

7
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**EL CEMENTO Y SU CONTROL DE
CALIDAD**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
JAIME BLANCO GALAN**



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-092

SR. JAIME BLANCO GALAN
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. en I. José Martínez Pérez, y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

EL CEMENTO Y SU CONTROL DE CALIDAD

	RESUMEN
	INTRODUCCION
	GENERALIDADES
I	FABRICACION DEL CEMENTO
II	CARACTERIZACION DEL CEMENTO
III	ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO
IV	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
V	BIBLIOGRAFIA

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 9 de diciembre de 1996
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVÉÑMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

“ EL CEMENTO Y SU CONTROL DE CALIDAD ”

REALIZADA POR:

JAIME BLANCO GALAN

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. JOSE MARTINEZ PEREZ

DIRECTOR ADJUNTO:

ING. YURI DE ANTUÑANO MUÑOZ

JURADO:

PRESIDENTE:

QUIM. ROSA DE JESUS HERNANDEZ ALVAREZ

VOCAL:

M. I. JOSE MARTINEZ PEREZ

SECRETARIO:

ING. JUAN ANTONIO MORALES DIAZ DE VIVAR

1ER. SPTE:

ING. JUAN DE LA CRUZ CLAVEL LOPEZ

2DO. SPTE:

M. I. NESTOR MARTINEZ ROMERO

INVITADO ESPECIAL ING. YURI DE ANTUÑANO MUÑOZ

Ciudad Universitaria, México D. F., marzo de 1997.

A mis padres:
Por el apoyo que siempre me brindaron
y con el cual he logrado terminar
mi Carrera Profesional, que es para mí
la mejor de las herencias.

A mi pareja:
Por todo lo que me ha dado,
y sobre todo por la confianza
que me ha transmitido
día con día con tan solo
haber creído en mí.

A mis bebés:
Por ser una fuente de inspiración en mi vida,
gracias a la cual procuro ser mejor cada día
y a quienes dedico todos mis logros.

A mis hermanos y demás familiares:
Espero que les sirva de motivación y ejemplo
para que se superen en todos los aspectos...
¡Si se puede!

A mis amigos:
Tomas C. B., María de Jesús C. L., Carlos F. M. y Eva S. O.
Por ser personas sinceras y sensibles
con las cuales me he forjado en el estudio y trabajo.

**A nuestra alma máter:
La Universidad.
Por ser el crisol de nuestras
ilusiones y esperanzas.**

**A la Facultad de Ingeniería:
Por contribuir en sus aulas
a que nuestro país sea mejor,
más armonioso, próspero,
productivo y humano.**

**Mi agradecimiento:
Al Ing. Yuri de Antuñano Muñoz
por su invaluable y desinteresada
ayuda para la realización de este trabajo.**

**Mi especial agradecimiento:
A todo el personal de la
Línea de Optimización de la Explotación de Pozos
perteneciente a la Gerencia de Ingeniería de Producción
del Instituto Mexicano del Petróleo
por su gran apoyo
y por las facilidades prestadas.**

CONTENIDO

	Página
Resumen	1
Introducción	3
1. Generalidades	5
1.1 Definición del Cemento	5
1.2 Historia del Cemento	6
1.3 Tipos de Cemento	8
1.4 Clasificación API de los Cementos y su Equivalente ASTM	9
1.5 Cementos Especiales	13
2. Fabricación del Cemento	18
2.1 Materias Primas	18
2.2 Procesos de Fabricación	21
2.3 Reacciones en el Horno	30
3. Caracterización del Cemento	33
3.1 Química del Cemento	33
3.2 Características Cristalográficas	38
3.3 Propiedades Físicas	41
3.4 Resultados de Pruebas Realizadas en Laboratorio	50

4. Especificaciones del Cemento	52
4.1 Comportamiento de las Estructuras Cristalinas	52
4.2 Problemas Presentes en las Estructuras Cristalinas	57
4.3 Límites Requeridos en Estructuras Cristalinas	60
4.4 Especificaciones Físicas y Químicas	61
5. Conclusiones y Recomendaciones	65
Bibliografía	68

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una revisión actualizada de los aspectos relacionados con el control de la calidad del cemento utilizado en la cementación y recementación de tuberías de revestimiento, en el que influye fundamentalmente su fabricación para cumplir con las especificaciones requeridas por las operaciones de cementación. Para llevar a cabo esto, fue necesario incluir los conceptos fundamentales para la fabricación del cemento, sus propiedades químicas, físicas y las consecuencias en los cambios de la estructura cristalográfica, así como, investigar temas relacionados con nuevos estudios, que permitan buscar explicaciones racionales en el comportamiento químico y físico del cemento, que ayuden a mejorar las características de las estructuras internas del cemento.

Los aspectos fundamentales que se dan a conocer en la primera parte de este trabajo son generalidades sobre el cemento como: definición, tipos, historia, clasificaciones y preparaciones especiales.

Posteriormente se continua con el análisis de la fabricación del cemento, en el que se incluyen, las materias primas, los procesos de fabricación y las reacciones en el horno por separado, que ayudarán a tener un mayor entendimiento de los que es el cemento y su proceso de control de calidad.

Se presenta en seguida, el análisis de las propiedades químicas, físicas y sus características cristalográficas que se obtienen en la fabricación del cemento, así como su comportamiento, que nos lleva a la necesidad de tener una normatividad encaminada a un proceso de control de calidad.

También se incluyen las especificaciones físicas, químicas y cristalográficas del cemento, pasando primeramente por el análisis del comportamiento físico de las estructuras cristalinas que conforman al cemento utilizado en la cementación y recementación de tuberías de revestimiento.

Por último se dan las conclusiones y recomendaciones que resultaron del desarrollo del presente estudio.

INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la Ingeniería Petrolera la cementación de las tuberías de revestimiento del pozo, juega un papel muy importante en el éxito que se logre en la terminación del pozo, que hará posible la explotación y la extracción de los hidrocarburos contenidos en el subsuelo. La cementación de un pozo, es el proceso de mezclar cemento con agua formando una lechada, misma que será bombeada a través de la tubería de revestimiento y depositada en el espacio anular formado por la tubería y la pared del agujero. Esta operación es realizada prácticamente desde el inicio de la perforación, debido a que es necesario cementar una tubería para poder colocar las instalaciones superficiales del pozo. Durante la perforación, se cementan tuberías intermedias para aislar horizontes que pueden provocar o han provocado problemas. En la terminación del pozo, la cementación es orientada, fundamentalmente, al control de la producción o inyección de fluidos en las formaciones de interés.

Además de sellar el espacio anular entre las paredes del agujero y la tubería de revestimiento, permitiendo aislar las zonas de alta o baja presión, el cemento debe garantizar la protección de la tubería de revestimiento contra los fluidos de la formación. Los cementos utilizados en la cementación de pozos petroleros, son cementos modificados en relación al cemento original Portland y su fabricación se debe realizar bajo especificaciones estrictas, por lo que es necesaria la aplicación de pruebas especiales para la adecuada caracterización, asegurándose con esto, un continuo control de la calidad entre los diferentes lotes que se producen en la planta cementera.

La situación actual de los pozos perforados en nuestro país, con condiciones cada vez más extremas (alta presión y temperatura, pozos altamente desviados, horizontales o de ramales múltiples, etc.), requiere de estrictas evaluaciones a las operaciones que sean llevadas a cabo. El cemento utilizado para la aplicación de lechadas de cemento se ha venido evaluando de acuerdo a las especificaciones dadas por el American Petroleum Institute, tales especificaciones para el caso particular de la Industria Petrolera Mexicana, no han resultado ser las adecuadas, motivo por el cual es necesidad imperiosa utilizar una normatividad propia y específica.

Es debido a todo lo anterior, que se ha preparado este trabajo con el objetivo de poder proporcionar al ingeniero de diseño de pozos y profesionistas relacionados, una herramienta más para la evaluación y el mejor conocimiento de los resultados que se tengan en la aplicación de una lechada de cemento, lográndose con esto, reducir los costos de las cementaciones y recementaciones de pozos petroleros. Además de sensibilizar al lector, de una manera concisa y directa, sobre la necesidad actual de llevar a cabo un estricto control de calidad del cemento utilizado para la cementación y recementación de tuberías de revestimiento.

Con la finalidad de comprender el significado del control de calidad efectuado al cemento, es necesario conocer desde las propiedades químicas y físicas de sus componentes, que permiten visualizar las características principales de él, continuando con las pruebas que se realizan para determinar sus propiedades particulares, hasta la necesidad de utilizar un estudio cristalográfico.

NO SON LA RIQUEZA
NI EL ESPLENDOR,
SINO LA TRANQUILIDAD
Y EL TRABAJO
LOS QUE PROPORCIONAN
LA FELICIDAD.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Definición del Cemento

El cemento pertenece a la clase de materiales que se denominan aglomerantes hidráulicos. Esta clase de materiales quedan definidos como aquellos productos que al combinarse con el agua, endurecen tanto en presencia del aire como del agua.

El cemento es una mezcla de caliza, sílice y arcilla finamente pulverizados que, al agregarle agua, tiene la propiedad de fraguar y formar un cuerpo sólido, incrementando su consistencia con respecto al tiempo.

En su proceso de fabricación, la mezcla mencionada es molida y calcinada en hornos, teniendo como producto un material conocido como clinker, el cual contiene todos los componentes que constituyen al cemento a excepción del sulfato de calcio (yeso), que posteriormente se le adiciona al clinker. La mezcla de yeso y clinker es molida teniendo como producto final al cemento.

La norma de calidad que rige al cemento portland en la República Mexicana es la **Norma Oficial Mexicana NOM-C-001-1980**, la cual da la siguiente definición de este producto: "Es el conglomerado hidráulico que resulta de la pulverización del clinker frío, a un grado de finura determinado, al cual se le adicionan sulfato de calcio natural, o agua y sulfato de calcio natural".

También en la norma, queda definido el clinker como el material sintético granular, resultante de la cocción a una temperatura del orden de 1400 °C (1673 °K), de materias primas de naturaleza calcárea y arcillosa, previamente trituradas, proporcionadas, mezcladas, pulverizadas y homogeneizadas.

1.2 Historia del Cemento

Los materiales cementantes formados por agua y otros productos se han utilizado desde los albores de las grandes civilizaciones.

Los antiguos egipcios utilizaban como cementante un compuesto de yeso impuro calcinado, mezclado con agua y algunas ocasiones con la adición posterior de arena, grava o piedras partidas.

Durante el periodo romano se empleó por primera vez como compuesto la caliza calcinada. Posteriormente desarrollaron un tipo de cemento a base de yeso y cenizas volcánicas al cual denominaron "Puzolana" debido a que la región donde se encontraron originalmente las cenizas se llamaba Puzzuoli.

Los griegos utilizaron un cemento similar al de los romanos llamado "Santorí", denominado así, por la utilización de una toba volcánica de las Islas de Santorín.

Durante los siguientes periodos, los materiales cementantes fueron de menor calidad que los utilizados por romanos y griegos teniendo nulo avance en el conocimiento de dichos materiales y volviendo a las prácticas antiguas. Sin embargo, durante los siglos XV y XVI, hubo una tendencia hacia el uso de las puzolanas.

Fue hasta la década de los cincuentas, del siglo XVIII, cuando se tuvo avance sustancial en la fabricación de materiales cementantes. En esta década John Smeaton, ingeniero inglés, desarrolla un cemento en base a la cal hidráulica. El material se fabricaba con rocas de calizas impuras que contenían cierta proporción de arcilla, estableciéndose que las propiedades cementantes eran función de los silicatos, y de la calidad del proceso de fabricación.

En 1796, el inglés Joseph Parmer, desarrolló un material cementante a base de calizas aún más puras que las utilizadas por Smeaton, obteniendo un cemento hidráulico de mayor finura, el cual fue conocido como cemento romano, debido al color que presentaba tan parecido al de los viejos cementos utilizados por los romanos.

Fue en 1824 cuando Joseph Aspdin, investigador inglés, desarrolló un tipo básico final de material cementante, producido por el calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla, moliendo el producto resultante hasta convertirlo en un polvo fino. Este tipo de cemento, es el conocido como "Cemento Portland", debido a la similitud que presenta este material después de hidratado, con ciertas canteras de caliza de la Isla de Portland, Inglaterra.

La primera fábrica de cemento Portland fue establecida en Inglaterra por James Frost en 1825. Las primeras plantas que se establecieron fuera de Inglaterra se hicieron en Bélgica y Alemania en 1855. En Estados Unidos de América se fabricó cemento Portland hasta 1875 y en México a principios del siglo XX (1906).

El desarrollo actual de los cementos utilizados en la cementación de pozos petroleros, obedece a grandes requerimientos y estrictas especificaciones. Estos son cementos modificados en relación al cemento original Portland.

1.3 Tipos de Cemento

Los materiales cementantes se clasifican en tres tipos: Cementos Naturales, Cementos Puzolánicos y Cementos Portland.

◆ Cementos Naturales

Son conocidos como hidráulicos, muy semejantes a los cementos a base de cal, debido a que ambos contienen compuestos de silicio (Si), aluminio (Al) y calcio (Ca), además para su dosificación se requiere de diferentes componentes, tales como la hematita, el yeso y la pizarra entre otros.

◆ Cementos Puzolánicos

Este tipo de cemento fue el primer cemento hidráulico desarrollado, cuya materia prima son principalmente las cenizas volcánicas, que al molerse finamente y mezclarse con cal hidratada produce un material cementante. Este tipo de cemento si no se hace a base de puzolanas activas, resultan ser productos de menor calidad que un cemento portland

◆ Cementos Portland

Es el tipo básico de material cementante, es un cemento hidráulico, que proviene de la pulverización del producto obtenido por calcinación de una mezcla apropiadamente dosificada, de materiales arcillosos y calizas, con la adición posterior a la calcinación de yeso. El nombre de cemento Portland fue concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento fraguado y una caliza obtenida de la cantera de Portland, Inglaterra.

Los cementos naturales y los Portland se diferencian principalmente en la selección y procesamiento de las materias primas utilizadas, antes de que entren al horno para ser calcinadas.

Los cementos utilizados actualmente en la cementación de pozos petroleros son del tipo de cementos Portland, clase "G" y "H". Esta clasificación de cementos utilizados en pozos petroleros fue establecida por el **American Petroleum Institute (API)**. Cabe mencionar que los sistemas de clasificación y especificación de cementos son establecidos por varios grupos de usuarios, siendo los mejores sistemas los del **American Society for Testing and Materials (ASTM)** y el del API.

1.4 Clasificación API de los Cementos y su Equivalente ASTM

El ASTM provee especificaciones para 5 tipos de cemento Portland, estos son: tipos I, II, III, IV y V.

◆ Tipo I

Es el llamado cemento Portland común, destinado para usos generales, cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para los tipos II, III, IV, V. Se caracteriza por tener altas resistencias mecánicas y alta generación de calor durante su hidratación.

◆ Tipo II

Conocido como cemento Portland modificado, destinado a usos generales, donde se exponga a una acción moderada de los sulfatos o cuando se requiera un calor de hidratación moderado.

◆ Tipo III

Para uso donde se tengan esfuerzos terrestres y se requiera tener una alta resistencia mecánica a temprana edad. En tiempo frío, su uso permite reducir el período de curado controlado.

◆ Tipo IV

Conocido como cemento Portland de bajo calor. Para uso en lugares donde la elevación de temperatura del calor generado durante el endurecimiento es un factor crítico.

◆ Tipo V

Llamado cemento Portland de alta resistencia a los sulfatos. Para usarse cuando se tenga una acción severa de los sulfatos.

Los cementos fabricados para utilizarse en la cementación de pozos petroleros están sujetos a amplios rangos de temperatura y presión, y difieren considerablemente de los tipos ASTM que son fabricados para usarse a condiciones atmosféricas. Por esa razón el American Petroleum Institute provee especificaciones para nueve clases de cementos utilizados en la cementación de pozos petroleros, designados clase A hasta la H, y J.

La diferencia entre las distintas clases de cementos empleados para la cementación de pozos petroleros, es debido a la utilización de diferentes materias primas para su elaboración y fabricación, así como a la adición de ciertos aditivos dosificantes, que ocasionan la aceleración o retardo del fraguado del cemento, así como, la resistencia a efectos negativos originados por ciertos productos químicos, como los sulfatos.

◆ Clase A

Esta clase de cemento se recomienda para ser utilizado para profundidades hasta de 1,830 m (6,000 pies), cuando no son requeridas propiedades especiales, tales como viscosidad plástica, punto de cedencia y agua libre. El cemento clase A es similar al tipo I del ASTM.

◆ **Clase B**

Este cemento es recomendado para ser usado a profundidades de 1,830 m (6,000 pies), cuando se requiere una moderada resistencia al ataque de los sulfatos, y es similar al cemento tipo II del ASTM.

◆ **Clase C**

Recomendado para profundidades de 1,830 m (6,000 pies), en donde se requiere de alta resistencia a la compresión en las primeras 30 hrs. a altas temperaturas. Esta clase de cemento es equivalente al tipo III del ASTM.

◆ **Clase D**

Se recomienda para usarse a profundidades de 1,830 a 3,050 m (6,000 a 10,000 pies), donde se presentan condiciones de presión y temperatura moderadas y altas.

◆ **Clase E**

Este cemento se recomienda para profundidades de 3,050 a 4,880 m (10,000 a 16,000 pies), cuando se presentan condiciones de alta presión y temperatura.

◆ **Clase F**

Es recomendada esta clase de cemento para usarse a profundidades de 3,050 a 4,880 m (10,000 a 16,000 pies), cuando se presentan condiciones de presión y temperatura extremadamente altas.

◆ **Clase G**

Este es un cemento básico, utilizado para profundidades de 2,440 m (8,000 pies), es compatible con aditivos aceleradores o retardadores de fraguado, para usarse a profundidades mayores bajo condiciones altas de presión y temperatura.

◆ Clase H

Es un cemento básico, recomendado especialmente para profundidades de 2,440 m (8,000 pies), sin embargo, se puede utilizar a condiciones de presión y temperatura (profundidad) mayores, mediante la adición de aditivos aceleradores o retardadores de fraguado. Esta clase de cemento se emplea cuando se requieren de moderadas a altas resistencias a los sulfatos.

◆ Clase J

Esta clase de cemento, se recomienda utilizarlo para condiciones de profundidad de 3,660 a 4,880 m (12,000 a 16,000 pies), en donde se presentan condiciones de presión y temperaturas extremadamente altas. Se puede utilizar también adicionándole aditivos aceleradores o retardadores de fraguado cuando se requiera.

Para la cementación de pozos fuera de Estados Unidos de América (E.U.A.) y de los países que tecnológicamente dependen de él (que siguen las especificaciones API), existe una clasificación internacional para designar a los cementos utilizados, esta clasificación internacional y sus equivalencias se muestra a continuación en la tabla 1.1.

Designación Internacional	Tipo de Cemento	Equivalente	
		ASTM	API
OC	Cemento Portland Ordinario	I	A
RHC	Cemento Portland de Rápido endurecimiento	III	C
HSC	Cemento Portland de Alta Resistencia	III	C
LHC	Cemento Portland de Bajo Calor	II	B
SRC	Cemento Portland de Resistencia a los Sulfatos	V	-
AEC	Cemento Portland Atomizado con Aire	-	-

tabla 1.1 Clasificación internacional de cementos utilizados fuera de E. U. A..

1.5 Cementos Especiales

Existen otros materiales cementantes que son utilizados muy eficientemente en la cementación de pozos petroleros, llamados cementos especiales, que no están incluidos en las especificaciones del API o la clasificación del ASTM. Este grupo de materiales cementantes está formado por cementos:

- 1) Portland-Puzolánicos
- 2) Base Diesel
- 3) Látex
- 4) De Yeso
- 5) Plásticos
- 6) De Expansión
- 7) Refractarios
- 8) De Escoria
- 9) Cálcico-Puzolánicos
- 10) Para Ambientes Fríos

1. Cementos Portland-Puzolánicos.

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

2. Cementos Base Diesel.

Este tipo de cementos son frecuentemente utilizados para excluir intervalos con presencia de agua. Estas lechadas se componen básicamente de cemento API clase A, B, G o H, mezclados en diesel o kerosina con un surfactante (aniónico). Los cementos base diesel, tienen tiempos de bombeo ilimitados y tienen la característica de fraguar en presencia de agua exclusivamente, es decir, una vez bombeada la lechada y colocada en la zona programada para la exclusión de agua; la lechada absorbe el agua y comienza a fraguar.

3. Cementos Látex.

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

4. Cementos de Yeso.

Estos cementos son utilizados para trabajos de recementación. Generalmente se obtienen con un tipo de yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conteniendo un aditivo resinoso (polvo) en pequeñas proporciones. Este tipo de cementos tienen la capacidad de fraguar rápidamente, obtener inmediatamente alta resistencia y una expansión positiva (3 % aproximadamente). Se mezclan con cemento API clase A, G, o H, para producir propiedades tixotrópicas en concentraciones de 8 a 10 %.

5. Cementos Plásticos.

Los cementos plásticos o resinosos se utilizan para diversas operaciones, tales como, taponamiento selectivo en agujero descubierto, taponamiento de los disparos, y cementación del pozo para su abandono. Estos cementos generalmente están formados por resinas líquidas y un catalizador mezclados con un cemento API clase A, B, G o H; los cuales, tienen la propiedad de que al aplicarle presión a la lechada, la resina penetra en la zona de interés formando un sello dentro de la formación. Su utilización en los pozos es relativamente de volúmenes pequeños.

6. Cementos de Expansión.

Para ciertas condiciones del fondo del pozo es deseable tener un cemento que se pueda extender en sus propiedades, como protección contra condiciones problemáticas. Para tales casos, en la industria petrolera se han evaluado varios componentes que extienden las propiedades ligeramente cuando se aplican a los cementos. Actualmente se manejan 3 tipos comerciales de cementos de expansión, los cuales son:

- ◆ Tipo K, contiene como componente el sulfoaluminato de calcio que se mezcla con un cemento portland. Cuando se prepara la lechada de cemento tipo K, la reacción creada por hidratación provoca una expansión de 0.05 a 0.20 %, aproximadamente.
- ◆ Tipo S, sugerido por la Portland Cement Association, consistente de un cemento con un alto contenido de aluminato tricálcico, similar al cemento API clase A, con aproximadamente 10 a 15 % de yeso.
- ◆ Tipo M, se obtiene con la adición de pequeñas cantidades de cemento refractario, al cemento portland, para producir fuerzas expansivas.

7. Cementos Refractarios (cementos con alto contenido de aluminio).

Los cementos refractarios son cementos fabricados con la mezcla de bauxita (mineral de aluminio) y caliza, los cuales se calientan en un horno hasta que la mezcla se funde. En estos cementos la bauxita reemplaza a la arcilla de los cementos portland. Un análisis representativo de los cementos refractarios muestra que estos contienen aproximadamente 40 % de cal (CaO) y pequeñas cantidades de sílice y fierro. Los aluminatos de calcio en estos cementos producen un rápido fraguado, y una gran resistencia a las altas temperaturas y al ataque de corrosivos químicos. Este tipo de cementos es utilizado para cementar pozos donde se llevará a cabo una combustión in situ, donde los rangos de temperatura pueden ser de 750 a 2,000 °F durante el proceso de calentamiento.

8. Cementos de Escoria.

Investigaciones recientes en la tecnología de cementación con escorias del horno de fundición, han hecho necesario la expansión de los cementos clasificados para la inclusión del cemento portland mezclado con escorias del horno de fundición (**Blast Furnace Slag -BFS-**). La mayor aplicación de las BFS es en su adición al lodo de perforación para su conversión a lechada de cemento. Este tipo de cementos son una mezcla de BFS con cemento API clase G. Para utilizar las BFS se requiere del uso de un activador alcalino para llegar al proceso de conversión del lodo de perforación en lechada de cemento. Esta tecnología puede ser utilizada en aplicaciones donde son requeridas propiedades como alta resistencia al ataque de los sulfatos, alta viscosidad y baja expansión. La limitante que tiene la aplicación de esta tecnología en estos momentos es la profundidad del pozo (no mayor a 2,500 m) y la temperatura del fondo estática (no mayor a 110 °C). Resultados de pruebas indican que las mezclas de BFS con cemento portland dan como resultado un material de alta calidad para la cementación de pozos.

9. Cementos Cálculo-Puzolánicos.

Los cementos cálculo-puzolánicos son generalmente mezclas de cenizas ligeras, cal hidratada y pequeñas cantidades de cloruro de calcio. Las bondades de este tipo de cemento son: disminución del tiempo de fraguado, densidades de bajo valor, economía y estabilidad a altas temperaturas.

10. Cementos para ambientes fríos.

Para condiciones de muy bajas temperaturas (glaciares, bloques de hielo entre otras), es conveniente el uso de este tipo de cementos, con propiedades de fraguado rápido y bajo calor de hidratación, esto último para evitar el derretir la zona fría o congelada. Para tales condiciones de baja temperatura son utilizados satisfactoriamente mezclas de cementos de yeso y cementos refractarios. Para la cementación de tuberías superficiales, la lechada es diseñada para tiempos bombeables de 2 a 4 horas.

*SI LO VEO,
PUEDO TAL VEZ RECORDARLO.
SI LO VEO Y LO DIGO,
SEGURAMENTE PODRÁ SERVIR DE ALGUNA UTILIDAD.
PERO SI LO VEO, LO DIGO Y LO HAGO,
JAMÁS PODRÉ OLVIDARLO.*

CAPÍTULO 2

FABRICACIÓN DEL CEMENTO

2.1 Materias Primas

Las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento son: la caliza u otros materiales con un alto contenido de carbonato de calcio, las arcillas o pizarras y algunos óxidos de hierro y aluminio, si estos no están presentes en cantidades suficientes en las arcillas o pizarras.

Debido a que los componentes se encuentran raramente en las proporciones deseadas en una sola sustancia, es necesario la mayoría de las veces, elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal, pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso).

El componente calcáreo puede estar formado por: caliza, que posee, por lo general, estructura cristalina de grano fino; creta, que posee una estructura suelta, térrea; marga, rocas originadas por la depositación simultánea de carbonato de calcio (CaCO_3) y de material arcilloso, con menor dureza que la caliza.

El componente arcilloso es la otra materia prima importante para la fabricación del cemento. Las arcillas, en esencia, son productos de meteorización de silicatos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en partículas de los feldspatos y micas. Los minerales de la arcilla tienen textura de grano fino, el tamaño del grano queda por debajo de las 2 micras de diámetro.

En la tabla 2.1, se presentan los porcentajes, según las relaciones entre componentes calcáreos y arcillosos en las materias primas, donde se puede observar y distinguir el variado contenido de carbonato de calcio:

Componente	CaCO₃ Contenido
Caliza de alto porcentaje	96 - 100 %
Caliza margosa	90 - 96 %
Marga calcárea	75 - 90 %
Marga	40 - 75 %
Marga arcillosa	10 - 40 %
Arcilla margosa	4 - 10 %
Arcilla	0 - 4 %

tabla 2.1. Relación entre componentes calcáreos y arcillosos.

Las materias primas se mezclan y calcinan a altas temperaturas en los hornos, para formar los compuestos que constituyen al cemento. También pueden utilizarse otras materias primas para la producción de cementos especiales. Estas materias pueden ser: material férrico, hematita o escoria rica en óxido de fierro y material silicoso, cuarzo, arena, cenizas, y escorias con gran contenido de sílice.

Otra materia prima utilizada y que es esencial para la obtención de un buen cemento es el sulfato de calcio (yeso), el cual sirve para controlar el tiempo de fraguado del cemento.

El consumo de las materias primas varía de acuerdo a la composición química de la caliza y la arcilla (contenido de cal, sílice, alúmina y óxido férrico). La dosificación del sulfato de calcio (yeso) estará en función de su composición química, de la composición de las otras materias y del tipo de cemento a elaborarse.

En la figura 2.1 se presenta esquemáticamente las materias primas requeridas para la elaboración de cementos tipo normal y de resistencia rápida, y modificados.

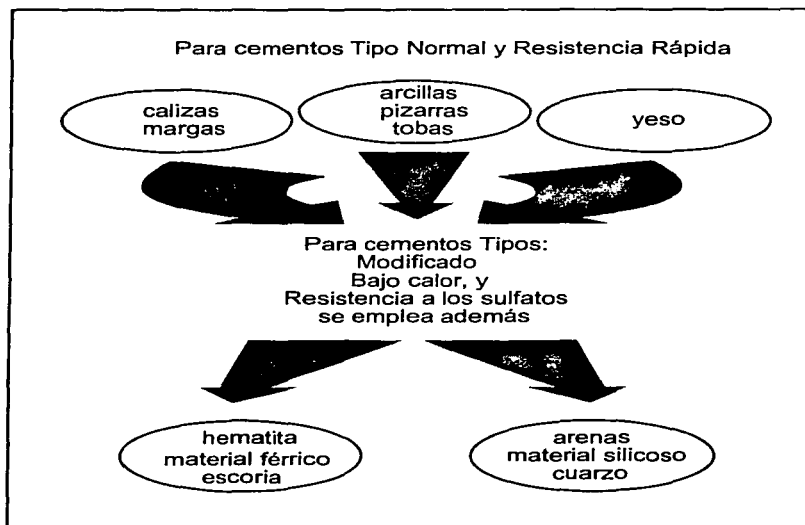


fig. 2.1. Cuadro esquemático de materias primas.

2.2 Procesos de Fabricación

La fabricación del cemento se inicia con la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo a la planta cementera. En la figura 2.2 se presenta un diagrama generalizado del proceso de fabricación del cemento.

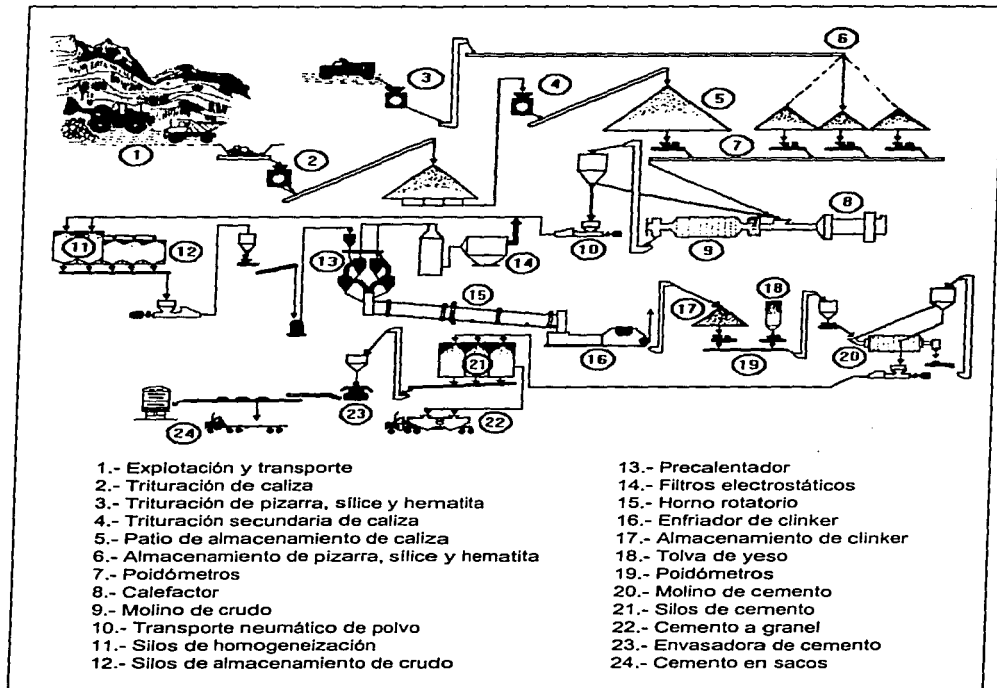


fig. 2.2. Proceso de fabricación del cemento.

Podemos distinguir dos procesos fundamentales para la fabricación del cemento: proceso por vía seca (proceso seco), en la cual se tratan los componentes del crudo por molienda en seco (observar figura 2.3); proceso por vía húmeda (proceso húmedo), en el que se prepara una pasta de materias primas con contenidos del 18 al 45 % de agua por sedimentación o por molienda, en presencia de agua o por combinación de ambos procesos (observar figura 2.4). En ambos procesos la explotación de los bancos de materias primas y su acarreo, son similares, continuando otras etapas durante la fabricación, las cuales difieren en dichos procesos en algunos aspectos, los cuales se describen a continuación.

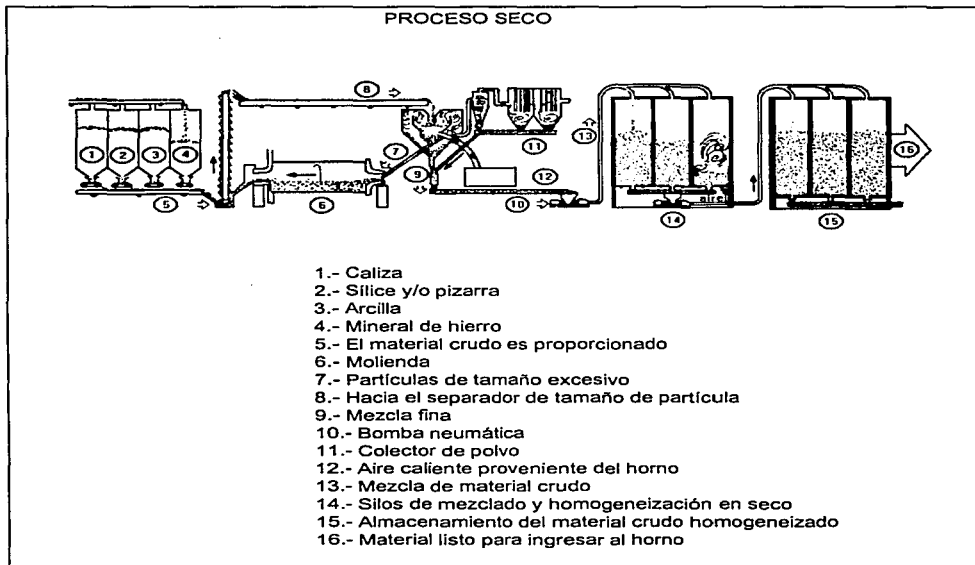


fig. 2.3. Representación esquemática del proceso seco.

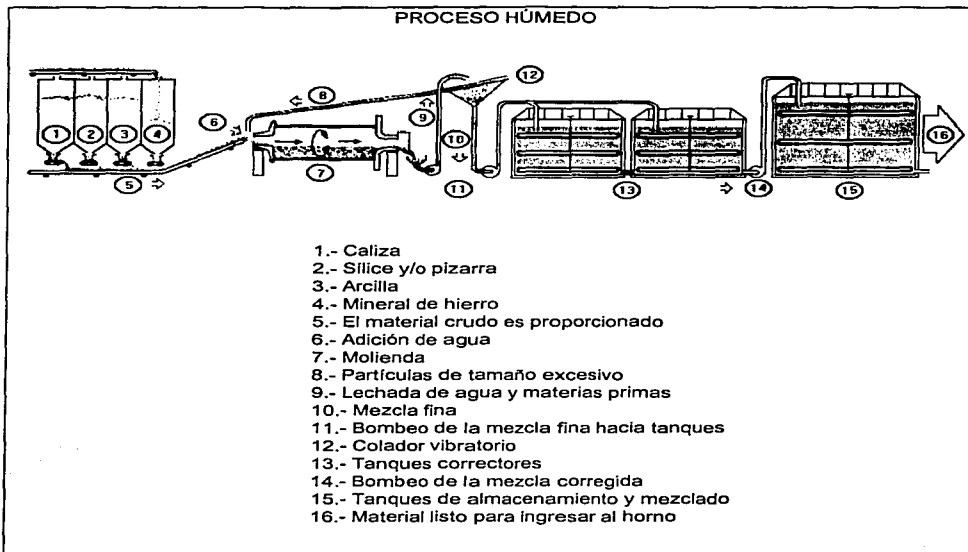


fig. 2.4. Representación esquemática del proceso húmedo.

Proceso Seco

TRITURACIÓN.- Las materias primas se trituran en varias etapas en una serie de máquinas que están adaptadas al tamaño descendente de las partículas en proceso. La reducción de tamaño va desde las grandes piezas de cantera (1 a 1.5 m de tamaño), hasta partículas de unos 13 mm de tamaño. En la figura 2.5 se ejemplifica una instalación de trituración, comúnmente llamada de desmenuzamiento.

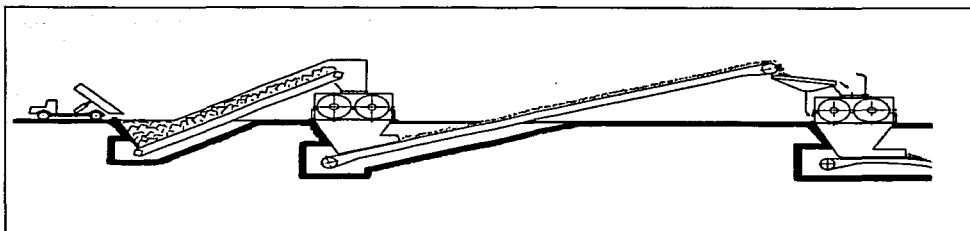


fig. 2.5. Instalación de desmenuzamiento en dos etapas para pre y post trituración.

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

MOLIENDA.- El material recuperado de los secadores, es molido finamente para asegurar la homogeneización de los componentes de la mezcla, facilitando las reacciones químicas durante la calcinación. La molienda de las materias primas, se realiza en los molinos de bolas, los cuales constan de un cuerpo cilíndrico rotatorio de acero llenado en aproximadamente 30 % de su volumen interior de bolas de acero, las cuales por impactos al caer en cascada debido a la rotación del molino, llevan a cabo el molido del material. El material posteriormente es llevado a un separador, donde la parte más fina, considerada como producto terminado, se separa para continuar el proceso, en cambio la que aún es demasiado gruesa, regresa al molino. Tal proceso se ilustra en la figura 2.6 que se muestra a continuación.

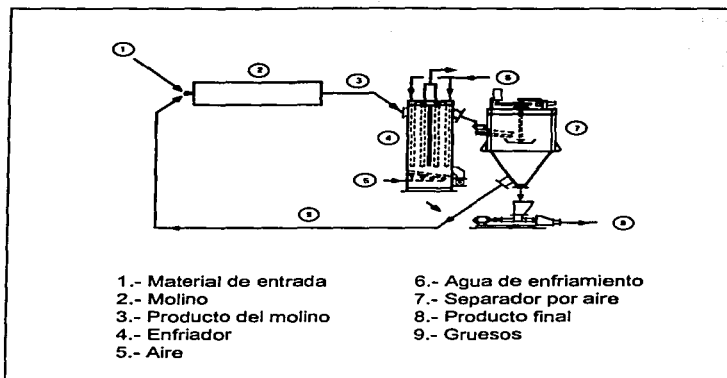


fig. 2.6. Molino y enfriador Fuller.

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

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

Los hornos son tubos cilíndricos que giran y presentan una inclinación con respecto a la horizontal. El material dentro del horno avanza hacia el quemador debido a la inclinación y rotación que es de 1 a 4 rpm. La temperatura máxima de calcinación de la mezcla cruda es de 1,400 a 1,500 °C. En el horno de cemento no se funden completamente los materiales, sino que se llega a una semifusión o estado pastoso, durante el cual se forman aglomerados cuya forma se aproxima a la esférica (0.25 a 4 cm de diámetro), que reciben el nombre de "Clinker". La calcinación de las materias primas en el horno debe ser perfecta para garantizar que toda la cal libre (óxido de calcio), producida por la descomposición de la caliza, alcance a combinarse con los óxidos de hierro, aluminio y silicio de la arcilla. Esta parte es importante en el proceso de fabricación, como se puede observar en la figura 2.7.

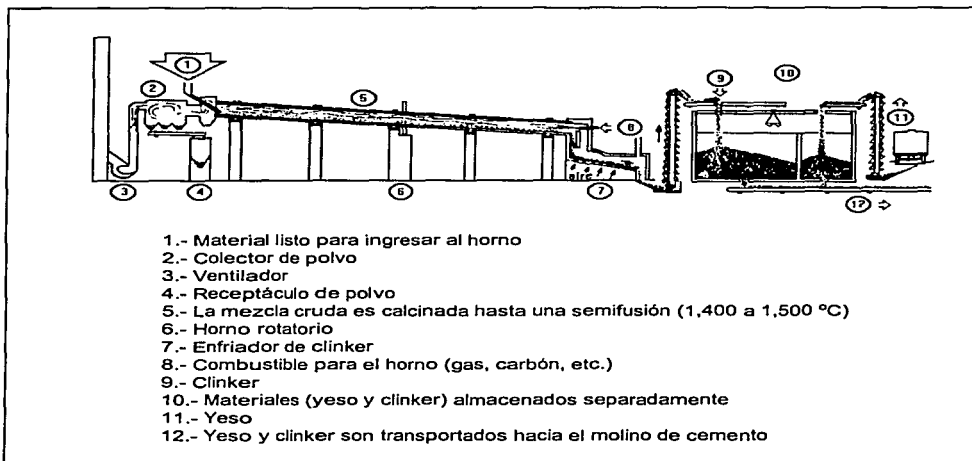


fig. 2.7. Representación esquemática de la calcinación.

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

MOLIENDA DEL CEMENTO.- Del patio de almacenamiento del clinker, éste pasa a los molinos de cemento, donde con adición de aproximadamente 5 % de yeso es molido en un molino de bolas parecido al de crudo y el producto terminado es el cemento. El cemento es molido más fino que la mezcla cruda (80 % de las partículas con diámetro menor que 0.045 mm). En la figura 2.8 presentada a continuación se muestra la molienda y almacenamiento del cemento.

ENVASE Y DESPACHO.- No obstante que el proceso de fabricación del cemento termina cuando el cemento sale de los molinos se considera al envase y despacho de cemento como parte integral del proceso. Quedando ciertas maniobras por realizar, como son la conducción del cemento a los silos de almacenamiento, y finalmente su envasado y despacho en diferentes formas: en sacos de 50 kg cargados en camiones y furgones de ferrocarril (FF.CC.); a granel mediante tolvas de FF.CC. y en pipas sobre neumáticos.

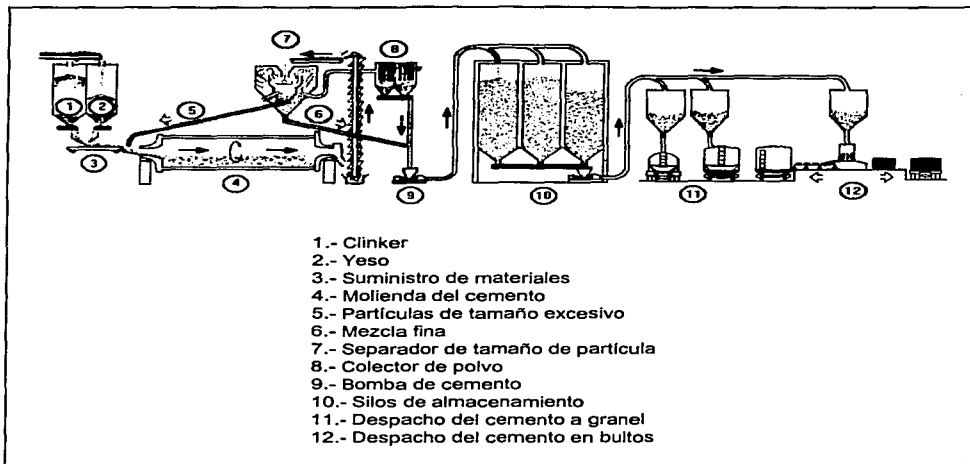


fig. 2.8. Representación esquemática de la molienda y el almacenamiento.

Proceso Húmedo

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

1. La arcilla no se tritura sino que se descarga en un molino de rastrillos que la desmenuza y la mezcla con agua para producir una lechada bastante fluida (65 % de agua), la cual, es bombeada hasta descargarla en un tanque de concreto provisto de agitadores.

2. Esta lechada dosificada junto con la caliza previamente triturada, se alimenta a los molinos de crudo donde se añade agua para facilitar la molienda, manejo y mezclado de los materiales, que representa a cambio un mayor consumo de combustible para evaporar el agua en el horno.
3. De los molinos, la mezcla cruda pasa a unos tanques correctores y de ahí a otros mezcladores, de donde a su vez pasa al horno.
4. En este proceso el secado se realiza en el horno.

Los siguientes pasos en este proceso de fabricación son los mismos que se siguen en el proceso por vía seca.

A continuación, en la figura 2.9 se muestra una panorámica de una Planta Cementera donde se pueden observar las dimensiones de las distintas partes que la conforman.



fig. 2.9. Planta Cementera.

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

2.3 Reacciones en el Horno

Siendo la calcinación en los hornos un proceso medular de la fabricación del cemento, es conveniente conocer aunque sea brevemente, las reacciones que se llevan a cabo dentro del horno para la formación de los distintos compuestos óxidos que constituyen al clinker. Dentro del horno tenemos, de acuerdo al rango de temperaturas que se manejan, seis zonas en las cuales suceden distintas reacciones, como se muestra en la tabla 2.2.

Zona	Rango de Temperatura (°C)	Reacción
I	200 máximo	Evaporación
II	200 a 800	Precalentamiento
III	800 a 1100	Decarbonación
IV	1100 a 1250	Reacción Exotérmica
V	1250 a 1500 a 1250	Aglomeración
VI	1250 a 1000	Enfriamiento

tabla 2.2. Zonas de reacción en un horno rotatorio de cemento.

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

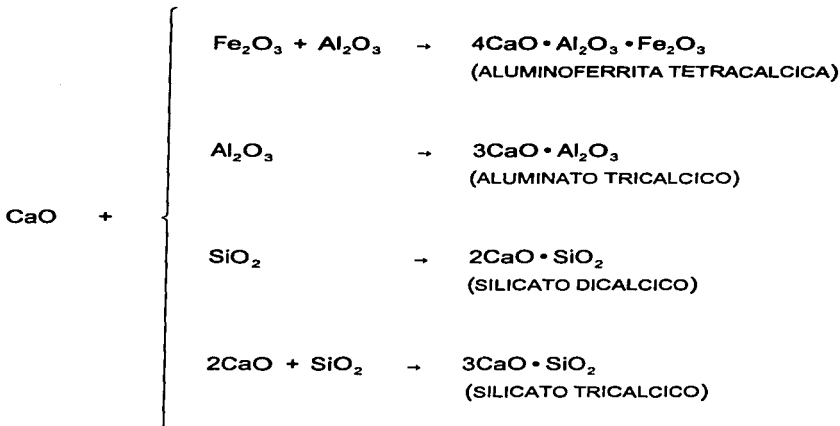
En el primer tramo del horno, es decir, la zona más cercana a la entrada del material crudo, éste es calentado a unos 700 °C aproximadamente (zona de precalentamiento); en seguida se descompone la caliza a una temperatura de unos 900 °C, desprendiéndose gas carbónico que es arrastrado hacia la chimenea,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



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



Iniciándose así la combinación de la cal (CaO) proveniente de la caliza con los óxidos de fierro (Fe_2O_3) y aluminio (Al_2O_3) formando primeramente, la aluminoferrita tetracálcica y en seguida el aluminato tricálcico; esto se efectúa a temperaturas de 1,250 °C aproximadamente. Posteriormente se lleva a cabo la combinación de la cal (CaO) con la sílice (SiO_2) formándose el silicato dicálcico, en el cual en presencia de más cal, forma el silicato tricálcico:



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

CUANDO SE SAPE UNA COSA,
SOSTENER QUE SE SAPE,
Y CUANDO NO SE SAPE,
ADMITIR QUE NO SE SAPE,
ESTE ES EL VERDADERO CONOCIMIENTO.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

3.1 Química del Cemento

La química del cemento es muy compleja, su comportamiento en el pozo se define normalmente con un análisis simple de los óxidos y pruebas físicas basadas en la bombeabilidad, resistencia a la compresión y propiedades reológicas.

Cuando la lechada de cemento es colocada a la profundidad deseada en el espacio anular en el pozo, conformado por la pared del agujero y el diámetro exterior de la tubería de revestimiento, se lleva a cabo un proceso de fraguado del cemento, esto es: el comportamiento del cemento más agua, conocido como lechada, pasa de fluido a plástico, teniéndose el desarrollo de una estructura plástica reticulada con la consistencia de un gel, que posteriormente se solidifica, como se puede apreciar en la figura 3.1.



fig. 3.1. Proceso de fraguado de una lechada.

En sí, el proceso que ocurre con el cemento es el cambio de un compuesto químico inestable (energía interna elevada) a uno estable, el cual se presenta como una masa sólida unida por medio de fuerzas moleculares; resultado de una reacción química entre los compuestos del cemento y el agua, la cual recibe el nombre de hidratación del cemento. En dicho intercambio químico sucede un desprendimiento de calor, conocido como calor de hidratación.

Los compuestos que conforman el cemento, son óxidos superiores, los que se presume son de oxidación lenta, es decir, terminan su grado de oxidación más tarde al airearse y enfriarse.

Los componentes principales del cemento son:

- ◆ **Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).**- Este compuesto es formado de la combinación del óxido de calcio (CaO) y del óxido de sílice (SiO_2). El silicato tricálcico esta presente en mayor proporción en la mayoría de los cementos, contribuye grandemente en todas las etapas de desarrollo de la resistencia del cemento, y es el factor principal que produce la hidratación temprana del cemento.
- ◆ **Silicato Dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).**- Compuesto de hidratación lenta, que proporciona un aumento gradual en la resistencia en el cemento, ocurriendo esto en un periodo de tiempo largo.
- ◆ **Aluminoferrita Tetracálcica ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$).**- Es un compuesto químico formado por la combinación del óxido de calcio (CaO), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Compuesto de bajo calor de hidratación que no influye en el fraguado inicial del cemento, contribuyendo poco o nada en la resistencia a la compresión.

- Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$).**- Es un compuesto químico formado por la combinación del óxido de calcio (CaO) y el óxido de aluminio (Al_2O_3), que acelera el tiempo de bombeabilidad (espesamiento) de la lechada, resultando también responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre el cemento, clasificándose de acuerdo a la concentración de este compuesto en: cementos de moderada resistencia a los sulfatos (8% de aluminato) y cementos de alta resistencia a los sulfatos (3% de aluminato). Al combinarse con los sulfatos forma un compuesto expansivo conocido como germen o bacilo del cemento, que es un sulfoaluminato cálcico hidratado, el cual aumenta grandemente su volumen, lo que produce esfuerzos internos en el cemento. Por todo lo anterior este es un compuesto indeseable en el cemento.

Los componentes químicos del cemento son muy complejos y con el fin de no utilizar fórmulas químicas sofisticadas, dentro de la Industria Cementera, se ha adoptado la utilización de la nomenclatura que se presenta en la tabla 3.1.

Compuesto	Fórmula Química	Nomenclatura Común
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita Tetracálcica	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

tabla 3.1.

Otro grupo de elementos menores que constituyen al cemento, lo forman componentes que se agregan al clinker durante la molienda final y otros que quedan libres durante la calcinación de las materias primas, los últimos son elementos que no se alcanzan a combinar en los hornos. Este grupo de elementos representa el 10 por ciento del peso del cemento y lo conforman:

- ◆ **Cal libre u Óxido de Calcio (CaO libre).**- Es un compuesto indeseable, debido a que ocasiona gelificaciones prematuras y hace más difícil la retardación del cemento, además de disminuir, el porcentaje del silicato tricálcico (C_3S) y la resistencia final del cemento. Cuando se presenta en exceso, puede ocasionar expansión debido a que aumenta su volumen después de que los otros compuestos del cemento ya han alcanzado su volumen final, lo que ocasiona esfuerzos internos e inclusive el agrietamiento del cemento fraguado. El porcentaje de este compuesto tendrá un valor mínimo, pues a medida que aumenta nos indicará que en su elaboración ha habido deficiencias.

- ◆ **Yeso o Sulfato de Calcio ($CaSO_4$).**- Proviene del yeso que se añade al clinker durante la molienda final. Regula la acción química del cemento con el agua y controla el tiempo de fraguado. Es muy importante la adecuada dosificación del yeso, ya que su carencia o exceso podría provocar, además de lo anteriormente mencionado, cambios volumétricos en el cemento.

- ◆ **Óxido de Magnesio (MgO).**- Comúnmente llamado "magnesia", aunque en pequeñas cantidades, está presente en todos los cementos portland debido a que en la naturaleza se encuentra acompañando a las calizas en forma de carbonato de magnesio. Al igual que la cal (CaO), su presencia en exceso puede provocar aumento en el volumen pero con un grado de desarrollo más lento, por lo tanto mucho más peligroso (las primeras manifestaciones pueden ocurrir después de varios años), ya que pruebas a corto tiempo no proporcionan datos seguros sobre el peligro de tal expansión retardada.

- ◆ **Álcalis (Na_2O y K_2O).**- Óxidos de sodio y potasio, son elementos indeseables ya que altos porcentajes de éstos ocasionan dilatación y agrietamiento; además, provocan la disminución de resistencia a la compresión, elasticidad y durabilidad del cemento fraguado. Grandes cantidades de estos álcalis pueden provocar cierta dificultad para regular el tiempo de fraguado.

- ◆ **Residuo Insoluble.**- Este representa una pequeña fracción de cemento formada por una mezcla de óxidos no solubles en ácido clorhídrico, los cuales no intervienen en las propiedades del cemento. El residuo insoluble señala el grado de perfección obtenido en las reacciones que se efectúan en el horno, debido a que solamente después de su combinación con la cal durante el proceso de calcinación, es que llegan estos óxidos a ser solubles en ácidos; además nos indica si un cemento ha sido contaminado, ya que parte de estos óxidos provienen de las impurezas (de tipo arcilloso), contenidas en el yeso que se agrega al clinker.

- ◆ **Pérdida por ignición.**- También conocida como pérdida por calcinación, representa el porcentaje de pérdida de peso que sufre el cemento después de ser sometido a un calentamiento de 1,000 °C. Las sustancias que se pierden a esta temperatura son: agua y bióxido de carbono (CO_2). El clinker al salir del horno tiende a absorber humedad atmosférica y al igual que el cemento, durante su almacenamiento sigue absorbiendo humedad. El CO_2 también se absorbe de la atmósfera. La pérdida por ignición es por lo tanto una medida de la edad del cemento.

- ◆ **Óxido de Azufre (SO_3).**- Reduce la resistencia a la compresión y afecta los tiempos de fraguado del cemento.

- ◆ **Fluoruros.**- Reducen la resistencia a la compresión a temprana edad y dificultan los tiempos de fraguado.

- ◆ **Manganeso (Mn_2O_3).**- Proporciona el color oscuro del cemento.
- ◆ **Cromo (Cr_2O_3).**- Mejora las resistencias del cemento y oscurece un poco el cemento.

Un análisis químico, comúnmente realizado, de los óxidos de un cemento API clase G o H utilizado en un pozo, se muestra en la tabla 3.2.

Determinación	%
Óxido de sílice (SiO_2)	22.43
Óxido de calcio (CaO)	64.77
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	4.10
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	4.76
Óxido de magnesio (MgO)	1.14
Óxido de azufre (SO_3)	1.67
Óxido de potasio (K_2O)	0.08
Pérdida por ignición	0.54

tabla 3.2. Análisis típico de los óxidos de un cemento portland (API clase G o H).

3.2 Características Cristalográficas

En el momento en el cual el cemento se hidrata con el agua, se inicia el proceso de fraguado y se desarrollan nuevamente las cuatro formas cristalinas de los componentes principales que constituyen al cemento, las cuales son de acuerdo con la nomenclatura común citada en la tabla 3.1: C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF .

Los cristales característicos que constituyen al cemento fraguado se ilustran en la figura 3.2.

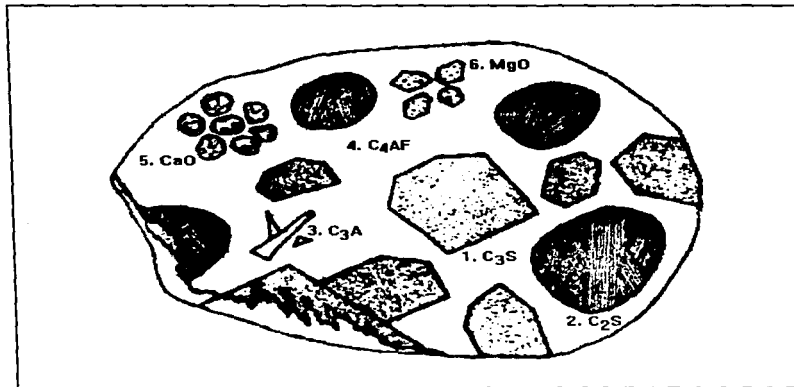


fig. 3.2. Componentes cristalinos presentes en el cemento.

1. **Alita (C₃S = Silicato Tricálcico).**- Cristales angulares o hexagonales, altamente coloreados en azul, café y verde, con tamaños de cristales variando de 30 a 60 micras.
2. **Belita (C₂S = Silicato Dicálcico).**- Cristales esféricos o redondeados, frecuentemente presentes con superficies picadas y colores ámbar o amarillo.
3. **Aluminato Tricálcico (C₃A).**- Pequeñas manchas grises o agujas encajadas en la fase líquida (Aluminoferrita Tetracálcica C₄AF).

4. **Aluminoferrita Tetracálcica (C_4AF).**- Matriz de color blanco circundante de los otros cristales, conocida como fase líquida. Tiene como función el mantener unidos a los otros cristales.
5. **Cal Libre (CaO libre).**- Presente como pequeñas manchas redondeadas, altamente coloreadas en rojo, morado y verde. Se presentan generalmente en grupos.
6. **Óxido de Magnesio (MgO).**- Pequeños platos hexagonales de color rosa.

La fotografía microscópica (fotomicrografía), presentada en la figura 3.3 es típica de un clinker de cemento portland. Las distintas fases presentes en el clinker se pueden identificar y diferenciar de acuerdo a sus características cristalográficas anteriormente mencionadas.

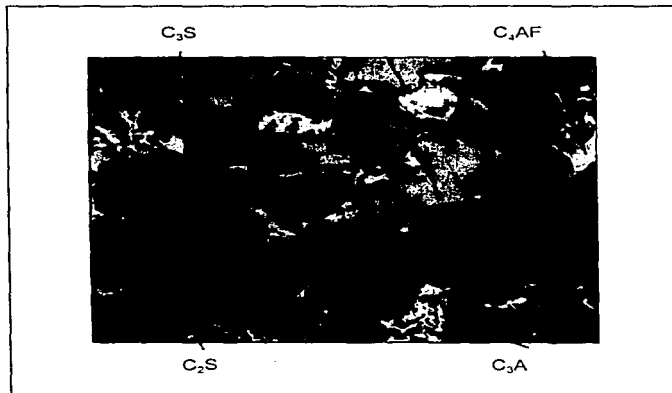


fig. 3.3. Sección microscópica de un clinker de cemento.

3.3 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del cemento las podemos definir de acuerdo a pruebas físicas que se realizan a la lechada de cemento. Estas pruebas son las siguientes:

- ◆ Agua libre
- ◆ Área de superficie específica (Blaine)
- ◆ Tiempo de espesamiento
- ◆ Pérdida de agua
- ◆ Resistencia a la compresión
- ◆ Comportamiento reológico
- ◆ Densidad de la lechada

◆ Agua libre.

Cuando la lechada de cemento es dejada en reposo, el agua libre se recolecta en la parte superior de la lechada como resultado de la precipitación de las partículas del cemento dentro de la lechada. A nivel de laboratorio el agua libre será la cantidad de agua en mililitros, que desarrolla una lechada en la parte superior de una probeta de 250 ml, después de que ha permanecido sin movimiento durante dos horas. Al finalizar la prueba hay que identificar también lo siguiente: si la lechada sale fluida, semifluida o pastosa y si la columna de cemento, dentro de la probeta, presenta grietas por donde pueda facilitarse la entrada de fluidos de la formación al momento de la operación en el campo; qué tan homogénea sea la mezcla de agua-cemento y aditivos, si es que los tiene. Es importante que la medición de esta propiedad, en el laboratorio, se lleve a cabo a condiciones de temperatura de circulación en el fondo del pozo para el cual se realiza la prueba.

◆ **Área de superficie específica (Blaine).**

La superficie específica de un cemento es el indicativo de qué tan finamente ha sido molido, este valor también es conocido como finura. Cuando se desea tener una resistencia mecánica elevada en forma rápida, se debe seleccionar un cemento con buena composición química y un blaine adecuado. También sucede que a mayor finura se genera un mayor calor de hidratación y si ésta es excesiva, los fenómenos de exudación son más acentuados. La determinación del área de superficie específica se efectúa normalmente con el permeabilímetro Blaine. Con este aparato se obtiene la permeabilidad al aire de una muestra de polvo de cemento y el resultado se utiliza para calcular el valor del área de superficie específica. Otra técnica que puede utilizarse para determinar el área de superficie específica es utilizando un turbidímetro, en el cual, el cambio de la intensidad de un haz de luz al pasar a través de una porción de partículas puede relacionarse con el tamaño de las partículas. También se puede obtener la medida del área de superficie específica mediante la técnica de adsorción de gas, la cual se obtiene por el método Brunauer/Emmett/Teller (BET).

◆ **Tiempo de espesamiento.**

Es el tiempo durante el cual una lechada de cemento se mantiene fluida y bombeable, bajo condiciones de presión y temperatura. El tiempo de espesamiento significa realmente "tiempo bombeable" y está definido por el API como el tiempo requerido para que la lechada alcance 100 unidades de consistencia (Uc). Este grado de espesamiento es equivalente a un torque de 2,080 gr-cm aplicados a la paleta de la flecha en un probador de tiempo de espesamiento, el cual tiene como aparato de medición un potenciómetro (un valor de resistencia igual a 10 volts equivale a 100 Uc de la lechada). Al alcanzar el valor de 100 Uc, la lechada se considera como un producto fraguado y será imposible desplazarla en el pozo. En el campo, el tiempo de espesamiento se traduce como el tiempo disponible para mover la lechada desde el equipo mezclador, en la superficie, hasta su lugar final de colocación en el pozo.

La prueba de tiempo de espesamiento es muy importante desde el punto de vista operativo, debido a que, si el diseño de la lechada no cumple con el tiempo mínimo requerido en el campo para colocarla dentro del pozo, ésta fraguará antes y se tendrán problemas de atrapamiento de tubería, lo cual implicaría realizar trabajos muy costosos de pesca o el abandono del pozo. En la realización de la prueba de tiempo de espesamiento se utiliza un consistómetro presurizado. Este equipo consiste básicamente de una celda cilíndrica rotatoria para la lechada de cemento, equipada con un ensamble de propela estacionaria, todo incluido en una cámara de presión capaz de resistir las presiones específicas de la prueba. El espacio entre la celda de la lechada y las paredes de la cámara de presión debe llenarse completamente con un aceite derivado del petróleo con un punto de ignición que cumpla satisfactoriamente las normas de seguridad aplicables. Un consistómetro presurizado se ilustra en la figura 3.4.

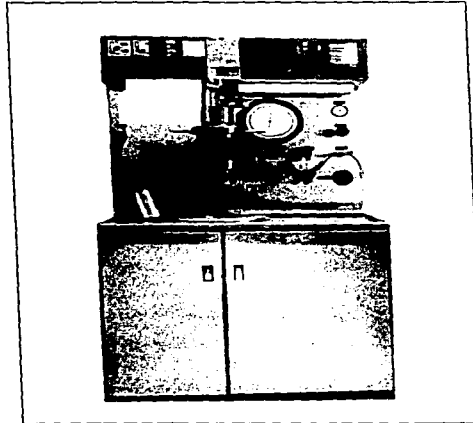


fig. 3.4. Consistómetro presurizado.

● Pérdida de agua.

La pérdida de agua de una lechada resulta de la aplicación de una presión diferencial sobre una interfase permeable. Esta presión libera agua de la lechada y hace cambiar las características de la misma. El tener valores bajos de pérdida de agua nos permite tener las siguientes ventajas: a) la lechada se mantiene fluida por el tiempo bombeable para el cual fue diseñada; b) se evita la reducción de la presión hidrostática ejercida por la columna de lechada de cemento en el fondo del agujero; c) se mantienen las propiedades reológicas de la lechada según el comportamiento predicho en laboratorio; y d) se reduce el daño a la formación productora. La presión diferencial se aplica a la lechada de cemento mediante un aparato para prueba de pérdida de filtrado según la Norma API-SPEC 10, Apéndice F; un ejemplo del equipo utilizado, conocido como filtro-prensa, se ilustra en la figura 3.6. Una baja pérdida de fluido de lechada es aquella menor de 100 cm^3 en 30 min, bajo una presión diferencial de 1000 lb/pg^2 a través de una malla 325 y a la temperatura de circulación del pozo a cementar.

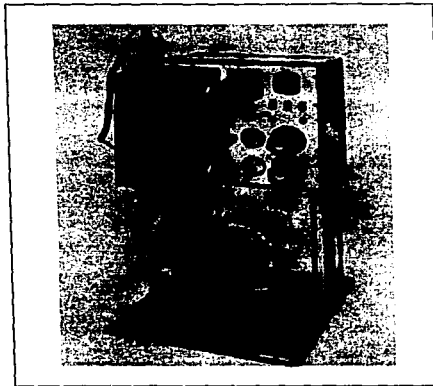


fig. 3.6. Filtro-Prensa de alta temperatura.

● Resistencia a la compresión.

La solidez de una lechada de cemento es la resistencia que ofrece al aplastamiento o al estiramiento (resistencia a la compresión o resistencia a la tensión respectivamente). Un buen valor de resistencia a la compresión va a ser aquel que nos permita cumplir satisfactoriamente con los siguientes requerimientos: 1) soportar la tubería en el agujero; 2) prevenir la entrada de fluidos indeseables a la tubería de revestimiento o migración de una formación a otra; 3) limitar los fluidos inyectados, durante un tratamiento de estimulación a la formación deseada; 4) resistir las cargas de taladreo durante la perforación del pozo. La prueba de resistencia a la compresión en sus primeros tiempos, llamada resistencia compresiva temprana, se ve afectada por las condiciones de presión y temperatura a la cual está fraguando, observándose que su resistencia se incrementa gradualmente a medida que transcurre el tiempo. El proceso de someter a condiciones específicas de presión y temperatura las muestras de lechada de cemento, por un tiempo determinado, para estudiar el desarrollo de la resistencia a la compresión, es conocido como curado del cemento. El curado a presión, generalmente tiene una mayor resistencia que el cemento curado a presión atmosférica y cuyo efecto es más pronunciado a temperaturas mayores. Lo anteriormente mencionado se debe a que existe una retrogresión en la resistencia del cemento por la continuación de reacciones químicas, debido a que toda el agua disponible en la lechada de cemento se evapora cuando el curado es a presión atmosférica y altera las reacciones químicas causando la retrogresión. El factor más importante en la resistencia a la compresión de un cemento, es el tiempo requerido para que desarrolle una resistencia conveniente; distintos autores han escrito al respecto y han llegado a la conclusión de que la resistencia a la compresión mínima que debe experimentar una lechada de cemento es de 1,000 lb/pg², para poder cumplir satisfactoriamente con los requerimientos antes citados. La velocidad a la que se desarrolla la resistencia a la compresión se puede incrementar con el uso de aceleradores.

Para llevar a cabo la prueba de resistencia a la compresión, el API recomienda el uso de cubos de cemento de 2 pg de longitud por lado y curar las muestras sumergiéndolas en agua a presión atmosférica o a una presión específica igual o menor a 3,000 lb/pg², dependiendo de la clase de cemento que se esté probando, con el fin de simular las condiciones del fondo del pozo durante el fraguado. Después del curado, los cubos se prueban con un equipo hidráulico de resistencia a la compresión. La velocidad a la cual se aplica la carga al cubo en el equipo hidráulico puede alterar los resultados obtenidos de resistencia a la compresión; el API recomienda un rango de velocidad de carga de 1,000 a 4,000 lb/pg² por minuto. El equipo que se utiliza para someter las muestras de lechada de cemento a condiciones de presión y temperatura, durante un tiempo determinado, conocido con el nombre de cámara de curado, se muestra en la figura 3.5.

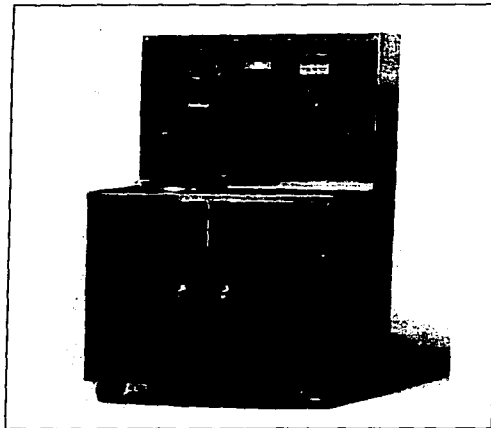


fig. 3.5. Cámara de curado.

◆ **Comportamiento reológico.**

Las propiedades reológicas que se le determinan a una lechada de cemento a nivel laboratorio, son: 1) viscosidad plástica (μp), 2) punto de cedencia (τy), 3) índice de consistencia (k') y 4) índice de comportamiento de flujo (n'); propiedades que sirven para determinar el tipo de patrón de flujo de la lechada, requerido durante el trabajo de cementación. La viscosidad plástica y el punto de cedencia, son propiedades muy importantes para determinar el comportamiento de flujo de la lechada de cemento durante la operación de bombeo hacia el pozo. Una lechada con un valor bajo de viscosidad tiende a desarrollar demasiada agua libre cuando permanece estática, lo que provoca un asentamiento excesivo de las partículas sólidas de cemento; en caso contrario, cuando la lechada tienen un valor alto de viscosidad, se dificulta la operación de bombeo, requiriéndose mayor potencia de las bombas e incrementándose las caídas de presión por fricción. Mientras que, el punto de cedencia nos indica la magnitud de fuerza requerida para mover una lechada en estado de reposo, por lo que es recomendable tenerlo en un valor bajo. Es necesario controlar los parámetros indicados, mediante la variación de la cantidad de agua de mezclado o con el uso de aditivos químicos, con el fin de alcanzar flujo laminar por el interior de la tubería y flujo turbulento o tapón a través del espacio anular, entre agujero y tubería; es lo recomendado para remover el enjarre del lodo de perforación formado en las paredes del pozo, logrando así, tener una mejor adherencia del cemento con la formación, además de evitar problema de canalización y migración de fluidos entre formaciones. Para determinar las propiedades reológicas de la lechada de cemento, se debe utilizar en equipo con las siguiente características: viscosímetro rotacional capaz de medir esfuerzos de corte contra velocidad de corte en un intervalo cercano a cero 1/seg hasta 511 1/seg; los equipos que proporcionen menos de cinco lecturas en ese intervalo de velocidad de corte no podrán utilizarse. Hay que tener presente que una lechada se comporta como un fluido No Newtoniano, es decir, el esfuerzo de corte no es proporcional a la velocidad de corte, como sucede con un fluido Newtoniano.

◆ **Densidad de la lechada.**

Esta es una de las propiedades más importantes de una lechada de cemento, debido a que de su magnitud dependerá la carga hidrostática que se ejercerá sobre la formación. El valor de la densidad obtenida en laboratorio, deberá compararse con el valor calculado en el diseño de la lechada de cemento. Si este valor no se encuentra dentro de la tolerancia adecuada, se tendrá que rediseñar la lechada de cemento, tomando en cuenta las posibles modificaciones en las demás propiedades físicas de la lechada. La densidad de la lechada de cemento debe determinarse mediante el uso de una balanza de todo, descrita en el API-RP-13B : Procedimiento Estándar para Pruebas a Fluidos de Perforación, siguiendo el procedimiento recomendado.

A continuación se presenta en forma resumida, en la tabla 3.1, el equipo utilizado para la evaluación física y química del cemento, en laboratorio, además de los procedimientos de prueba aplicados para cada determinación

Prueba Realizada	Equipo Utilizado	Procedimiento Aplicado
Tiempo de Espesamiento	-Consistómetro atmosférico -Consistómetro presurizado	-API Spec 10
Pérdida de Agua	-Filtro prensa, se usa malla 325	-API Spec 10
Resistencia a la Compresión	-Molde de curado de 2 x 2 pg, cámara de curado, prensa hidráulica -Analizador ultrasónico	-API Spec 10 -Rao <i>et al.</i> , 1982
Comportamiento Reológico	-Viscosímetro rotacional (Couette) -Viscosímetro rotacional (Searl) -Reómetro de flujo en tubería	-API Spec 10 -Orban and Parcevaux, 1986 -Bannister, 1978

tabla 3.1. Pruebas aplicadas a cementos utilizados en pozos petroleros (continúa).

tabla 3.1 Continuación.

Prueba Realizada	Equipo Utilizado	Procedimiento Aplicado
Agua Libre	-Probeta graduada de 250 ml.	-API Spec 10
Expansión	-Barra moldeada -Manga cilíndrica	-ASTM C 151 -Spangle, 1983
Composición Mineralógica	-Método químico por vía húmeda, XRD*, XRF*, AA*, o ICP*, aplicando ecuaciones de Bogue	-Aldridge, 1982
Blaine	-Permeabilímetro Blaine -Turbidímetro Wagner -BET* -Dispersión de luz láser	-ASTM C 204 -ASTM C 115 -Brunauer, <i>et al.</i> , 1938 -Wertheimer y Wilcock, 1976
Gravedad Específica	-Matraz Le Chatelier -Picnómetro	-ASTM C 188 -ASTM C 114
Análisis Químico Vía Seca	-Espectrofotometría de absorción UV* -XRD, XRF -Microscopio óptico	-ASTM C 114 -Simpson, 1988 -Reeves <i>et al.</i> , 1983
Análisis Químico Vía Húmeda	-Método químico vía húmeda -AA, ICP	-API RP 45 -Simpson, 1988

*

XRD Difracción de Rayos-X
XRF Fluorescencia de Rayos-X
BET Brunauer/Emmett/Teller
UV Ultra Violeta
AA Absorción Atómica
ICP Emisión de Plasma

3.4 Resultados de Pruebas Realizadas en Laboratorio

Los valores que se presentan a continuación, son el resultado de pruebas de evaluación y análisis de una muestra de cemento clase H, de fabricación nacional. Las pruebas de evaluación del cemento fueron realizadas por personal de la Compañía Cementera fabricante, en su Laboratorio de Control de Calidad, bajo la supervisión y certificación de personal del Instituto Mexicano del Petróleo, perteneciente a la Gerencia de Ingeniería de Producción. Las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 contienen los resultados de la determinación del análisis químico, mineralógico y físico, respectivamente, aplicado a la muestra de cemento clase H.

Análisis Químico	
Determinación	% en peso
Pérdida por Ignición	1.26
SiO ₂	19.67
Al ₂ O ₃	3.72
Fe ₂ O ₃	4.68
CaO c.	64.29
CaO libre	1.03
MgO	1.33
SO ₃	3.18
Na ₂ O	0.07
K ₂ O	0.38
Residuos Insolubles	0.35
Suma	99.96
Alcalis Totales	0.32

tabla 3.2. Resultados de análisis químico a muestra de cemento clase H.

Determinación	% en peso
C ₃ S	71.48
C ₂ S	2.50
C ₃ A	1.94
C ₄ AF	14.23
CaSO ₄	5.41

tabla 3.3. Resultados de análisis mineralógico a muestra de cemento clase H.

Análisis Físico	
Determinación	
Blaine (cm ² /g)	2680
Tamaño de Partícula (micras)	19.0
Requerimiento de Agua (%)	39.5
Viscosidad Plástica (cp)	130.5
Punto de Cedencia (lbf/100pie ²)	104.5
Agua Libre (ml)	0.2
Tiempo Bombeable (min)	50
Resistencia a la Compresión a 60 °C en 8 horas (lb/pg ²)	3491

tabla 3.4. Resultados de análisis físico a muestra de cemento clase H.

**EL CONOCIMIENTO ES EL TESORO;
PERO EL JUICIO ES EL TESORERO DEL HOMBRE SABIO.
EL QUE TIENE MÁS CONOCIMIENTO QUE JUICIO
HA SIDO HECHO PARA SERVIR A OTROS MÁS QUE A SÍ MISMO.**

CAPÍTULO 4

ESPECIFICACIONES DEL CEMENTO

4.1 Comportamiento de las Estructuras Cristalinas

El estudio de las características de las estructuras cristalinas de un cemento puede ayudar a determinar fallas en las materias primas utilizadas y en las condiciones de calcinación y enfriamiento empleadas, durante el proceso de fabricación.

Se presentan muy frecuentemente variaciones en los procesos de fabricación específicos de cada compañía cementera (características de las materias primas, condiciones del horno y diseño específico de la planta). Todas estas variaciones pueden afectar el comportamiento del cemento, en cuanto a: tiempo bombeable, sensibilidad de retardamiento, desarrollo de resistencia a la compresión, resistencia al ataque de los sulfatos, compatibilidad y respuesta a los aditivos químicos.

Cuando se presentan estructuras cristalinas de Alita (C_3S) y Belita (C_2S) bien formados y distribuidos en proporciones equilibradas, con una cantidad adecuada de la fase líquida y ligera presencia de Aluminato Tricálcico, tendremos una respuesta satisfactoria del cemento solo y en presencia de aditivos utilizados en la cementación.

A continuación se presenta en la figura 4.1, una fotografía microscópica donde pueden ser apreciados cristales de Alita (C_3S), en cantidad predominante.



fig. 4.1. Fotomicrografía de cristales de Alita (tamaño real 0.21 x 0.21 mm).

En cementos con altos contenidos de Aluminato Tricálcico (C_3A), visibles en la fase líquida (C_4AF), tendremos un comportamiento de tiempos de espesamiento cortos.

Al tener presentes cristales pequeños de Alita (C_3S), cristales grandes de Belita (C_2S), con ligera presencia de Aluminato Tricálcico (C_3A) y Cal libre (CaO libre), tendremos un cemento con un tiempo de espesamiento prolongado, rápida velocidad de desarrollo de resistencia a la compresión y fácil de retardar.

Cuando la característica cristalográfica de nuestro cemento sea el tener nidos de cristales de Belita (C_2S), el comportamiento que tendremos será, tiempo de espesamiento prolongado, disminución de la resistencia a la compresión y respuestas no satisfactorias con los aditivos retardadores de fraguado.

Cementos con pequeños cristales de Alita (C_3S) y altos contenidos de Aluminato Tricálcico (C_3A), nos dan como consecuencia tiempos de espesamiento cortos y dificultad para su retardación.

La fotografía microscópica, que se presenta en la figura 4.2 presenta, al centro y en la parte inferior derecha, cristales de belita, los cuales pueden ser identificados de acuerdo a sus características.



fig. 4.2. Fotomicrografía de cristales de Belita (tamaño real 0.21 x 0.21 mm).

El tener un cemento con cristales pequeños de Alita (C_3S), propicia una rápida hidratación.

Al presentarse cristales pequeños de Alita (C_3S), de color café o gris y sin presencia de Aluminato Tricálcico (C_3A), se tendrá un comportamiento de tiempo de espesamiento prolongado y facilidad para su retardamiento.

El tener como característica cristalográfica cristales de Alita (C_3S) y Belita (C_2S) pobremente formados, provocará muchos problemas, ya que estos no presentan respuesta satisfactoria a los retardadores de fraguado, ocasionando un comportamiento no predecible y una disminución de la resistencia a la compresión.

Los cementos que contienen gran cantidad de cristales de Belita (C_2S) y fase líquida, presentarán tiempos de espesamiento prolongado, baja velocidad de desarrollo de resistencia a la compresión y fácil de retardar.

El contar con cristales grandes de Alita (C_3S), provoca hidratación muy lenta y comportamiento no predecible.

En la figura 4.3 que se presenta a continuación, podemos observar una sección microscópica donde se ilustra la matriz o fase líquida (C_4AF), circundando cristales de belita.

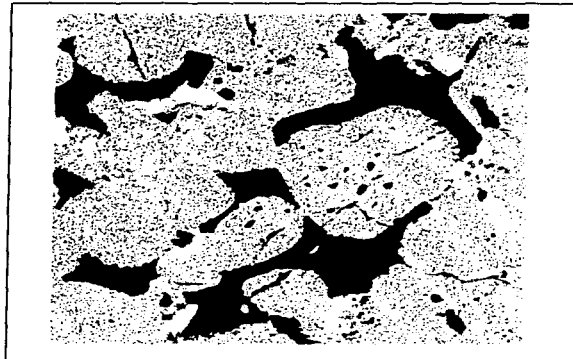


fig. 4.3. Fotomicrografía ilustrando la Matriz (tamaño real 0.21 x 0.21 mm).

Cementos conteniendo humedad o partículas parcialmente hidratadas en el clinker, tendrán un comportamiento errático de tiempo de espesamiento.

El componente conocido como cal libre u óxido de calcio (CaO libre), cuya presencia en el cemento se ha definido como un compuesto indeseable, se ilustra en la figura 4.4 presentada a continuación, donde se puede observar una gran concentración de CaO libre en la parte central de la fotomicrografía.

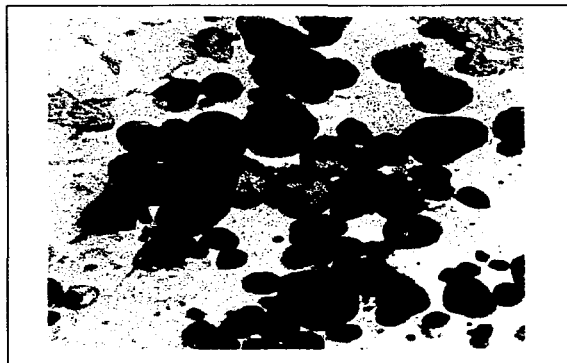


fig. 4.4. Fotomicrografía de cristales de Cal Libre (tamaño real 0.21 x 0.21 mm).

4.2 Problemas Presentes en las Estructuras Cristalinas

Durante el proceso de fabricación del cemento, se llevan a cabo cambios en las estructuras cristalinas de sus cuatro componentes básicos: Silicato Tricálcico (C_3S), Silicato Dicálcico (C_2S), Aluminato Tricálcico (C_3A) y Aluminoferrita Tetracálcica (C_4AF). El comportamiento físico y químico de las estructuras internas del cemento, depende principalmente de: las características de las materias primas empleadas, las condiciones del horno utilizado, la velocidad de enfriamiento del clinker y la molienda final del cemento.

La estructura cristalina de la Alita (C_3S), presenta de forma predominante los siguientes problemas: tamaño grande o pequeño de los cristales, cristales fundidos o carcomidos y deformación de los bordes de los cristales.

Los cristales grandes de Alita (C_3S), provocan que se tengan largos tiempos de espesamiento en los diseños de las lechadas de cemento y los cristales pequeños, provocan tiempos de espesamiento cortos. El tener cristales de Alita, grandes o pequeños, es el resultado de tener variaciones en el tiempo de residencia del material crudo en el horno, en los rangos de temperatura de formación de la estructura cristalina de C_3S (1300 - 1500 °C). Tiempos grandes de residencia en el horno a temperatura máxima de calcinación, llevará al desarrollo de cristales grandes.

El tener cristales de Alita (C_3S), fundidos o carcomidos, llevará a un comportamiento negativo del cemento, provocando que se tenga una inconsistencia en la sensibilidad de retardación y un comportamiento no predecible, además no repetitivo de prueba a prueba, en los diseños de lechadas de cemento. Esta formación cristalina es causada por un prolongado tiempo de calcinación a temperaturas altas (1750 °C).

Cuando se presentan cristales de Alita (C_3S), con franjas de Belita (C_2S), o deformación en sus bordes, las lechadas de cemento tienden a presentar un incremento en su viscosidad plástica. Este problema presente en la estructura cristalina, es el resultado de un enfriamiento muy lento del clinker o bien de una reducción de la temperatura de calcinación en el horno.

La estructura cristalina de la Belita (C_2S), presenta como principal problema, el afectar la reacción del cemento cuando se tiene la presencia de cristales de Belita agrupados y en mayor abundancia que las Alitas. Este problema es causado principalmente por la existencia de grandes granos de sílice de cuarzo en la mezcla cruda.

El tener un alto contenido de Aluminato Tricálcico (C_3A), es el mayor problema que se presenta con esta estructura cristalina, debido a que propicia el ataque de los sulfatos y por consiguiente, tiempos de espesamiento cortos. La problemática que presenta este componente es originada por la disminución gradual que se lleva a cabo durante el proceso de enfriamiento del clinker al salir del horno. El problema se acentúa entre más lento sea el proceso de enfriamiento.

Un alto contenido de Cal Libre (CaO libre), presente en las estructuras cristalinas, provoca gelificaciones prematuras y hace más difícil la retardación en los diseños de lechadas de cemento. El problema anterior es provocado, por la inapropiada selección de las materias primas utilizadas para la elaboración de la mezcla cruda o de un inadecuado proceso de fabricación durante la calcinación.

Además de los problemas habituales presentes en la estructura cristalina, de los que ya se hizo mención, tenemos que citar la problemática que en general representan algunos factores físicos en los que interviene el clinker como son: la velocidad de enfriamiento, la molienda y el almacenamiento.

La velocidad de enfriamiento del clinker influye en la relación entre fase cristalina y vítrea desarrollada de componentes. Por enfriamiento lento, casi todos los componentes cristalizan; mientras que el enfriamiento rápido frena la formación de cristales, por ello, una parte de la semifusión se solidifica en estado vítreo, además de impedir el crecimiento de los cristales. El enfriamiento lento promueve el crecimiento de los minerales que componen al clinker. El enfriamiento rápido influye especialmente sobre el comportamiento del óxido de magnesio y con ello, sobre la estabilidad del volumen de cemento desarrollado durante el periodo de endurecimiento de la lechada. Cuanto más rápido es el enfriamiento del clinker, de menor cantidad serán los cristales de periclasa (óxido de magnesio), que hayan podido formarse a partir de la calcinación, por lo que, menor resultará la influencia de este componente en la expansión del cemento después de fraguado.

La molienda del clinker, se da para obtener una área de superficie específica o fineza determinada. El área de superficie específica es inversamente proporcional al agua libre, esto es, que un área de superficie específica baja proporciona como resultado altos porcentajes de agua libre. El contenido de agua libre debe ser controlado (utilización de aditivos), si esto no se hace, se forman bolsas de agua atrapadas en la columna de la lechada de cemento y el resultado que se tendrá será una pobre cementación.

Es de uso común que el clinker o el cemento, sean almacenados y posteriormente utilizados. Si el almacenamiento se da de forma inadecuada y el clinker o el cemento se exponen a la humedad, tendremos el inicio del efecto de hidratación superficial de las partículas, dándonos como resultado, al momento de la aplicación de la lechada de cemento, tiempos de espesamiento prolongados, así como el producto de un incremento de agua por una hidratación parcial. Cementos intemperizados o hidratados muestran una sensibilidad muy pequeña a la acción de los retardadores de fraguado orgánicos.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.3 Límites Requeridos en Estructuras Cristalinas

Las características cristalográficas que se mencionan a continuación, para cada uno de los componentes principales que conforman al cemento, son las recomendadas para un cemento clase H, de calidad controlada.

◆ **Alita (C_3S = Silicato Tricálcico)**

El porcentaje de este componente debe ser de 58 a 68 %. Los cristales deber presentarse bien definidos, angulosos con formas hexagonales. La estructura cristalina presente debe ser triagonal, monoclinica o triclinica. El tamaño de los cristales debe ser de 25 a 65 micras. La distribución de este componente debe ser homogénea.

◆ **Belita (C_2S = Silicato Dicálcico)**

Este componente debe presentarse en porcentajes de 12 a 18 %. Los cristales deben ser bien definidos, redondos. Las estructuras cristalinas tendrán que ser ortorrómbicas y monoclinicas. Un tamaño de cristales de 20 a 40 micras, es el recomendado. La distribución que presenten los cristales tendrá que ser homogénea.

◆ **Aluminato Tricálcico (C_3A)**

El máximo porcentaje en el que debe presentarse este componente será de 3 %. Porcentajes mayores, producirán en primera instancia un cemento de baja resistencia a los sulfatos, aceleramiento en el tiempo de espesamiento, expansión e incremento en el calor de hidratación. La presencia de esta estructura cristalina en la fase líquida (C_3AF) debe ser mínima. Las estructuras cristalinas deben ser isométricas, ortorrómbicas, tetragonales y monoclinicas. El tamaño de los cristales debe ser de 1 a 10 micras. La distribución de este componente tiene que ser escasa.

◆ **Aluminoferrita Tetracálcica (C₄AF)**

Este componente tendrá que presentar como máximo un porcentaje de 15 %. La Aluminoferrita Tetracálcica por sí sola no tiene una influencia decisiva en las propiedades del cemento. La estructura cristalina de este componente se debe presentar en forma ortorrómbica. La distribución que presenten los cristales tendrá que estar bien distribuida.

4.4 Especificaciones Físicas y Químicas

El American Petroleum Institute (API), ha establecido una normatividad para estandarizar y especificar las pruebas realizadas al cemento utilizado en la Industria Petrolera, en la cementación de pozos, logrando tener con esto, un control de la calidad del cemento. Esta normatividad se ha desarrollado utilizando condiciones promedio de datos tomados de pozos de la parte suroeste los Estados Unidos de América y algunas regiones del Golfo de México. La mayor parte de los cementos empleados en ingeniería petrolera, a nivel mundial, se manufacturan para cumplir con las especificaciones establecidas por el API y aunque esta normatividad es el resultado de extensos e importantes estudios, se han presentado problemas en las operaciones de cementación que son inherentes a la calidad que presenta el cemento.

Las normas permiten establecer las condiciones y requerimientos que deben reunir los cementos durante el proceso de aplicación de lechadas, pero las condiciones de los pozos, las características específicas de fabricación y principalmente las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento, en nuestro país y en otras partes del mundo son distintas a las que se consideraron para establecer la normatividad API.

No se puede opinar a la ligera y decir que la normatividad establecida por el American Petroleum Institute es incorrecta o que no sirve, pero sí que resulta en muchos de los casos, no aplicable a las necesidades particulares de la Industria Petrolera Mexicana. Debido a lo anterior y con base en los hechos, la normatividad desarrollada por el API no ha resultado ser la apropiada, para la aplicación en nuestro país, motivo por el cual se requiere de una normatividad propia, específica y estricta, en la mayoría de los casos.

Con gran inquietud, en el Instituto Mexicano del Petróleo, conjuntamente con Petróleos Mexicanos, preocupados por las enormes variaciones que se presentan en los cementos empleados en la Industria Petrolera y conscientes de la problemática que esto implica, han desarrollado estudios de investigación encaminados a la obtención de resultados que permitan el establecimiento de normas específicas, aplicables a la Industria Petrolera Mexicana, para el control en forma más estricta, de la calidad de los cementos empleados en pozos petroleros, bajo una amplia variedad de condiciones de presión y temperatura. El resultado de las investigaciones desarrolladas es la "Norma Tentativa para el Aseguramiento de la Calidad del Cemento Empleado en la Cementación y Recementación de Tuberías de Revestimiento, PEMEX-IMP 2/93".

A continuación, en las tablas 4.1 y 4.2, se presentan, en forma comparativa, las especificaciones físicas y químicas respectivamente, establecidas por el API (Specification for Materials and Testing for Well Cements, API SPECIFICATION 10 -SPEC 10) y las especificadas por PEMEX-IMP en nuestro país, para la fabricación de un cemento clase H. Se presenta solamente el cemento clase H, incluso es el recomendado para utilizarse en las practicas actuales de cementación de pozos, debido a que en general, es el que presenta un mejor comportamiento solo y en presencia de los aditivos químicos comúnmente empleados en la Industria Petrolera Mexicana.

Especificaciones Físicas		
Determinación	Especificaciones	
Análisis Físico	PEMEX-IMP	API-SPEC-10
Densidad (g/cm ³)	3.14 ± 0.02	*
Humedad (%)	0.04 mínimo	*
	0.06 máximo	
Área de Superficie Específica (cm ² /g)	2,700 ± 50	*
Tamaño de Partícula (micras)	15 mínimo	*
	25 máximo	
Requerimiento de Agua (%)	38	38
pH de la Lechada de Cemento	11 mínimo	*
Densidad de la Lechada (g/cm ³)	1.98 ± 0.01	*
Agua Libre (ml)	3.5 máximo	3.5 máximo
Tiempo Bombeable en cédula 5 (min)	90 mínimo	90 mínimo
	120 máximo	120 máximo
Propiedades Reológicas:		
-Viscosidad Plástica (cp)	35 mínimo	*
	60 máximo	
-Punto de Cedencia (lb/100pie ²)	65 máximo	*
Resistencia a la Compresión:		
- 8 hrs. a temperatura de 38 °C y presión atmosférica (lb/pg ²)	300 mínimo	300 mínimo
- 8 hrs. a temperatura de 60 °C y presión atmosférica (lb/pg ²)	1,500 mínimo	1,500 mínimo

* No especificadas.

tabla 4.1. Especificaciones del comportamiento físico.

Especificaciones Químicas		
Determinación	Especificaciones	
Análisis Químico	PEMEX-IMP (% en peso)	API-SPEC-10 (% en peso)
Óxido de magnesio (MgO)	2.0 máximo	6.0 máximo
Trióxido de azufre (SO ₃)	3.0 máximo	3.0 máximo
Pérdida por ignición (PI)	1.5 máximo	3.0 máximo
Residuos insolubles (RI)	0.5 máximo	0.75 máximo
Cal libre (CaO)	0.5 máximo	*
Contenido álcalis totales (Na ₂ O)	0.65 máximo	0.75 máximo
Silicato tricálcico (C ₃ S)	65.0 máximo	65.0 máximo
	58.0 mínimo	48.0 mínimo
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	3.0 máximo	3.0 máximo
Aluminoferrita tetracálcica (C ₄ AF)	15.0 máximo	24.0 máximo

* No especificado

tabla 4.2. Especificaciones del comportamiento químico.

**LAS COSAS QUE MÁS TRABAJO
HA COSTADO APRENDER
SON LAS MÁS DULCES DE RECORDAR.**

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al estudio y análisis de las propiedades físicas y químicas del cemento, así como de las características cristalográficas obtenidas durante la fabricación del cemento se concluye y recomienda lo siguiente:

- ◆ La calidad de un cemento dependerá esencialmente de la proporción en que se encuentren sus compuestos y del proceso de fabricación que sea llevado a cabo.
- ◆ El tener un proceso de fabricación del cemento que no es el adecuado, propiciará el desarrollo de cristales mal formados e insuficientes, escasa fase líquida, aglomeración de cristales y un comportamiento no conveniente del cemento solo y en presencia de aditivos.
- ◆ La exposición del cemento a las condiciones ambientales antes de usarse debe ser disminuida para evitar que se presente el fenómeno de aireación, que altera notablemente el comportamiento físico y químico.
- ◆ Se advierte una tendencia a incrementar la perforación de pozos altamente desviados y horizontales, observándose que los cementos actuales utilizados en la cementación de tuberías de revestimiento seguirán teniendo un amplio uso a nivel mundial, en consecuencia es necesario establecer si las normas que los rigen son las adecuadas para las distintas regiones.

- ◆ Es necesario considerar las características físicas y químicas que presentan los cementos, debido a que juegan un papel muy importante en el diseño de lechadas de cemento, esto con el fin de obtener una mejor respuesta del cemento solo y con la adición de aditivos químicos utilizados en la cementación de tuberías de revestimiento.
- ◆ El contar con técnicas microscópicas, encaminadas a conocer el comportamiento físico de las estructuras cristalinas, permitirá detectar y corregir, en su caso, fallas que se presenten durante el proceso de fabricación del cemento, además de advertir la inapropiada selección de las materias primas utilizadas para la elaboración de la mezcla cruda.
- ◆ Las características cristalográficas del cemento, tales como tamaño, forma y distribución de los cristales, tiene gran influencia en el comportamiento físico y químico del cemento solo y en presencia de aditivos químicos.
- ◆ La mayoría de los cementos utilizados en la Industria Petrolera son fabricados para satisfacer los requerimientos de las especificaciones del American Petroleum Institute, y aún así, se han presentado problemas en las operaciones de cementación. Esto último debido a que existen diferencias marcadas en las condiciones de aplicación en otras regiones, con respecto a las que se consideraron para el establecimiento de las normas, por lo que hay que considerar especificaciones propias y específicas.
- ◆ El querer cumplir sólo con los requerimientos físicos y químicos que especifica el American Petroleum Institute, nos llevará a la utilización de un mayor porcentaje de aditivos en la preparación de la lechada de cemento a utilizarse en un pozo, esto como consecuencia de los amplios rangos que se consideran en las especificaciones API. Esta situación conduce al aumento en los costos de la cementación de las tuberías de revestimiento.

- ◆ De acuerdo a los resultados obtenidos se considera conveniente utilizar, cuando sea posible, un cemento clase "H", de alta resistencia al ataque de los sulfatos, con área de superficie específica de $2700 \pm 50 \text{ cm}^2/\text{g}$, que cumpla con las especificaciones de la normatividad establecida por PEMEX-IMP. Esta clase de cemento ha tenido un comportamiento superior al clase "G", lo que implica la utilización mínima de aditivos y coadyuvar en la eliminación de cementaciones defectuosas, parámetros que nos permitirán optimizar costos operacionales.

BIBLIOGRAFÍA

- ◆ API.: "Specification for Materials and Testing for Well Cements (API-SPEC-10)," American Petroleum Institute, 1990.
- ◆ Bensted, J.: "Cements whit a Specific Application - Oilwell Cements," World Cement, Marzo, 1987.
- ◆ Bensted, J.: "Oilwell Cements," World Cement, Octubre, 1989.
- ◆ Bogue, R. H.: "The Chemistry of Portland Cement," Reinhold Publishing Corp., 1947.
- ◆ Campbell, D. H.: "Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker," Construction Technology Laboratories, a Division of the Portland Cement Association, 1986.
- ◆ Cementos Apasco.: "El Cemento," Cementos Apasco, División Sureste, 1991.
- ◆ de Antuñano, M. Y., Escobar, C. J. y Muñoz, H. A.: Informe "Estudio del Comportamiento Físico y Químico Realizado a Seis Muestras de Cemento Nacional y a Cuatro Muestras de Cemento de Importación," IMP, Gerencia de Producción, División de Producción, Marzo de 1992.

- de Antuñano, M. Y., Escobar, C. J. y Muñoz, H. A.: Informe "Norma de Control de Calidad del Cemento," Gerencia de Tecnología de Producción, División de Producción, Agosto, 1993.
- de Antuñano, M. Y., Zavala, Z. B. y Muñoz, H. A.: Informe "Aplicación de la Norma Tentativa de Control de Calidad del Cemento PEMEX-IMP 2/93," IMP, Línea de Estimulación y Cementación de Pozos, Junio, 1996.
- Dirección General de Normas: "Industria de la construcción -Cemento Portland," NOM-C-001-1980.
- Duda, H. W.: "Manual Tecnológico del Cemento," Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona, 1977.
- Fernández, O. A.: "Control de Calidad del Concreto," Departamento de Construcción de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- IMP.: "Diseño de Tuberías de Revestimiento y Cementación," Subdirección de Desarrollo Profesional, 1983.
- IMP.: "Estudio de Técnicas para Cementaciones Primarias," Subdirección de Tecnología de Explotación, 1979.
- IMP.: Informe "Norma Tentativa para el Aseguramiento de la Calidad del Cemento Empleado en la Cementación y Recementación de Tuberías de Revestimiento (PEMEX-IMP 2/93)," Gerencia de Tecnología de Producción, División de Producción, Agosto, 1993.
- La Cruz Azul, S. C. L.: "Exposición Sobre Cementos," La Cruz Azul, S. C. L., 1990.

- **Mueller, D. T., et. al.:** "Portland Cement -Blas Furnace Slag Blends in Oilwell Cementing Applications," Seminario Internacional Practicas de Explotación de Petróleo y Gas, INGEPET'96 (INGP-2-27), Lima, Perú, 1996.

- **Nelson, E. B.:** "Well Cementing," Dowell Schlumberger Educational Services, 1990.

- **Smith, D. K.:** "Cementing," Society of Petroleum Engineers Monograph Series, Volumen 4, 1987.