por fluidos del pozo. El cemento con latex tiene un tiempo de espesamiento lo suficientemente amplio para permitir su empleo en pozos profundos. La resistencia a la compresión es buena aún en bajas temperaturas. Los aceleradores pueden usarse para aumentar la resistencia desarrollada en mezclas del latex.

El problema de la contaminación se ha reconocido por muchos años y se han hecho investigaciones para determinar los efectos de los lodos tratados con productos químicos en el cemento. Los resultados de estos estudios indican que los lodos tratados químicamente son dañinos al cemento, y puede decirse que la contaminación por esos lodos pueden ser la causa de los fracasos en las cementaciones, sumándoles los efectos de debilitamiento que tiene el lodo mezclado con la lechada. El carbón activado puede usarse en el cemento para contrarrestar los efectos de la contaminación de los lodos que contengan productos químicos.

Morgan y Dumbauld investigaron el uso del carbón activado con el cemento para contra-atacar la contaminación. En esta investigación determinaron los efectos en las propiedades físicas del cemento de varias proporciones de lodo contaminante. Posteriormente demostraron como estos efectos, pueden reducirse con la adición de carbón activado. El cemento que se ha empleado con carbón activado en el campo para cementar pozos de aceite ha

sido usado con resultados muy satisfactorios.

Una teoría unida al uso de las resinas en el cemento es que el agua de filtración de la mezcla puede hacer un cemento. Con esto en mente, una resina sintética se entremezcla con el agua que se va a emplear con la lechada y el tipo que se desea de cemento portland. La base agua-resina de esta mezcla, podrá por sí misma constituir una masa dura firme independientemente completamente de los sólidos del cemento. Los aditivos cemento-resinas pueden utilizarse, para taponamientos y para cementar tuberías.

Además de los aceleradores, se usan otros aditivos para aumentar la resistencia del cemento. A temperaturas arriba de 60°C (140°F) aproximadamente el cemento limpio y algunas combinaciones de cemento con aditivos su fren un retroceso en la resistencia. Este debilitamiento generalmente llega a ser más severo al aumentar la temperatura y con el paso del tiempo.

Los aditivos como el fluor silícico y las puzolanas reducen esta tendencia, y a menudo la eliminan completamente. Cuando altos porcentajes de gelatina y/o puzolanas se usan con el cemento, es prudente incluir un acti vador de resistencia en la mezcla. El metasilicato de sodio es altamente efectivo para este propósito.

#### D. Retardadores.

La temperatura del pozo aumenta con la profundidad. Al aumentar la temperatura el cemento fragua más pronto. Para contar con el tiempo necesario para colocar el cemento en pozos profundos con temperaturas altas, se agregan algunas veces, unos aditivos para retrasar el tiempo de fraguado.

Un material comúnmente usado para este propósito es el lignosulfonato de calcio; es un producto químico que se remueve de la madera durante el proceso de la pulpa de papel.

Los retardadores de lignosulfonato de calcio son muy efectivos en cementos de las clases A, B y C; pero no con los cementos clase E. El CMHEC es un producto de celulosa; puede usarse como un retardador con todas las clases de cemento API y es también efectivo en la reducción de pérdida de agua de la lechada. El lignosulfonato de calcio reduce también la viscosidad de la mezcla, de tal manera que es útil en mezclas con altos porcentajes de gelatina. En cualquier sistema de cemento al que se le agregue lignosulfonato de calcio, debe hacerse una prueba de tiempo de espesamiento a los materiales que se van a usar en la mezcla a menos que la información necesaria ya se tenga. Otros retardadores comúnmente usados incluyen almidón, bórax y sacarosa.

Muchos de los cementos para pozos petroleros fabricados para la cementación de pozos profundos contienen retardadores de fraguado. La mayoría de estos compuestos orgánicos son de naturaleza compleja como los lignitos, almidones, etc. Algunos se adaptan para mezclarse con el cemento en la fábrica.

De este modo el cemento puede retardarse en el fraguado cuando se necesitan condiciones específicas en el pozo. Estas condiciones pueden variar de pozos de 1200 m (6000 pies) de profundidad o más, con temperaturas de fondo de más de 177°C (350°F).

#### E. Puzolanas.

El cemento puzolánico se ha usado desde el tiempo de los griegos, romanos y aztecas. Una fuente de este poderoso material silíceo se localiza en Pozzuoli, Italia de donde la palabra puzolana se deriva. Se definen las puzolanas como un material silíceo finamente dividido que usualmente no poseen propiedades cementantes en ellos pero que mezclados con cal y agua a temperaturas normales, forman un producto que tiene valor cementante. La

reacción puzolánica se lleva a cabo por la combinación del material silíceo con la cal libre. El resultado de las mezclas cemento-puzolana es más durable.

Las ventajas de una puzolana natural en la cementación de un pozo de aceite son: reducción de la pérdida de agua, aumenta el tiempo de bombeabilidad con el cemento de construcción, reduce la contaminación del fodo, baja la temperatura de la hidratación, aumenta la resistencia al ataque del sulfato, menor permeabilidad, aumenta la resistencia gelatina-cemento y aumenta la resistencia a las altas temperaturas. Las mezclas de cemento puzolana proveen también reducciones en la densidad y en la viscosidad. La tierra diatomácea es un material similar a las puzolanas y se usa para aumentar el volumen de la lechada. Su ventaja principal es que permite el uso de agua adicional; con esto se reduce el costo y densidad de la lechada.

#### F. Perlita.

En su forma natural es una roca vidriosa formada por el enfriamiento rápido de un material volcánico. Tiene un lustre perlino, la estructura es feroidal y contiene agua en cantidades de uno a seis por ciento.

El procesamiento de la ganga para hacer perlita expandida incluye la compresión y la introducción dentro de un horno a una alta temperatura.

En el horno, el agua que contiene la roca se convierte en vapor y forma burbujas en la masa blanda. En el enfriamiento, la roca se rompe en pequeñas esferas y fragmentos. El material terminado que pesa entre 128 y 240 Kg/m<sup>3</sup> (8 y 15 lb/pie<sup>3</sup>) se gradúa, empaqueta y se selecciona bajo varios nombres de fábrica.

Cuando la perlita se agrega a una mezcla, requiere el uso de agua adicional. Algo de esta agua es necesaria para cubrir las caras internas de las esferas, que llegan a comprimirse a baja presión. El agua adicional, por supuesto, aumenta el volumen de la mezcla por saco de cemento, mientras baja la densidad de la misma.

La baja densidad de la perlita es también un factor en la reducción de la densidad de la lechada. La perlita es químicamente inerte, no produce efecto nocivo alguno al cemento. Las partículas granulares de la perlita proveen un efecto de puente o sello que reduce la pérdida de lechada a la formación. Las partículas tienen una cantidad grande de espacio en los poros que absorben agua bajo las condiciones del pozo y causa una reducción del peso de la lechada de cemento. La adición del 2% al 6% de bentonita en el cemento reduce grandemente la flotación de la perlita y produce un cemento fluido en el cual la perlita permanece en dispersión durante toda la cementación. Esto produce más volumen por saco de cemento.

La densidad de este tipo de cemento puede bajar hasta 1.44 Kg/l (12 lb/gal). Este tipo de cemento fragua con menos resistencia que el cemento solo. Por lo tanto, da mejores características para perforar las tuberías, mejor penetración y menos resquebrajamiento del cemento. La perlita tiene como otra ventaja más, al ser usada como aditivo, permitir la colocación de altas columnas de cemento con presión hidrostática moderada.

Las desventajas de las mezclas de perlita son:

1. Su costo adicional.
2. Posibilidad de creación de puentes.
3. El aumento en la pérdida de agua.
4. Resistencia en el producto colocado.

Un agregado que es ampliamente usado en los campos petroleros es una

mezcla que se hace de la perlita expandida con la perlita no expandida. Esta mezcla requiere 80 litros de agua por cada 100 litros de material usado. La perlita expandida es un aditivo de peso extremadamente liviano.

#### 6. Arena.

Esta mezcla con cemento da como resultado un producto más duro del que puede obtenerse con el cemento solo. Esto resulta benéfico cuando se coloca un tapón en el fondo del pozo como una base para desviar el agujero. Se usa además como un aditivo para aumentar el peso de la lechada y actúa como puente para reducir las pérdidas en la formación. La cantidad de arena por saco de cemento que se usa es de 20% en peso. El producto resultante de la unión arena-cemento colocado es más duro que el cemento limpio.

#### II. Materiales pesados.

Muchas veces son necesarias mezclas más pesadas que las que se obtienen con cemento limpio para prevenir un reventón cuando se está corriendo la tubería en pozos profundos que se perforan a través de zonas de alta presión, o cuando se están colocando tapones. El cemento debe ser siempre conservado por lo menos tan pesado como el lodo de perforación para prevenir que la lechada salga de su lugar. Los aditivos más usuales para aumentar el peso de la mezcla son el sulfato de bario (barita) y la arsenoferrita de hierro; pero son también usados la ilmenita, óxido de hierro y otros materiales. La barita puede usarse en concentraciones arriba de 100 Kg (222 lb) por saco de cemento, dando una densidad de la lechada de 2.4.

La arsenoferrita de hierro puede usarse en concentraciones de 98 Kg (217 lb) por saco de cemento, con una densidad de la lechada de 2.67 kg/litro (22.2 lb/galón). Para un peso dado de cemento, la arsenoferrita de hi

rro produce un producto con una resistencia mayor que la que tiene la mortaja con el sulfato de bario. La filenita da una resistencia mayor que la que proporcionan los aditivos antes mencionados y prolonga el tiempo de espesamiento.

#### I. Gilsonita.

Es uno de los más recientes aditivos de cemento introducidos. Es un hidrocarburo sólido que se presenta en forma natural; éste es extraído y después cribado.

Primero la gilsonita fué usada para bajar el peso de la lechada por su baja densidad específica y su bajo requerimiento de agua comparado con otros aditivos de peso ligero.

Su capacidad de sello es tan bueno que su uso ha crecido rápidamente. La gilsonita tiene varias desventajas como es la formación de puentes indeseables.

#### J. Materiales de pérdida de circulación.

Estos materiales son el celofán y la cáscara de nuez agregados a la perlita, arena y gilsonita. El celofán se utiliza cortado en pedacitos de 0.02 m de espesor, de 6 mm a 25 mm de ancho.

Siendo químicamente inerte, el celofán no afecta las propiedades de las lechadas de cemento, ni es afectado por altas presiones y temperaturas.

## VII. SISTEMAS ESPECIALES DE CEMENTACION

En muchas áreas existe la necesidad de una mezcla que satisfaga condiciones especiales más allá de los tipos de cemento y aditivos populares. Para tener estas condiciones, varios cementos especiales han sido manufacturados y son lo suficientemente buenos para trabajos en un rango amplio de condiciones del pozo. Como ejemplo de estos sistemas especiales se tienen: el HYS-400, el Visqueez (cemento diesel-aceite), el cemento cal y el Termoset.

El HYS-400 es una combinación de cemento, gelatina y Diamix-A, con un activador para elevar la reacción puzolánica. Esta mezcla es de gran utilidad y responde a la demanda de bajo costo, tiene un tiempo de espesamiento adecuado que permite su colocación en pozos profundos y la resistencia suficiente para la protección que es necesaria en el fondo del agujero.

El cemento diesel-aceite es una mezcla de baja fricción en la cual cada partícula de cemento se protege con una película. Este método permite la introducción de cemento seco a la zona de producción de agua porque las películas de protección previenen la hidratación del cemento. Después que el Visqueez ha sido completamente desplazado dentro de la formación, una acción dilatadora química libera la película de protección de cada partícula permitiendo que el cemento se hidrate. El Visqueez es el cemento más efectivo para desalojar el agua de pozos productores de gas y aceite.

Al cemento de cal se le ha encontrado un uso especial en los campos de aceite. Es un cemento de rápida colocación que se usa en cantidades comparativamente bajas. Se usa este tipo de cemento en combinación con el cemento portland para aumentar el tiempo de bombeo. Estas mezclas son generalmente combinadas y puestas en su lugar con un camión convencional de bombeo.

El Termoset por su parte es un material de cementación de alta temperatura compuesto de una puzolana (Diamix-A) y una caliza. En los primeros tiempos el Termoset tenía menos resistencia que el cemento portland, pero su resistencia aumenta con temperaturas de fondo del pozo superiores a 60°C (140°F). Si bien la resistencia inicial para la perforación se considera de primordial importancia, la última resistencia debe también considerarse.

En pozos profundos con alta temperatura el cemento limpio portland aguantaba un retroceso en resistencia mientras la temperatura aumenta y el tiempo pasa. Bajo las condiciones de pozos profundos, la reacción entre puzolanas y la caliza le da al Termoset una resistencia final que es mejor que aquella que tiene el cemento portland limpio. Por la alta actividad puzolánica del Diamix-A, el Termoset no requiere un activador. En pozos con temperaturas de fondo sobre 77°C (170°F), un uno por ciento de retardador por peso de Diamix-A se agrega a la mezcla. Como resultado el tiempo de espesamiento y la resistencia inicial desarrollada por el Termoset se retrasa; pero después de varios días la resistencia de los materiales del retardador excede grandemente al del Termoset limpio. La gelatina puede usarse en el Termoset en cantidades arriba del 8 % por peso de Diamix-A para beneficio de la mezcla y la barita u otros materiales pesados pueden emplearse para hacer mayor el peso de la lechada.

### VIII. ADITIVOS ESPECIALES

Los radioelementos trazadores se agregan algunas veces a la parte inicial del cemento fluido que entra al pozo de modo que la parte superior de la columna de cemento quede adyacente a las formaciones salinas. El agua dulce en los cementos fluidos tiende a disolver la sal de la formación con la cual está en contacto. Las lechadas de cemento preparadas con agua salada sobresaturada dan una unión excelente en formaciones salinas; eliminan cualquier posibilidad de canales entre el cemento fraguado y el pozo en estas zonas.

No debe usarse agua salada en cementos que contienen otras sustancias químicas o aditivos sin experimentar primero sus efectos. Es bueno saber qué efecto tendrán los aditivos en un cemento que se usará, ya sea en el tiempo para que el cemento retenga sus fluidos o en la resistencia del cemento después de fraguar.

## IX. MEZCLA DE CEMENTOS CON ADITIVOS.

### Cálculo del peso y volumen de la mezcla.

Como se usan una variedad amplia de lechadas en la cementación de pozos petroleros, es necesaria la determinación del peso de la mezcla, volumen y las necesidades de agua para la lechada. El método de volumen absoluto llena todas las condiciones, provee una forma rápida y aproximada para determinar esos valores para cualquier combinación de aditivos y cementos.

El término de volumen absoluto se refiere el volumen actual ocupado por cualquier material. El espacio vacío entre las partículas de cemento no contribuye al aumento del volumen de la lechada; no se incluye éste cuando se determina la contribución al volumen total, del cemento en la lechada. Cada material, ya sea cemento o aditivo tiene un cierto volumen absoluto que puede calcularse o medirse.

La utilidad total de una lechada es igual al volumen absoluto de los materiales secos, por el volumen del agua usada para la lechada. Usando el método de volumen absoluto, la cantidad de cada aditivo que se incluye en la mezcla de los componentes que se usan en la lechada puede expresarse en dos formas más comunes:

1. Como un porcentaje del peso del cemento.
2. Como una relación del volumen

Expresados como un porcentaje del peso, la cantidad de aditivos para cada saco de cemento de 42.6 Kg (94\* libras) puede calcularse fácilmente.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

En el segundo caso la cantidad de aditivo se da como una relación de cemento a un aditivo por un volumen que usualmente es el del bulto de cemento.\*

Se observa que todas estas formas de expresar la cantidad de aditivo referido a materiales secos se usa ocasionalmente. En la designación de la cantidad de materiales que se usarán en la confección de la lechada, el primer dato es el cemento.

La densidad de la mezcla de cualquier sistema aditivo-cemento puede obtenerse dividiendo el peso total entre el volumen total. Para determinar - cuanto kilogramos de cada uno de los materiales secos son necesarios para - un trabajo determinado debe calcularse primero la cantidad de lechada. La - cantidad total de lechada necesaria, cuando se divide entre la contribución unitaria de la lechada, dá el número de unidades de cada componente necesarias.

Por las proporciones tan pequeñas en que se usan los aditivos como el cloruro de calcio, partículas de celofán y el lignosulfonato de calcio, no tienen un efecto apreciable en la producción y en la densidad de la lechada.

\* Deberá de considerarse que la unidad usual de campo es un saco de cemento igual a 50 kg. por lo tanto los datos de tablas comunmente usadas, deberán de corregirse a la unidad mencionada.

## X. CEMENTACIONES.

### A. Cementación primaria.

La cementación en un pozo petrolero consiste en colocar lechada de cemento entre el agujero y la tubería de ademe.

En una cementación resulta extremadamente difícil el realizar un procedimiento analítico de diseño, ya que intervienen diversos factores. Por otra parte, las propiedades reológicas de la lechada de cemento intervienen de igual manera en los cálculos, siendo necesario el conocer su comportamiento cuando se le adicionan en forma variable aditivos de tipos diferentes. El que se agreguen aditivos a la lechada puede dar como resultado que esta se comporte en forma indeseable, ya sea reduciendo la viscosidad o bien afectando el tiempo de fraguado.

En conclusión, se puede decir que un diseño que incluya todas las consideraciones hace necesario el uso de aparatos electrónicos para efectuarlo en un tiempo razonable. Por la importancia que tiene la adherencia del cemento a la tubería, ha sido necesario hacer un estudio de los factores - que influyen esta propiedad de unión.

Uno de estos factores es el acabado externo de la tubería. Los resultados de laboratorio señalan que al meter un factor de rugosidad, la adherencia del cemento aumenta notablemente en la interface cemento-tubería. La presión y la temperatura pueden cambiar las características de adherencia del cemento a la tubería. La presión en el interior de la tubería - cuando el cemento está en un estado semi-fluido no afecta mucho las propiedades de adherencia, pero ésta se reduce cuando existe presión en la tubería durante el fraguado del cemento, ya que, al descargar esta presión la tubería sufre la contracción a su diámetro normal.

Se complica este problema si la temperatura aumenta en el tiempo de fraguado del cemento y se enfría a la temperatura de la formación después del fraguado del mismo. La adherencia del cemento mejora cuando el espacio anular se presiona durante el fraguado del cemento.

Se idearon métodos diferentes para la colocación del cemento en el pozo. Un método primitivo era el de bajar el cemento en cubetas, especialmente construidas, y que se vaciaban al llegar al fondo. Los métodos siguientes hicieron uso de tuberías auxiliares por donde se bombeaba el cemento al fondo del pozo. En los modernos métodos el cemento se bombea directamente a través de la tubería de ademe a cementar. Una gran variedad de diferentes implementos diseñados para facilitar las operaciones de cementación se pueden obtener con los fabricantes de equipo y con las organizaciones de servicio que se especializan en esta clase de trabajo.

Se puede enumerar parte de ese equipo que facilita la cementación - como son: los tapones para cementación, zapatas y collares, canastas cementadoras, centradores, raspadores, cabezas para cementación, etc.

Con frecuencia se usan varias toneladas de cemento en una sola operación; el equipo suministrado para mezclar el cemento que se va a utilizar debe ser capaz de desempeñar su cometido, rápida y completamente y con proporciones exactas de agua y cemento. Se usan muchos tipos de equipo para mezclar cemento. Las operaciones de cementación son generalmente encomendadas a personas entrenadas y con el equipo adecuado se hacen cargo de la ejecución correcta de la cementación.

Mucho antes de intentar una operación de cementación en un pozo, el trabajo se debe planear cuidadosamente para tener seguridad de poder llegar a terminarla con muy buen resultado. El diámetro de la tubería de -

ademe que se va a cementar habrá sido fijado en el programa de perforación ya establecido. La columna de cemento debe fijarse y calcular la cantidad de cemento necesario.

Son motivo de interés las condiciones del fondo y de las paredes del pozo.

Es conveniente, cuando se planean operaciones de cementación, tener presente ciertas constantes que expresan las relaciones entre los pesos y los volúmenes de las mezclas de cemento y tener a la mano un programa de cómputo que simplifique el trabajo de calcular los volúmenes que se van a utilizar. La temperatura máxima a la que se sujetará el cemento antes de que frague es un poco menor que la indicada por el gradiente geotérmico. La temperatura del cemento durante su colocación no deberá exceder a la temperatura normal del fondo con circulación. Esta temperatura puede aproximadamente estimarse con la siguiente fórmula:

$$\text{Temperatura máxima de la lechada} = \text{Temperatura del canal de lodo} + \frac{\text{Profundidad del pozo}}{\text{Gradiente térmico de circulación}}$$

Las condiciones de las paredes del pozo, y la deflexión del mismo de la vertical, recibirán cuidadosa atención al planear las operaciones de cementación. El ingeniero a cargo de una operación de cementación, debe prestar cuidadosa atención al equipo superficial, y a los elementos con que cuenta para asegurarse de que son capaces de desarrollar el trabajo que se les asigne. El trabajo debe ejecutarse con precisión y la coordinación de cada una de sus fases debe planearse cuidadosamente.

Para efectuar un trabajo óptimo de cementación, la tubería de reves

timiento deberá de ser introducida al pozo de una manera eficaz (vigilar la velocidad de introducción, circulación a etapas conveniente), ya en el fondo llevar a cabo la limpieza de las paredes del agujero del enjarre de lodo y homogeneización del lodo hasta dejarlo en condiciones óptimas.

Una vez alcanzada la profundidad a la que se llevará a cabo la cementación, se procede a efectuar la última etapa de circulación, imprimiéndole simultáneamente a la tubería un movimiento vertical alternado, con el propósito de que los rapadores se pongan a trabajar. Esta operación durará lo suficiente para que el lodo quede limpio de residuos desprendidos de la pared del agujero. Después de homogeneizada la columna de fluido, se mete el primer tapón de desplazamiento, colocando a continuación una solución de lavado, comúnmente denominada dispersante de arcillas; su función es lavar las paredes del espacio anular.

El diseño de la cementación debe permitir obtener:

- a) Un desplazamiento efectivo del lodo de perforación en el espacio anular.
- b) Una caída mínima de presión durante el desplazamiento de la lechada.

La lechada de cemento también se utiliza en las llamadas cementaciones forzadas y en la colocación de tapones por desplazamiento.

#### B Cementaciones forzadas.

La cementación forzada, es un método por medio del cual una lechada de cemento es obligada bajo presión a colocarse a una profundidad establecida en el pozo. La cementación forzada puede ser ejecutada durante las

operaciones de perforación y terminación o en fechas posteriores durante un programa de reacondicionamiento. La cementación forzada es el tipo más común de cementación de reparación de las cementaciones primarias. El proceso de esta cementación incluye la aplicación de una presión hidráulica para comprimir la lechada de cemento sobre los espacios porosos de una formación, ya sea en agujero abierto o a través de perforaciones en la tubería de ademe o en la tubería corta.

Las cementaciones forzadas funcionarán con uno o más de los siguientes objetivos:

1. Reparación de una cementación primaria defectuosa.
2. Reducción de la relación gas-aceite, agua-aceite o agua-gas.
3. Reparación de tubería de ademe defectuosa o de perforaciones impropia-mente colocadas.
4. Disminución del daño de pérdida de circulación en agujero abierto - - mientras se perfora a mayor profundidad.
5. Abandono permanente de una zona improductiva o agotada.
6. Aislamiento de una zona antes de perforarla para producción o fractura.
7. Suministro a una tubería de ademe o corta, de una cementación primaria suplementaria donde el aislamiento deseado no ha sido alcanzado.

Las cementaciones forzadas pueden dividirse en dos tipos generales, - la cementación forzada de alta presión donde la formación se fractura para que "absorba" el cemento y la cementación forzada de baja presión donde el cemento se coloca contiguo a la formación sin fracturamiento.

Las zonas de baja presión que contienen aceite, gas o fluidos de perforación pueden usualmente sellarse por medio de las cementaciones forzadas; estas zonas se podrían llamar zonas ladronas. Las arenas con agua -

pueden obturarse a distancia abajo de la arena productora para ayudar a reducir los radios agua-aceite. Las zonas de agua independientes pueden taparse para eliminar la entrada del agua.

a) Cementación forzada a alta presión.

Puede efectuarse con un desplazamiento continuo del cemento, con baches de cemento, o con desplazamiento intermitente del cemento. El desplazamiento continuo de un cemento consiste en abatir la formación con fluido depresionado y desplazar el cemento a un ritmo continuo hasta que la presión de cementación forzada se alcance. En la cementación por baches, la presión no se alcanza en el primer desplazamiento de cemento; el cemento se desplaza, el empacador se desancla y cerca de seis horas después se bombea el siguiente bache de cemento. En el caso de la cementación forzada intermitente el desplazamiento se sostiene en pocos minutos y permite la deshidratación del cemento; en este caso, se pretende cerrar mediante puentes de cemento los agujeros de la formación. Los tiempos de fraguado son siempre menores para un material dado, cuando, la cementación forzada se compara a la cementación primaria. La pieza que se considera clave del equipo para una cementación forzada es el empacador que puede ser recuperable o fijo. El más común es el empacador recuperable; se puede remover del agujero después de la cementación.

La cementación forzada a alta presión impone una presión atrás de la tubería de ademe que si es en exceso de la resistencia al colapso, debe forzosamente aplicarse presión en el espacio anular arriba del empacador.

La cantidad de presión que debe aplicarse se calculará por:

$$P_B = P_s - P_c + 0.052 (W_c - W_m)$$

Donde:

$P_B$  = presión de balance en el espacio anular.

$P_s$  = presión de cementación forzada.

$P_c$  = presión disponible de colapso de la T.R.

$0.052 D (W_c - W_m)$  = presión diferencial impuesta por el cemento.

b. Cementación forzada a baja presión.

En esta operación no se fractura la formación. Un volumen muy pequeño de cemento se mezcla y se desplaza. En principio, este tipo de cementación corrige el problema existente sellando las fracturas y canales de comunicación sin llegar a crear nuevos que también deben sellarse.

La técnica de cementación forzada a baja presión se usa desde hace ya varios años.

Donde se localizan enjarre y poros obturados con el lodo de perforación se lava el pozo con productos químicos a lo largo de todas las perforaciones para abrirlas antes de que se realice la operación de cementación lo que da como resultado una mejor cementación de reparación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la industria petrolera se ha visto la importancia que tienen todas y cada una de las operaciones que se realizan en los pozos petroleros.

Se debe puntualizar que cada uno de los elementos que son usados durante la perforación y la producción de los pozos debe estar en las mejores condiciones, así mismo cabe citar que tanto los lodos de perforación, cementos y aditivos deben ser los adecuados para cada uno de los problemas que se presenten.

En el caso particular de los cementos y aditivos que en este trabajo se han descrito se debe observar con detalle cual es el mejor de ambos o la combinación de los mismos para cada problema que se presente.

Hay que notar que los costos en todas las operaciones son muy altos y debe ser labor del ingeniero el realizarlos lo mejor posible y con los menores costos de operación. Además que los resultados sean los programados para evitar el realizar operaciones secundarias que darán mayores costos - innecesarios.

Debe tomarse conciencia de que los trabajos que se realicen en la industria petrolera son de vital importancia y deberán realizarse con todo cuidado.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Parker, P., C. Clement y R. Beirute, "Basic Cementing", 1977.
- 2.- Wolhmuth, H. Alfredo, "Materiales no-metálicos", 1977.
- 3.- Fundamentos de Perforación, Tomo I. Universidad de Texas, 1961.
- 4.- Apuntes de "Problemas Prácticos de Ingeniería Petrolera", Ing. Eduardo Cervera del Castillo.
- 5.- Seminario Internacional de Control de Calidad del cemento, concreto y técnicas de la Construcción, Holderbank, 1981.
- 6.- Norma de especificaciones para cementos de pozos petroleros, "API - Standar 10 A", 1982.
- 7.- Norma de pruebas a cementos de pozos petroleros, "API RP 10 B", 1982.
- 8.- Norma: ASTM C-150 para pruebas a cementos, 1980.
- 9.- Norma: ASTM C-204 para pruebas de finura de cemento por el método de permeabilidad al aire, 1979.
- 10.- DGN. C. 1-1981 Norma oficial de calidad para cemento Portland.
- 11.- DGN. C. 56-1980 Norma oficial de método de prueba para determinar la finura de los cementantes hidráulicos.

- 12.- DGN. C. 62-1981 Norma oficial de método de prueba para determinar la sanidad de los cementantes hidráulicos.
- 13.- DGN. C. 57-1980 Norma oficial de método de prueba para determinar la consistencia normal de cementantes hidráulicos.