

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO**



Tesis:

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS CEMENTOS  
USADOS EN OPERACIONES PETROLÍFERAS  
DEL NOROESTE**

PRESENTADA POR:  
**ELIZABETH ZOILA CÓRDOVA HURTADO**

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO DE PETRÓLEO**

Lima – Perú  
1998

# **ANALISIS Y EVALUACION DE LOS CEMENTOS USADOS EN OPERACIONES PETROLIFERAS DEL NOROESTE**

## **1. SUMARIO**

## **2. INTRODUCCION**

## **3. FUNDAMENTO TEORICO**

### **3.1. OBJETIVOS DE LA CEMENTACION DE POZOS**

### **3.2. CEMENTO PORTLAND**

#### **3.2.1. DEFINICION**

#### **3.2.2. PROPIEDADES DEL CEMENTO**

#### **3.2.3. COMPOSICION DEL CLINKER Y ESTRUCTURA DE LOS GRANOS**

#### **3.2.4. PROCESOS DE FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND**

#### **3.2.5. CARACTERIZACION DEL CEMENTO PORTLAND**

### **3.3. HIDRATACION DEL CEMENTO PORTLAND**

## **4. ESPECIFICACIONES API**

### **4.1. TIPOS Y CLASES DE CEMENTOS API**

### **4.2. REQUERIMIENTOS DE LOS CEMENTOS API**

### **4.3. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LOS CEMENTOS**

## **5. CEMENTOS USADOS EN OPERACIONES PETROLIFERAS DEL NOROESTE**

### **5.1. ANALISIS DE LABORATORIO (CARACTERIZACION)**

#### **5.1.1. CEMENTO PACASMAYO**

#### **5.1.2. CEMENTO ATLAS**

### **5.2. COMPARACION CON EL API**

#### **5.2.1. CEMENTO PACASMAYO**

#### **5.2.2. CEMENTO ATLAS**

## **6. EVALUACION DE LECHADAS USADAS EN OPERACIONES DEL NOROESTE**

### **6.1. TIPOS Y PROPIEDADES PRINCIPALES DE LECHADAS DE CEMENTO**

#### **6.1.1. LECHADAS CONVENCIONALES**

#### **6.1.2. LECHADAS MODIFICADAS**

## **7. DISEÑO DE LAS LECHADAS DE CEMENTO**

## **8. CONCLUSIONES**

## **9. RECOMENDACIONES**

## 1. SUMARIO

Este trabajo tiene por finalidad, analizar la calidad del cemento Portland utilizado en la cementación de pozos de petróleo en las operaciones del Noroeste peruano (cemento Pacasmayo y cemento Atlas, y clasificarlo de acuerdo a los requerimientos y especificaciones dadas por el American Petroleum Institute API. Asimismo, evaluaremos las mezclas de cemento usadas para definir si los resultados obtenidos han sido los mejores y si el cemento usado es el apropiado en este tipo de trabajo.

Para lograr los objetivos de este trabajo se ha hecho uso de los laboratorios de las empresas que prestan sus servicios a Petróleos del Perú para este tipo de operaciones; laboratorios localizados tanto en nuestro país como en el extranjero, así como información Técnica relacionada al tema.



## 2. INTRODUCCION

El uso del agua y materiales cementantes para formar un material de cementación empezó hace muchos siglos. La arcilla fue probablemente el primer material cementante usado y es probable que la limonita común haya sido el siguiente.

En la industria del petróleo la cementación de pozos data de 1903, año en que la compañía Unión Oil Co. vació 50 Sx de lechada de cemento dentro de uno de sus pozos en California cerrando una zona de agua (ref. N° 1).

El material usado actualmente es el cemento Portland que es el ejemplo más común de un cemento hidráulico. El cemento Portland es una combinación de calizas (carbonato de calcio) y arcilla (óxidos de silicio, hierro y aluminio) en una proporción aproximada de 2:1, combinación que es calentada a temperaturas de 2600 a 3000°F, para iniciar una reacción que dará por resultado la formación de numerosos productos entre los que destacan el aluminato tricálcico, silicato dicálcico, silicato tricálcico y ferro-aluminato tetracálcico; a este material luego se le adiciona de 3 a 5 % de yeso y se pulveriza, obteniéndose el llamado cemento Portland.

Generalmente se recomienda un cemento API clase G ó H para ser usado como un cemento básico para necesidades de cementación de pozos de petróleo, en adición con otros aditivos para modificar las

propiedades de la lechada. En este trabajo trataremos de clasificar tanto al cemento Pacasmayo como al cemento Atlas dentro de los tipos y clases definidos por el American Petroleum Institute (API) y determinar si pueden ser usados como cementos para pozos de petróleo dentro de las condiciones de operación del Noroeste Peruano.

### 3. FUNDAMENTO TEORICO

#### 3.1. OBJETIVOS DE LA CEMENTACION DE POZOS

Dependiendo del tipo de trabajo que se desee realizar las cementaciones de pozos se pueden clasificar en: cementación primaria y cementación secundaria.

##### a) CEMENTACION PRIMARIA

La cementación primaria es una operación importante desarrollada en un pozo; es el proceso mediante el cual, una lechada de cemento es colocada en el espacio anular entre el casing y la formación expuesta (pared del pozo).

Normalmente la máxima presión en el fondo del pozo determinará si un trabajo debe ser desarrollado en una ó en varias etapas.

**Procedimiento de una etapa.-** Con el desarrollo de nuevos cementos de peso ultra ligero, la necesidad para los trabajos multietapas están siendo reducidos. Una larga columna de cemento de baja densidad puede frecuentemente ser colocada en el anular en una etapa, sin riesgo a romper formaciones débiles profundas.

**Procedimiento multietapas.-** La cementación multietapas puede ser conveniente por varias razones:

- En formaciones profundas que no pueden soportar las presiones hidrostáticas ejercidas por una larga columna de cemento.
- En formaciones poco profundas que deben ser cementadas con un cemento no contaminado.
- Cuando no se requiere cemento entre intervalos ampliamente separados.

En general una cementación primaria debe cumplir ciertos objetivos que podríamos resumir de la siguiente manera:

1. Aislar y proteger formaciones que contengan fluidos indeseables (agua y/o gas).
2. Dar soporte al casing de producción.
3. Sellar formaciones con presiones anormales, que podrían con el tiempo ocasionar el colapso del casing.
4. Aislar zonas de pérdida de circulación.
5. Prevenir la migración de fluidos a zonas ladronas ó de baja presión.
6. Crear un sello hidráulico entre las zonas productivas a fin de garantizar el éxito de los trabajos de fracturamiento hidráulico.
7. Proteger el casing de cualquier fluido corrosivo.

## **b) CEMENTACION SECUNDARIA SQUEEZE O REMEDIAL**

Los trabajos de cementación secundaria tienen el objeto de reparar un trabajo de cementación primaria defectuoso para poder continuar con los demás trabajos de completación del pozo.

La cementación secundaria es el proceso mediante el cual, se fuerza una lechada de cemento a través de huecos ó grietas en el casing hacia el espacio anular casing - formación.

Sus principales aplicaciones son para:

1. Reparar un trabajo de cementación primaria que fracasó debido a la canalización ó peso insuficiente de cemento en el anular.

Generalmente, los trabajos de cementación pobres son la causa de costosos trabajos de workover. El lodo de perforación no barrido adecuadamente por el cemento, puede dejar bolsas ó canales de comunicación detrás del casing. Estos canales, mayormente conductivos, pueden ser origen de potenciales problemas durante la vida productiva del pozo, debido a que la depletación del reservorio recae en un inusual esfuerzo geológico sobre la formación, el cemento y el casing; causando fallas en las cementacio-

nes y por consiguiente comunicación entre zonas ( fig. N° 3.1).

Estos canales deben ser cementados usando técnicas de cementación forzada (squeeze) a alta presión ó a baja presión. A baja presión sólo conectando canales a la zona permeable que será cementada.

Los squeeze a alta presión pueden mejorar el llenado de cemento por fractura (desgaste) de las paredes débiles en el fraguado.

2. Sellar zonas productoras de fluidos indeseables (agua y/o gas). El procedimiento usual es el tapar todas las perforaciones en la zona de petróleo, agua y gas y luego reperforar en el intervalo más pequeño de producción (fig. N° 3.2)
3. Reparar casings corroídos ó agrietados. Los casings rayados pueden ser el resultado de la corrosión, hendidura ó juntas falladas. El objetivo es colocar cemento en y alrededor del hueco con el casing. Esta operación es usualmente desarrollada a muy baja presión para no extender el daño.

4. Tapar toda ó parte de una ó más zonas en un pozo de inyección multizonas, así como para dirigir la inyección en un intervalo deseado (fig. N° 3.3).
5. Tapón y abandono de una zona de producción depletada ó zona de producción de agua. Este trabajo es usualmente desarrollado a baja presión para evitar dañar una zona la cual puede ser económicamente explotable en el futuro.

## **3.2. CEMENTO PORTLAND**

### **3.2.1. DEFINICION**

El cemento portland es el ejemplo más común de un cemento hidráulico usado en la industria del petróleo.

El cemento portland es básicamente un compuesto que está formado por calizas (carbonato de calcio) y arcillas ó esquistos (pizarras cristalinas, cuarzos con micas, clorita ó talco), en una proporción de 2:1 y luego son calentados en un horno rotario a temperaturas que van desde los 2,600°F a 3,000°F. La mezcla es calentada para iniciar la reacción química entre la caliza y las arcillas. Numerosos productos son formados como resultado de ésta reacción, y la mezcla combinada de esos productos es llamada "clinker" del cemento. El clinker es luego enfria-

do, y una pequeña cantidad de yeso (3% - 5%) es adicionada. La mezcla ya pulverizada es el llamado "Cemento Portland".

### **3.2.2. PROPIEDADES DEL CEMENTO**

Las propiedades requeridas de la lechada de cemento ó fraguado varían de acuerdo a los objetivos del trabajo de cementación. Así para un trabajo de casing, el cemento debe:

1. Producir una lechada de densidad dada mientras aún exhiba las propiedades deseadas.
2. Ser fácilmente mezclado y bombeado.
3. Encontrar las propiedades reológicas óptimas requeridas para remover el lodo
4. Mantener las características físicas y químicas durante el desplazamiento.
5. Ser impermeable al paso de gas por el anular, si se presenta, mientras esté fraguando.
6. Desarrollar una rápida resistencia una vez que éste haya sido colocado.
7. Desarrollar suficiente esfuerzo en un largo plazo aunque se contamine por el lodo.



8. Desarrollar resistencia a la adherencia entre el casing y la formación.
9. Tener la más baja permeabilidad posible.
10. Mantener las cualidades expuestas en los puntos 7, 8 y 9, bajo condiciones severas de presión y temperatura.

### 3.2.3. COMPOSICION DEL CLINKER Y ESTRUCTURA DE LOS GRANOS

La mezcla de las calizas y arcillas en una proporción de 2:1, ya sea por vía húmeda o seca, que luego de ser llevados a un horno rotario en el que la mezcla se funde a temperaturas que van de 2,600 - 3,000° F, dan por resultado un producto llamado **Clinker del cemento Portland**.

En el clinker se identifican cuatro componentes principales según el componente activo presente en el cemento

**Aluminato tricálcico ó Alita ( $C_3A$ )**. Está formado por la combinación de  $3CaO$ ,  $Al_2O_3$  y  $Al_2O_3$ . Aunque el  $C_3A$  no contribuye grandemente a la resistencia final del cemento fraguado, éste fragua rápidamente y juega un rol importante en el temprano desarrollo a la resistencia.

Este tiempo de fraguado puede ser controlado por la adición de yeso.

El producto final hidratado del  $C_3A$  es atacado por agua sulfonada, y para que sea reconocido como un cemento de alta resistencia al ataque de los sulfatos (HSR), el contenido del  $C_3A$  debe ser menor al 3%.

**Silicato tricálcico ( $C_3S$ ).** Está formado por  $3CaO$  y  $SiO_2$ .

Este es el mayor componente del cemento portland, constituye de 40% - 45% del total en cementos retardados y de 60% - 65% del total en cementos de temprana pero alta resistencia. El  $C_3S$  contribuye grandemente a todas las etapas de resistencia desarrolladas, pero especialmente sobre las primeras.

**Silicato dicálcico ó Belita ( $C_2S$ ).** También producido por la reacción entre  $2CaO$  y  $SiO_2$ , es muy importante para el esfuerzo final del cemento. Debido a que el  $C_2S$  se hidrata lentamente, este no influye en el tiempo inicial de fraguado del cemento.

**Ferro-aluminato tricálcico ( $C_4AF$ ).** Está formado por  $4CaO$ ,  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ . éste contribuye a la resistencia del cemento. Para cementos de alta resistencia al ataque de los sulfatos, las especificaciones API manifiestan que la suma

del contenido de  $C_4AF$  más dos veces el contenido de  $C_3A$  no debe exceder al 24%.

En adición a estos cuatro componentes básicos encontrados en el clinker, el cemento portland en su forma final puede contener yeso, sulfatos, álcali, magnesio, limo libre y otras mezclas. A concentraciones normales estos materiales no afectan significativamente las propiedades del fraguado del cemento, pero ellos influyen en el rate de hidratación, resistencia a los ataques químicos y propiedades de la lechada.

La estructura de los granos del clinker varía de acuerdo a la materia prima, el tamaño de sus partículas y los procesos de calcinado y enfriado. Estas variaciones afectan la cristalización de los componentes finales y la porosidad de los granos del clinker. En general, el  $C_3S$  ó alita, el mayor componente de los granos del clinker, cristaliza como partículas angulares. El  $C_2S$  ó belita, cristaliza de tamaño más pequeño, las partículas más redondas, están distribuidas en medio de las partículas de  $C_3S$ . El  $C_4AF$  forma una fase intersticial dentro de la estructura de los granos del clinker. (fig. N° 3.4).

La distribución del área superficial de los diferentes componentes es importante en la determinación de las propiedades de un cemento (fig. N° 3.5).

#### **3.2.4. PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND**

Es el proceso mediante el cual la materia prima es molida, mezclada y sujeta a altas temperaturas para producir compuestos óxidos, que cuando son hidratados desarrollan propiedades cementantes.

##### **MATERIA PRIMA**

Dos tipos de materiales son necesarios para preparar la mezcla que producirá el cemento portland:

- a) **Materiales calcáreos.** Estos materiales contienen carbonatos de calcio ú óxidos de calcio. Los más importantes materiales calcáreos son: limonitas metamórficas y sedimentarias, corales, depósitos de conchas y rocas calcáreas.
- b) **Materiales arcillosos.** Este tipo de materiales incluyen: arcillas, que son materiales terrosos, plásticos cuando se encuentran húmedos, pero, duros cuando están

quemados. Están compuesto principalmente de hidróxido de calcio, silicato y otros minerales.

Cuando se selecciona la materia prima, es muy importante considerar las impurezas, ya que estas pueden causar efectos significativos en las propiedades del producto final. Estas impurezas pueden ser compuestos de flúor, fosfatos, monóxido de plomo, óxido de zinc y álcalis. Excesiva magnesia ( $> 5\%$ ), puede causar una interrupción del flujo retardando la expansión del fraguado del cemento, condición conocida como "falso fraguado".

La presencia de más de 0.1% de flúor en la materia prima, usualmente como fluoruro de calcio, resulta en un significativo decremento en el esfuerzo del cemento. Los óxidos de plomo y zinc tienen un efecto dañino sobre las propiedades del cemento. El álcali total contenido expresado como óxido de sodio, generalmente no debe exceder el 0.6% debido a que pueden ocurrir reacciones adversas en ciertos tipos de agregados silíceos.

## **ELABORACION DEL CEMENTO PORTLAND**

Antes de calcinar la materia prima en el horno, esta debe ser pulverizada como un polvo fino.

Casi todo el clinker del cemento es producido en un largo horno rotario. El horno rotario está hecho de acero altamente refractario que mide de 3 a 8 metros de diámetro y de 50 a 230 metros de longitud; está equipado con un impulsor eléctrico para rotar de 1 a 3 rpm. Este es un dispositivo caliente ligeramente inclinado hacia la horizontal, de tal manera, que el material es alimentado por la parte superior y viaja lentamente por gravedad para su descarga dentro del enfriador del clinker.

El material viaja a través del horno, las temperaturas se van incrementando y esto da origen a una serie de reacciones como:

a +/- 100°C .. evaporación del agua libre.

a +/- 500°C .. liberación de agua combinada de la arcilla.

a +/- 900°C .. cristalización de productos de la deshidratación de las arcillas y descomposición de carbonatos de calcio.

De 900 a 1,200°C .. reacción entre el carbonato de calcio u óxido de calcio con los aluminosilicatos.

De 1,250 a 1,280°C .. inicio de la formación de líquido.

De 1,280°C a más .. formación de los componentes del cemento.

La calidad del clinker (productos que emergen del horno rotario), depende del rate y método de enfriamiento aplicado.

Un enfriamiento rápido conducirá a la formación de cristales, los cuales dificultarán la molienda del clinker y el fragüe final del cemento desarrollará una alta pero temprana resistencia la cual puede deteriorarse con el tiempo.

Por otro lado, un enfriamiento lento, permitirá la cristalización de los componentes del clinker, lo cual asegura una mejor movilidad y el fragüe final del cemento desarrollará una más alta resistencia a la compresión sobre un largo tiempo.

Luego de enfriado el clinker, este es llevado a una molienda tipo bola. Durante el proceso de molienda una cierta cantidad de yeso es adicionada (3 - 5%). El yeso previene el rápido fraguado del cemento y a la vez controla el óxido de calcio libre. Esto da lugar al llamado cemento portland.

El cemento es luego muestreado, analizado y almacenado en silos.

Para la elaboración del clinker del cemento portland se pueden seguir dos procesos, el proceso seco y el proceso húmedo.

### **1.- Proceso seco.**

El proceso seco es más barato que el proceso húmedo pero no tan fácilmente controlado.

En el proceso seco la materia prima es molida y seca en un desecador rotario para obtener la correcta composición del volumen y luego molida en un molino de tubos consistente de un cilindro de acero el cual contiene bolas de acero u otra molienda medida. El material molido pasa a través de un clasificador de tamaño neumático, en el cual los materiales molidos son transportados por la velocidad del aire. Las partículas más gruesas son expulsadas por la acción centrífuga. El material molido es almacenado en diversos silos, la composición química varía de silo a silo, por lo tanto el material de diferente silos se mezcla y se lleva a una pulverizadora para obtener la composición deseada. La mezcla es pulverizada en una malla de tamaño 100 - 200 para maximizar el tamaño de las partículas (fig. N° 3.6).



## **2.- Proceso húmedo.**

Este es el proceso más controlable pero requiere del uso de energía extra para vaporizar el agua en el horno.

La materia prima es proporcionada inicialmente en el estado seco. El agua es añadida y la reducción del tamaño de las partículas ocurre en un molino.

La clasificación del tamaño es llevado a cabo por bombeo y la lechada resultante es pasada por un cedazo vibrador. Las partículas gruesas retornan al molino para ser nuevamente procesadas. La lechada es almacenada en depósitos equipados con palancas rotatorias y compresoras de aire de tal manera que la mezcla se agite constantemente para guardar la homogeneidad. Del mismo modo que en el proceso seco, la mezcla es almacenada en silos y varía ligeramente de depósito a depósito, pero, para obtener una composición deseada se pueden mezclar lechadas de diferentes depósitos (fig. N° 3.7).

### **3.2.5. CARACTERIZACION DEL CEMENTO PORTLAND.**

La caracterización del cemento iniciada a comienzos de la década de los 80 está basada en el análisis de laboratorio, el cual permite determinar cualitativa y cuantitativamente la composición química del cemento, así como mediciones físicas tales como área de superficie y distribución del tamaño de las partículas.

Esta caracterización del cemento es un deber en los laboratorios regionales debido a las siguientes razones:

- a) El cemento siendo un material heterogéneo, con una composición multimineralógica es imposible de reproducir de marca a marca o de grupo a grupo.
- b) El envejecimiento del cemento (humedad ó calor durante el almacenamiento ó transporte).

Los análisis que se realizan para determinar la caracterización del cemento, pueden dividirse en análisis físicos y análisis químicos.

#### **A. ANALISIS QUIMICOS.**

Los análisis químicos del cemento se realizan en torno a la determinación directa de las principales fases no

hidratadas: Silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) y otros elementos químicos presentes como Ca, Al, Si, Mg, Na dentro del polvo de cemento.

Existen diversas técnicas para realizar el análisis químico del cemento dentro de las que se pueden distinguir:

- \* Métodos químicos
- \* Métodos espectroquímicos
- \* Métodos termogravimétricos
- \* Métodos de microscopía óptica y electrónica

## **A.1. METODOS QUIMICOS**

Dentro de estos tenemos:

**a. Residuos insolubles.-** Este método está diseñado para determinar las sustancias ácidas insolubles en el cemento.

El procedimiento consiste en que una solución de cemento en HCl es calentada a  $100^{\circ}C$  para luego ser filtrada y colocada en infusión con carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ). El filtro es secado en un horno a

100°C y luego calcinado a 1,000°C por 45 minutos.

El residuo constituido principalmente por silica amorfa libre no debe exceder a 0.75% para las clases A, G y H.

**b. Pérdida por ignición.-** Esta prueba consiste en encender una cantidad de cemento en una tapa calorífica a temperatura controlada. La pérdida es atribuida a cualquier material volátil presente en el cemento (agua y/o dióxido de carbono).

Para cementos de cualquier tipo y clase, el máximo valor de pérdida por ignición es de 3%, de acuerdo a las normas API.

**c. Oxido de calcio libre.-** Determina el contenido de óxido de calcio no combinado ( $\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$ ), presente en una solución normalizada de acetato de amonio. El nitrato de estroncio ( $\text{Sr(NO}_3)_2$ ) es utilizado como acelerador.

d. **Trióxido de azufre.**- Este método determina el contenido de sulfatos presentes en una muestra de cemento.

A una solución ácida de la muestra de cemento se le adiciona cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ). El precipitado formado es incinerado y pesado como sulfato de bario; convirtiéndose éste último en su equivalente a trióxido de azufre mediante cálculos.

## **A.2. METODOS ESPECTROQUIMICOS**

Estos métodos incluyen técnicas que dependen de la interacción de la materia con radiación electromagnética para la determinación de su composición. Entre las técnicas aplicadas tenemos:

a. **Difracción de rayos X.**- Una porción de la muestra, finamente pulverizada es bombardeada por rayos X, a una longitud de onda característica. La difracción que ocurre a diferentes ángulos depende de la estructura cristalina de los diferentes compuestos químicos que forman el material; los cuales, son luego identificados mediante la utilización de pa-

trones estándares y diversos procedimientos de investigación que incluyen la adición del 6% de silicio (Si), como patrón interno de la muestra de cemento, para la determinación de CaO. La identificación del C<sub>3</sub>S y el C<sub>2</sub>S se realiza con el mismo patrón de silicio (6% Si) más la extracción con glicerina más etanol. Para las demás fases restantes se utiliza 2% de silicio junto con la extracción en ácido maleico.

El residuo insoluble de la prueba de disolución selectiva es analizado, mediante esta técnica, para determinar los compuestos presentes en el cemento, diferentes a la fase de los silicatos, especialmente aluminatos (C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF) y sulfatos (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O, CaSO<sub>4</sub> ½ H<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>.K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O).

- b. Espectroscopia de excitación atómica.-** Este método hace posible la determinación de elementos presentes en mayor proporción en el cemento. La técnica utilizada, más comúnmente, es la absorción atómica (ASS); mediante la cual, una solución

acuosa del material de interés, es aspirada dentro de una llama muy caliente (2,000 - 3,000 °F) para producir su atomización. La radiación característica del elemento dado se genera de una lámpara de cátodo hueco y resplandece a través de la llama cuando los cátodos del elemento absorben dicha radiación en proporción a su concentración en solución. Los elementos determinados son: Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Hierro (Fe), Aluminio (Al) y Silicio (Si); los cuales son convertidos a sus correspondientes óxidos:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### **A.3. METODOS TERMOGRAVIMETRICOS**

Estos métodos de análisis están basados en la selección de un parámetro físico de un sistema, para ser medido como una función dinámica de la temperatura.

Los métodos más comunes son:

- a. Análisis termodiferencial.-** Está basado en la medición de las diferencias de temperatura, entre un material de referencia y una muestra de interés, a medida que ambas son calentadas (ó enfriadas) a

una tasa constante. En el estudio del cemento, el mayor interés a sido enfocado a las transiciones de fases a altas temperaturas y en la caracterización de los productos de la hidratación.

**b. Análisis termogravimétrico.-** Sirve para registrar los cambios de peso muy precisos que ocurren cuando se calienta una muestra de polvo.

En esta técnica, la muestra es pesada constantemente a medida que la temperatura se incrementa, proporcionando una señal de pérdida ó ganancia de peso versus la temperatura. Mediante dicha técnica pueden cuantificarse las fases orgánicas e inorgánicas, la pureza y la humedad relativa. El contenido de yeso, sulfato de calcio semihidratado, singenita e hidróxido de calcio, presentes en la muestra de cemento, son determinados por el uso de esta técnica. La pérdida por ignición es obtenida de la pérdida de peso a 1,000°C.



#### **A.4. METODOS MICROSCOPICOS**

Los métodos microscópicos de mayor interés son la microscopía óptica y la microscopía de barrido electrónico (SEM); los cuales permiten la evaluación del cemento usado en la industria petrolera.

**a. Microscopía óptica.-** Permite la determinación de la calidad del cemento, basándose en la estructura de los cristales, así como de la cristalinidad de los minerales que se producen en el transcurso del proceso de formación de las escorias de cemento (clinker) y del producto final (cemento terminado), además de la distribución y proporción de los cristales de alita ( $C_3A$ ) y belita ( $C_2S$ ), los cuales son responsables de los fenómenos de la hidratación y de la temprana y la tardía resistencia a la compresión del cemento.

El estudio de las alitas ( $C_3A$ ), en el cemento Portland, permite determinar el grado de cocción del clinker y/o el grado de tosquedad de la materia prima: las inclusiones de cuarzo (fig. N°3.8) dentro

de un grano de alita revelan una etapa incompleta de la cocción del clinker.

La fig. N° 3.9, muestra una etapa de cocción más completa, donde el  $\text{SiO}_2$  (presente en la materia prima) ha reaccionado con la cal para formar un núcleo de belita dentro de un grano de alita, observándose así la distribución de la fase de los silicatos.

La fig. N° 3.10 muestra cristales agrietados y quebradizos de alita, entre otros, debido a problemas de cocción, los cuales pueden causar una hidratación más rápida; requiriendo así la adición de mayor cantidad de retardador de una determinada lechada.

- b. Microscopía de barrido electrónico.-** Provee la única técnica aceptada para evaluar y controlar la no-homogeneidad de la materia prima del clinker y del producto final (cemento); permitiendo el análisis cualitativo de la formación y composición de las diferentes fases presentes en el cemento. Las especificaciones API prescriben los límites mínimo y

máximo de la cantidad de los diferentes componentes cristalinos.

## **B. ANALISIS FISICO**

**B.1. DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS (PSD).**- Algunas veces llamada fineza, es un parámetro importante con respecto a la reactividad del cemento y reología de la lechada, la cual es controlada por la manufactura del cemento.

Observaciones indican que cementos con reducida distribución del tamaño de las partículas tienden a desarrollar alta resistencia a la compresión.

Regourol (1978) (ref. N° 2) observó que el rate de hidratación es acelerado por el área de superficie alta, pero que era difícil separar los efectos de fineza de aquellos de la composición química. Hunt (1,986) y Hunt y Elspass (1,986) (ref. N°2), trabajando en una selección de cementos de pozos, encontraron una buena correlación entre la fineza de Blaine y el tiempo de espesamiento.

La fineza del cemento es usualmente determinada por turbidez (método Wagner) ó por medida de la per-

meabilidad al aire de una pequeña capa de cemento compactada ligeramente (método Blaine).

El PSD del polvo de cemento es determinada por difracción de los rayos láser. Una pequeña cantidad de cemento anhidro es puesta en suspensión en metanol puro y dispersados ultrasónicamente antes de su medición. El PSD del cemento Portland es usualmente muy amplio, varía de 0.1 a 100 micrones, con un diámetro medio de 15 a 25 micrones.

**B.2. AREA DE SUPERFICIE ESPECIFICA (SSA).**- La relación agua-cemento requerido para las partículas de cemento húmedo y para preparar una lechada bombeable está relacionado directamente con el área superficial del cemento al igual que el desarrollo de la resistencia a la compresión.

El área de superficie específica del cemento, está determinada por el método Blaine, el cual consiste en la medición de la permeabilidad del cemento al aire, por desplazamiento de una columna de aceite. Cabe destacar que este método no es muy relevante, debido a que se asume que las partículas son esféricas y que la

medición es una función de compactación de la capa de cemento. No obstante, este método es utilizado ampliamente en la industria del cemento, una técnica mucho más precisa es la denominada B.E.T. (Brunauer - Enmtt y Taller), basada en la cantidad de gas absorbido en el sólido, previamente desgasificado, a diferentes presiones parciales. El área de superficie específica es calculada de la cantidad de gas necesario para la construcción de una monocapa sobre la superficie. Es de hacer notar que el SSA de un cemento anhidro determinado por el método de B.E.T., se encuentra generalmente en el rango de 0.4 a 1.2 m<sup>2</sup>/g, mientras que en el método de Blaine está entre 0.25 y 0.35 m<sup>2</sup>/g. La tabla N° 3.1 presenta una comparación entre los resultados de SSA, obtenidos por ambos métodos, para diferentes cementos de la misma clase.

### **3.3. HIDRATACION DEL CEMENTO PORTLAND**

Los componentes presentes en el cemento portland son anhidros. Cuando estos entran en contacto con el agua, son atacados formando compuestos hidratados. Los diversos compuestos

del cemento portland manifiestan diferentes cinéticas de hidratación y forman distintos productos secundarios hidratados.

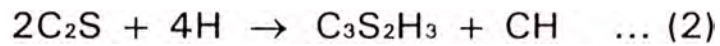
Como se sabe la principal causa de la resistencia deriva de la hidratación de las dos principales fases de los silicatos en el clínker ( $C_3S$  "alita",  $C_2S$  "belita"). La reacción de la belita es probablemente responsable en un largo termino del proceso de endurecimiento. En ambos casos, el producto es una matriz cohesiva que consiste principalmente de silicato de calcio hidratado gel (C-S-H) en compañía de menor cantidad de  $Ca(OH)_2$ . La menor fase de los aluminatos (aluminato tricálcico  $C_3A$  y ferroaluminato aproximado a  $C_4AF$ ) influyen en el fraguado inicial pero no contribuyen significativamente al esfuerzo final de la pasta.

#### **a). Hidratación de la fase de los silicatos**

Las fases de los silicatos en el cemento portland son las más abundantes, con frecuencia comprenden más del 80% del material total. El  $C_3S$  es el principal constituyente, con una concentración tan alta como el 70%; la cantidad de  $C_2S$ , normalmente no excede del 20%.

Como se muestra en las ecuaciones químicas siguientes, los productos de la hidratación para ambas fases son silicatos de calcio hidratados e hidróxido de calcio.





El silicato de calcio hidratado no tiene la composición exacta de  $C_3S_2H_3$ ; en vez, los rates de C:S y H:S son variables dependiendo de factores tales como la concentración del calcio en fase acuosa, temperatura, presencia de aditivos y envejecimiento.

El material es cuasi-amorfo, y es comúnmente llamado gel C-S-H. El gel C-S-H es considerado como el principal responsable del endurecimiento del cemento.

Por contraste el hidróxido de calcio es altamente cristalino y se manifiesta como platos hexagonales. Su concentración en el cemento endurecido está usualmente entre el 15 - 20%.

Después de una rápida hidratación inicial cuando se ha adicionado el agua, la fase de los silicatos experimenta un período de baja reactividad, llamado "período de inducción".

Por lo tanto ellos no influyen significativamente en la reología de la lechada de cemento. El mecanismo de hidratación del  $C_2S$  es muy similar al del  $C_3S$ , además, como el rate de hidratación del  $C_3S$  excede al del  $C_2S$  por un amplio margen, sólo el  $C_3S$  será considerado en esta parte.

La hidratación del  $C_3S$  es un proceso exotérmico. Cinco etapas de hidratación son arbitrariamente definidas.

1.- Período de pre-inducción

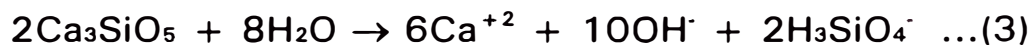
2.- Período de inducción

3.- Período de aceleración

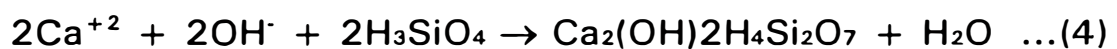
4.- Período de desaceleración

5.- Período de difusión

**Período de pre - inducción.-** El período de pre-inducción dura sólo unos pocos minutos. Una reacción exotérmica es observada en éste tiempo, resultado de poner en contacto el polvo de cemento con el agua. Desde el punto de vista físico, una capa inicial de gel C-S-H es formado sobre la superficie anhidra del  $C_3S$ . Luego ocurre una disolución congruente en la superficie, de acuerdo a la siguiente reacción:



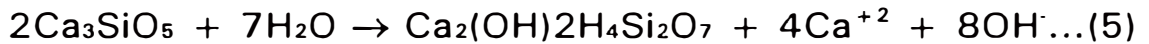
La solución queda sobresaturada muy rápidamente con respecto al gel C-S-H, y una delgada capa de éste es depositada en la superficie del  $C_3S$ .



La ec. 4 asume que el gel C-S-H tiene rates de C:S de cerca de 1.0.



En adición a las ecs. 3 y 4 se produce la siguiente:



Durante este período, la saturación crítica con respecto al hidróxido de calcio no se ha alcanzado; por eso como se indica en la ec. 5, la concentración de limo se incrementa a medida que se alcanza la hidratación continua.

**Período de inducción.-** La impermeabilidad del gel C-S-H provoca un período en el cual, el rate de liberación de calor decae drásticamente. El gel C-S-H adicional es precipitado lentamente, y las concentraciones de  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$  continúan ascendiendo. Cuando la saturación crítica es finalmente alcanzada, la precipitación del hidróxido de calcio empieza. Un reinicio de la hidratación es observada, señalando así el fin del período de inducción.

Los mecanismos de la terminación del período de inducción están aún sujetos a debate entre las químicas del cemento. Muchas teorías han sido propuestas; sin embargo, ellas son frecuentemente más complementarias que contradictorias. Generalmente hablando, ellas caen dentro de una de dos extensas teorías; la teoría de la capa protectora y la teoría de la nucleación retardada.

De acuerdo a la teoría de la capa protectora, la permeabilidad del precipitado inicial del gel C-S-H es muy baja; consecuentemente, la hidratación es inhibida, y un período de inducción tiene lugar. De acuerdo al polvo de cemento, dos estudiosos observaron que una fuerza osmótica es desarrollada dentro de la capa de gel C-S-H como continuación de la hidratación. La capa del gel eventualmente se revienta, resultando en una larga liberación de silicatos dentro de la solución y una masiva formación de gel C-S-H. El otro mecanismo, propuesto por Jong, sostiene que la capa de gel C-S-H experimenta un cambio morfológico, resultando un incremento de la permeabilidad. Consecuentemente el agua penetra la capa y acelera su hidratación.

La teoría de la capa protectora trata de la precipitación del hidróxido de calcio simplemente como una consecuencia de los incrementos del rate de hidratación. De acuerdo a la teoría de la nucleación retardada, el hidróxido de calcio hidratado actúa como un activador para la aceleración de la hidratación.

**Período de aceleración y desaceleración.-** Al final del período de inducción, sólo un pequeño porcentaje de  $C_3S$  es hidratado. Los períodos de aceleración y desaceleración, conocidos

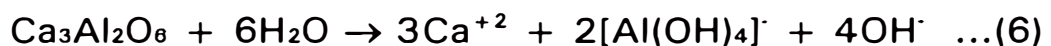
colectivamente como "período de fraguado", representan los períodos de más rápida hidratación. Durante el período de aceleración, los cristales sólidos de  $\text{Ca(OH)}_2$  de la solución y del gel C-S-H se depositan dentro del espacio de agua hinchada disponible. Debido al crecimiento interno de los hidratos, un retículo cohesivo es formado y el sistema empieza a desarrollar una resistencia. La porosidad del sistema decrece como consecuencia de la deposición de hidratos. Eventualmente la transportación de especies iónicas y agua a través de la malla del gel C-S-H es obstruida, y el rate de hidratación decrece. A condiciones ambientales esos eventos ocurren dentro de varios días.

**Período de difusión.-** La hidratación continúa lentamente debido de algún modo al decrecimiento de la porosidad del sistema, los retículos de los productos hidratados se vuelven más y más densos, y la resistencia se incrementa. No hay evidencia de cambios estructurales mayores; sin embargo, la polimerización de los aniones silicato del gel C-S-H está siendo observada. La duración del período de difusión es indefinida a condiciones ambientales.

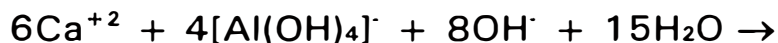
## b). Hidratación de la fase de los aluminatos

La fase de los aluminatos, especialmente el  $C_3A$ , es la fase más reactiva a cortos períodos de hidratación. No obstante, su abundancia es considerablemente más baja que la de los silicatos, ellos tienen una significativa influencia sobre la reología de la lechada de cemento y en el temprano desarrollo de la resistencia. La hidratación del  $C_3A$  es enfatizada en esta sección. La hidratación del  $C_4AF$  es muy similar a la del  $C_3A$ , pero mucho más lenta.

El primer paso de la hidratación, es una reacción interfacial entre la superficie de los sólidos anhidros y el agua; y luego tendremos como resultado la disolución congruente de la superficie.



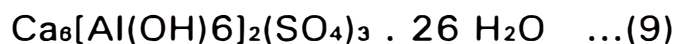
La solución rápidamente se vuelve sobresaturada con respecto a algunos aluminatos de calcio hidratados, gobernando su precipitación.



Estos dos aluminatos de calcio hidratados son metaestables, y se dan como cristales hexagonales. Ellos eventualmente se convierten a una forma cúbica más estable,  $C_3AH_6$ .



La hidratación del C<sub>3</sub>A es controlada por una adición de 3 - 5% de yeso al clinker del cemento antes de la molienda. En contacto con el agua, parte del yeso se disuelve; los iones calcio y sulfato liberados en solución reaccionan con los aluminatos y los iones hidróxido liberados por el C<sub>3</sub>A formando trisulfoaluminato de calcio hidratado; conocido como el mineral "Ettringite".



Como se muestra en la fig. N° 3.11, el ettringite que es un cristal en forma de aguja, se precipita sobre la superficie del C<sub>3</sub>A, impidiendo además su rápida hidratación y creando, por ende, un seudo período de inducción. Durante este período el yeso es gradualmente consumido y el ettringite continua precipitando. La retardación de la hidratación del C<sub>3</sub>A cesa y se reanuda la rápida hidratación, cuando el abastecimiento de yeso ha terminado. La concentración de iones sulfato repentinamente cae. El ettringite se vuelve inestable y se convierte en un escamoso monosulfoaluminato de calcio hidratado.

### c). Hidratación del cemento Portland - Sistema multicomponente

La hidratación del cemento Portland es una secuencia de reacciones químicas entre los componentes del clinker, el sulfato de calcio y el agua, conduciendo al espesamiento y endurecimiento de lechadas de cemento continuas.

Desde el punto de vista químico, la hidratación del cemento Portland es un proceso de disolución/precipitación complejo en el cual, a diferencia de la hidratación de las fases puras individuales, las diversas reacciones de hidratación continúan simultáneamente a diferentes rates.

La hidratación del  $C_3A$  es modificada por la presencia de la hidratación del  $C_3S$ , debido a que la producción de hidróxido de calcio refuerza la acción retardadora del yeso. Ninguno de los minerales del clinker están puros. Dependiendo de la composición de la materia prima, cada óxido contiene materiales extraños en solución sólida los cuales alteran su reactividad.

Los productos de la hidratación son también impuros.

El gel C-S-H incorpora una significativa cantidad de aluminio, fierro y azufre, mientras que el ettringite y la fase de los monosulfoaluminatos contienen silicio. El hidróxido de calcio

también contiene pequeñas cantidades de iones extraños, principalmente silicatos.

Un típico termograma esquemático de la hidratación del cemento Portland es mostrado en la fig. N° 3.12. Este puede ser descrito aproximadamente como la adición de los termogramas para el  $C_3S$  y para el  $C_3A$ , ajustados para concentraciones relativas.

### **Cambios de volumen durante el fraguado**

Cuando el cemento Portland reacciona con agua, el sistema cemento-agua experimenta una disminución del volumen neto. Esta es una disminución del volumen absoluto, y sucede porque la densidad absoluta del material hidratado es mayor que la de los reactantes iniciales. La tabla N° 3.2 muestra el cambio de volumen con el tiempo para varios cementos Portland.

A pesar de las disminuciones externas del fraguado de cemento, el volumen de la masa permanece constante ó ligeramente incrementado y la porosidad interna del sistema se incrementa.

En las cercanías confinadas de el wellbore, el decremento en volumen absoluto puede afectar la transmisión de la presión

hidrostática a la formación, y puede afectar la estabilidad del cemento para prevenir la migración de fluidos en el anular.

### **Efectos de la temperatura**

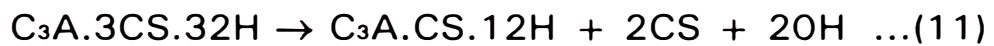
La temperatura es uno de los mayores factores que afectan a la hidratación del cemento Portland. El rate de hidratación del cemento y la naturaleza, la estabilidad y morfología de los productos de la hidratación son fuertemente dependiente de éste parámetro.

La elevada temperatura de hidratación del cemento como se ilustra en las curvas calorimétricas (fig. N° 3.13) , la duración del período de inducción y fraguado es mucho más alto. De cualquier modo, sobre el curado extendido, el grado de hidratación y la resistencia final son frecuentemente reducidas.

Sobre los 104°F, los productos de la hidratación son los mismos que aquellos que ocurren a condiciones ambientales. Ciertos cambios ocurren en las microestructuras y morfología del gel C-S-H a altas temperaturas, el material se vuelve más fibroso e individualizado, y a alto grado de silicatos la polimerización es observada. A temperaturas de curado excedentes a 230°F (110°C), el gel C-S-H no es ampliamente estable, y los cristales de silicato de calcio hidratado están eventualmente formados.



La conversión de hidratos de aluminio de la forma hexagonal a la forma cúbica, es fuertemente acelerada por la temperatura. Sobre los 176°F (80°C), el C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> está directamente formado. La conducta de los sulfoaluminatos depende también de la temperatura de curado. Sobre los 140°F (60°C) el ettringite no es fuertemente estable, se descompone a monosulfoaluminato de calcio y yeso.



De cualquier manera, otros investigadores dan límites de alta estabilidad para el ettringite, sobre los 230°F (110°C). El monosulfoaluminato de calcio es reportado para ser estable sobre los 374°F(190°C).

### **Fraguado instantáneo**

Cuando el clinker del cemento Portland está compuesto solamente de sedimentos (sin yeso) y mezclados con agua, el C<sub>3</sub>A reacciona rápidamente, la temperatura se incrementa marcadamente y un endurecimiento irreversible se produce seguido rápidamente por un pseudo fraguado. Este fenómeno es llamado fraguado instantáneo (flash set) o algunas veces llamado fraguado rápido.

El flash set puede ocurrir aún si la cantidad de yeso en el cemento es insuficiente con respecto a la reactividad del clínker. Desafortunadamente no existe una regla simple para determinar la cantidad óptima de yeso, esta depende de una variedad de parámetros, incluyendo la distribución del tamaño de las partículas, el álcali y el contenido de la fase de los aluminatos.

El yeso puro puede experimentar a ciertas temperaturas críticas, un proceso de deshidratación. Durante este último, el yeso pierde moléculas de agua, transformándose en otros tipos de sulfatos. Lo dramático de esta transformación se intuye a partir de la tabla N° 3.3.

Como puede observarse, unido a la deshidratación del yeso va ligado un incremento de solubilidad; la solubilidad del semihidratado es aproximadamente tres veces la solubilidad del yeso. Este aumento de solubilidad es responsable del falso fraguado ó fraguado del yeso; que es un fraguado, que a nivel de laboratorio, aumenta la energía de la mezcla, y la lechada recobra sus propiedades de bombeabilidad. Sin embargo, a nivel de operaciones de campo pudiese causar graves problemas, incluyendo el fracaso de una operación, debido a los volúmenes involucrados en su manejo.

La transformación del yeso en semihidratado incluso puede acontecer durante la molienda del clinker, en la cual se desarrollan altas temperaturas. Se ha demostrado en pruebas de laboratorio que moliendo por 30 min (en molinos de laboratorio sin ventilación), 20% del yeso se transforma en semihidratado. Este factor de deshidratación, unido a la humedad y a otras inclemencias a la que sometemos al cemento, causan dificultades.

### **Efectos de envejecimiento**

La performance del cemento Portland puede estar afectada significativamente por la exposición a la atmósfera y a altas temperaturas durante el almacenamiento en sacos o silos. El principal efecto en pozos de cementos incluyen lo siguiente:

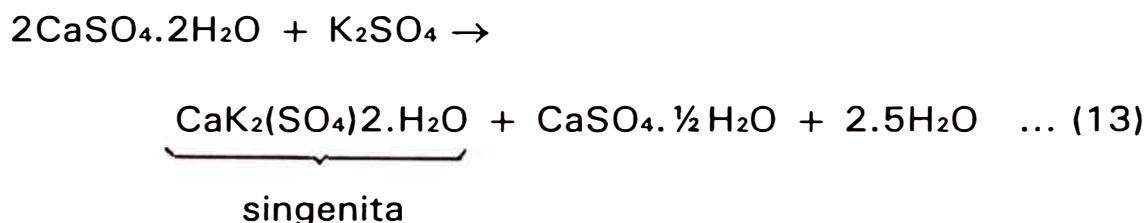
- \* Incremento del tiempo de espesamiento.
- \* Decremento de la resistencia a la compresión.
- \* Decrementos del calor de deshidratación.
- \* Incrementos de la viscosidad de la lechada.

Los efectos son principalmente debido a la carbonatación de la fase del silicato de calcio hidratado y la hidratación parcial del CaO libre. El rate al cual esos procesos suceden esta di-

rectamente referido a la humedad relativa a las cercanías en el almacenamiento.

Cuando el cemento Portland es almacenado en regiones calientes, la temperatura en el silo puede ser suficientemente alta como para resultar en la hidratación del yeso y por lo tanto, este cemento debe estar más apto para desarrollar el fenómeno del false set.

Si una cantidad insuficiente de sulfato de potasio está presente en el cemento como una impureza, éste puede reaccionar con el yeso y dar lugar a la formación de singenita.



El agua liberada durante ésta reacción puede pre-hidratar la fase de los aluminatos. Cuando el cemento es eventualmente hidratado en agua, existe un desbalance entre los aluminatos y los sulfatos y frecuentemente conducen a un false set.

### **Influencia de los álcalis**

Los elementos alcalinos principales encontrados en el cemento Portland son sodio y potasio.

Los efectos del álcali sobre el desarrollo a la resistencia son impredecibles y dependen de un largo número de parámetros significativos. Los álcali han sido señalados para mejorar la resistencia a la compresión, pero a la vez son dañinos. Jawed y Skalny (1,978) demostraron un efecto positivo sobre la temprana resistencia, pero un efecto negativo sobre el largo termino de ésta.

#### **4. ESPECIFICACIONES API**

El American Petroleum Institute, API, es la institución encargada de dictar y reglamentar normas, pruebas y especificaciones para la fabricación de materiales y equipos utilizados en la industria del petróleo.

Las especificaciones API cubren requerimientos para fabricar nueve clases de cementos para pozos y la aplicación del monograma API. Los estándares para aditivos como la bentonita están también incluidos; sin embargo, la aplicación del monograma API no está destinada para aditivos bajo estas especificaciones. Los requerimientos de las pruebas físicas y químicas están también incluidas.

##### **4.1. TIPOS Y CLASES DE CEMENTOS API**

Las especificaciones para cementos de pozos fueron establecidas por el API, debido a que las condiciones para las cuales el cemento Portland está expuesto en los pozos pueden diferir radicalmente de aquellas experiencias en aplicaciones de construcción.

Corrientemente hay nueve clases de cementos Portland API, designados de la A hasta la J. Ellos están ordenados de acuerdo a las profundidades a las que van a ser colocados, y a temperaturas y presiones a las que van a ser expuestos.

**CLASE A.-** Destinado para ser usado desde superficie hasta 6,000 pies de profundidad, cuando no son requeridas propiedades especiales. Disponible sólo en tipo ordinario (similar a ASTM C150, tipo I).

**CLASE B.-** Destinado para ser usado desde superficie hasta 6,000 pies de profundidad, cuando se requieran condiciones de moderada a alta resistencia a los sulfatos. Disponible en ambos tipos, de moderada y de alta resistencia a los sulfatos (similar a ASTM C150, tipo II). Tienen un más bajo contenido de  $C_3A$  que la clase A.

**CLASE C.-** Destinado para ser usado desde superficie hasta 6,000 pies de profundidad, cuando se requieran condiciones de alta y temprana resistencia . Disponible en los tres tipos, ordinario, moderada y de alta resistencia a los sulfatos (similar a ASTM C150, tipo III).

Para obtener una alta y temprana resistencia, el contenido de  $C_3A$  y el área superficial deberán ser relativamente altas.

**CLASE D.-** Destinado para ser usados desde 6,000 hasta 10,000 pies de profundidad, bajo condiciones de moderadamente altas temperaturas y presiones. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**CLASE E.-** Destinado para ser usado desde 10,000 hasta 14,000 pies de profundidad, bajo condiciones de altas temperaturas y presiones. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

**CLASE F.-** Destinado para ser usado desde 10,000 a 16,000 pies de profundidad, bajo condiciones de extremadamente altas temperaturas y presiones. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

Las clases D, E y F son conocidas como "cementos retardadores". La retardación es efectuada por reducción significativa de la cantidad de fases más rápidamente hidratadas ( $C_3S$  y  $C_3A$ ) é incrementando el tamaño de las partículas de los granos del cemento.

**CLASE G.-** Destinado para ser usado como un cemento básico de pozos desde superficie hasta 8,000 pies de profundidad tal como ha sido elaborado; ó puede ser usado con aceleradores y retardadores para cumplir un amplio rango de profundidades y temperaturas de pozo. No debe adicionarse otra cosa que no sea sulfato de calcio ó agua ó ambos que serán molidos ó mezclados con el clinker durante la manufactura de éste. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.



**CLASE H.-** Destinado para ser usado como un cemento básico desde superficie hasta 8,000 pies de profundidad tal como ha sido elaborado ó puede ser usado con aceleradores y retardadores para cumplir un amplio rango de profundidades y temperaturas del pozo. No debe adicionarse otra cosa que no sea sulfato de calcio ó agua ó ambos, que serán molidos ó mezclados con el clinker durante la manufactura de éste. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia a los sulfatos.

La composición química de las clases G y H son esencialmente idénticas; la principal diferencia es el área superficial. La clase H es significativamente más ordinaria que la clase G, como evidencia se tienen sus diferentes requerimientos de agua.

Las clases G y H fueron desarrolladas en respuesta a mejorar la tecnología de las lechadas aceleradoras y retardadoras por medios químicos.

**CLASE J.-** Destinado para ser usado tal como ha sido elaborado desde 12,000 a 16,000 pies de profundidad bajo condiciones de extremadamente altas temperaturas y presiones; puede ser usado con aceleradores y retardadores para cumplir un amplio rango de profundidades y temperaturas del pozo. No adicionar como retardador otra cosa que no sea sulfato de calcio ó agua ó

ambos, que serán molidos ó mezclados con el clinker durante la elaboración de ésta clase.

#### **4.2. REQUERIMIENTOS DE LOS CEMENTOS API**

Las normas API para cementos de pozos incluyen tanto requerimientos químicos como físicos para cada clase definida.

Los requerimientos químicos para cada clase y tipo de cemento se muestran en la tabla N° 4.1.

Los requerimientos físicos de igual modo se muestran en la tabla N° 4.2.

#### **4.3. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LOS CEMENTOS**

Todos los cementos para pozos fabricados bajo estas especificaciones deben cumplir con los requerimientos a cerca de las pruebas de laboratorio a que deben ser sometidas como cementos y como lechadas de cemento.

De acuerdo al estado en que se encuentre la mezcla de cemento, estas se pueden dividir en:

##### **Pruebas para el cemento seco:**

Muestreo

Sonido

fineza

### **Pruebas para lechadas de cemento líquido:**

Densidad de la lechada

Reología

Filtrado

Tiempo de espesamiento

Contenido de agua libre

### **Pruebas para el cemento fraguado:**

Esfuerzo a la compresión

Permeabilidad

## **PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO SECO**

### **Muestreo:**

Para garantizar que una muestra de cemento de pozos sea verdaderamente representativa del lote en cuestión, los siguientes equipos y métodos para muestras de cemento de pozos son recomendados:

### **Equipo:**

- a. Sacked cement. Se deberá usar un tubo muestreador como se ilustra en la fig. N° 4.1.
- b. Cemento a granel. Cualquiera de los siguientes muestreadores deben ser usados:

- Un tubo muestreador, similar al que se ilustra en la fig. N° 4.2, consistiendo en dos tubos telescópicos de bronce pulido. El registrador de ranuras es abierto y cerrado por rotación del tubo interior. El tubo exterior está provisto de una punta para facilitar la penetración.
- Una pequeña cuchara para muestrear durante las operaciones de carga y descarga.

**Procedimiento.**

- a. sacked cement. La muestra de la prueba debe ser enviada al laboratorio rápidamente en un recipiente de prueba de aire limpio, a prueba de humedad. Este recipiente debe estar hecho de un metal ó algún otro material rígido y debe tener una poly-olefine liner para asegurar la máxima protección. No se deben usar sacos de papel ó tela ordinarios. Cada muestra debe ser marcada claramente e identificada completamente en el exterior del recipiente con los datos del origen y día en que se tomo la muestra. Anterior a la prueba la muestra debe ser completamente mezclada y pasada a través de una malla N° 20 (850  $\mu$ m), y llevada a la temperatura del laboratorio. Todos los materiales extraños y bultos que no pulverizan fácilmente deben ser descartados.

- b. "Bulk cement". diversos procedimientos dados en la norma ASTM C 183: Muestreo y Aprobación de Cementos Hidráulicos, deben ser usados para muestrear "bulk cement".

#### **Medida de la muestra.**

La medida de la muestra para llevar a cabo todas las especificaciones de las pruebas es de cerca de 25 libras.

#### **Prueba de Sonido**

La prueba de sonido para cemento de pozos debe ser hecha de acuerdo con los procedimientos de pruebas de la última edición de ASTM C 151: Expansión Autoclave del Cemento Portland.

Los requerimientos aceptados para la prueba de sonido son de 0.80 por ciento. La prueba de sonido no es requerida para la clase de cementos J.

La prueba de expansión en autoclave provee el índice de expansión retardada causada por la expansión del CaO ó MgO ó ambas.

#### **Equipo.**

- a. Vasos graduados, de 200 ó 250 ml. de capacidad y de acuerdo a los requerimientos y especificaciones ASTM C - 490.

- b. Molde, de 1 x 1 pulgada de sección transversal conforme a los requerimientos del ASTM C - 490.
- c. Paleta, la cual posee una hoja de acero de borde recto de 4 - 6 pulgadas de longitud.
- d. Autoclave, consiste de un recipiente a alta presión provisto de un termómetro. La autoclave deberá estar equipada con un control de presión automática y una ruptura de disco con una presión de estallido igual a 350 psi + 5%. En ocasiones donde el uso del disco de ruptura no esta permitido, la autoclave deberá estar equipada con un volante de seguridad. En adición la autoclave deberá estar equipada con una válvula de ventilación para permitir el escape de aire durante la primera parte del periodo de calentamiento y para liberar la presión de vapor remanente al final del periodo de enfriamiento. El indicador de presión deberá tener un dial con un diámetro nominal de 4 ½ " y estar graduado de 0 - 600 psi con divisiones a una escala no mayores a 5 psi.
- e. Disco de ruptura, Deberá estar hecho con un material cuya resistencia a la tensión sea relativamente insensible a la temperatura en un rango de 68 - 420°F (20 - 216°C) y que sea eléctricamente compatible con la tubería principal a éste y a su apoyo.

- f. Longitud de comparación, El comparador usado para medir cambios de longitud de la muestra deberá estar conforme a los requerimientos del ASTM C - 490.

### **Preparación de la muestra de la prueba**

- a. Preparación de la pasta de cemento.

Preparar la carga estándar es mezclar 650 grs. de cemento con suficiente agua para dar una pasta de consistencia normal de acuerdo a los procedimientos descritos en el ASTM C - 305, para mezcla de pastas de cementos hidráulicos y mezclas de consistencia plástica.

- b. Molde de la muestra.

Inmediatamente completada la muestra, moldear ésta en dos capas aproximadamente iguales, cada capa será moldeada con el dedo pulgar para presionar la pasta en las esquinas, alrededor del tornillo de medida, y a lo largo de la superficie del molde hasta que se obtenga una muestra homogénea. Compactar la capa superior, separar la pasta al ras del molde con una paleta delgada y alisar la superficie con unos cuantos golpes de la paleta.

- c. Almacenamiento de la muestra para la prueba.

Después de llenar el molde, colocar éste en un cuarto húmedo, guardar la muestra en el molde en el gabinete húmedo por lo menos 20 horas si es removido del molde antes de 24 horas, ellos deberán ser guardados en el cuarto ó gabinete húmedo hasta antes de la prueba.

### **Procedimiento**

- a. A las 24 horas + 30 min. de vaciada la muestra, removerla de la atmósfera húmeda e inmediatamente medir su longitud y colocarla en la autoclave a la temperatura del cuarto y en un rack de tal manera que los lados de la muestra estén expuestos al vapor saturado. La autoclave deberá contener suficiente agua, a una temperatura inicial de 68 - 82 °F (20 - 28 °C), para mantener una atmósfera de vapor saturado durante la prueba (de 7 - 10% del volumen de la autoclave deberá estar ocupada por el agua).
- b. Para permitir que el aire fugue durante la primera parte del periodo de calentamiento, dejar la válvula de venteo abierta antes de que el vapor empiece a escapar, luego cerrar la válvula y levantar la temperatura de la autoclave un rate el cual llevará la medida de la presión de vapor a 295 psi en 45 - 75 min.



- c. Mantener la presión a  $295 + 10$  psi por 3 horas, luego de las cuales se cerrará el abastecimiento de calor y enfriará la autoclave a un rate tal que la presión no exceda a 10 psi luego de  $1\frac{1}{2}$  horas. Al final de este periodo, liberar lentamente cualquier presión remanente por la apertura parcial de la válvula de venteo antes de llegar a la presión atmosférica.
- d. Abrir la autoclave y colocar la muestra en agua a una temperatura superior a  $194^{\circ}\text{F}$  ( $90^{\circ}\text{C}$ ). Enfriar el agua rodeando la vara a un rate uniforme para adicionar agua fría hasta que la temperatura del agua descienda a  $74^{\circ}\text{F}$  ( $23^{\circ}\text{C}$ ) en 15 min. Mantener el agua rodeando la muestra 15 min. adicionales; luego, secar la superficie de muestra y medir su longitud.

### **Cálculos**

Calcular la diferencia de longitud de la muestra tomada antes y después de colocarla en la autoclave como el porcentaje de medida efectiva de la longitud y reportarla con una aproximación de 0.01%.

Reportar los porcentajes de incremento en la longitud como la expansión en la autoclave. Indicar un decremento en longitud por un signo menos precedido por el valor del porcentaje.

## **Prueba de Fineza**

Este método cubre la determinación de la fineza del cemento Portland representada por la medida calculada de la superficie específica, expresada en  $\text{cm}^2$  o área de superficie total por gramo de cemento usando el turbidímetro Wagner.

### **Equipo**

El turbidímetro Wagner consiste esencialmente de una fuente de luz mantenida a intensidad constante y ajustada de tal manera que los rayos de luz, aproximadamente paralelos, pasen através de la suspensión de cemento a ser probada y chocar en el plato sensible de una celda fotoeléctrica. La corriente generada en la celda es medida por medio de un micrómetro y la lectura indicada es la medida de la turbidez de la suspensión.

#### **1. Turbidímetro**

Montado en una estructura de madera o metal conveniente, el cual consta de:

- a. Fuente de luz. Esta debe consistir de una lámpara de filamento eléctrico concentrado de 3 - 6 candelas, operado por una fuente de emf constante.

Un reflector metálico parabólico, limpio y brillante, rígidamente montado detrás de la lámpara, enfocado de tal manera que los rayos de luz aproximadamente paralelos pa-

sen através del tanque de sedimentación y choquen en la celda fotoeléctrica.

La intensidad de luz deberá ser regulada por dos reostatos de aproximadamente 6 - 30 $\Omega$ , respectivamente.

Los reostatos deberán estar montados en paralelo mutuamente y en serie con la lámpara.

- b. Dispositivo absorbente de calor. La luz deberá pasar através de un dispositivo absorbente de calor conveniente antes de entrar al tanque de sedimentación con el fin de que el calor radiante del rayo de luz pueda ser absorbido, el dispositivo podrá ser una celda de agua o un filtro especial de vidrio.
- c. Filtro Retardador. Un filtro retardador de luz u otro dispositivo deberá ser usado para retardar la intensidad de la luz desde 100  $\mu$ A a 20 - 30  $\mu$ A. La intensidad de la luz deberá ser uniformemente retardada sobre el área constante de esa porción de la celda la cual estará expuesta a la luz durante la prueba.
- d. Tanque de sedimentación. Deberá ser construido de un plato de vidrio de  $\frac{3}{16}$ " -  $\frac{1}{4}$ " de diámetro o borosilicato de cemento para vidrio o ambos sellados para formar un tanque rectangular o un tanque de vidrio moldeado de apro-

ximadamente  $\frac{3}{16}$ '' de grosor con superficies planas. Una marca deberá ser colocada en el interior del tanque para indicar un contenido volumétrico de 335 ml., el cual es el nivel al que el tanque será llenado en la prueba.

- e. Celda fotoeléctrica. El medio de medición de la intensidad de la luz deberá ser una celda fotoeléctrica sensitiva conectada directamente a un micrómetro. Una cubierta con una ranura horizontal de  $\frac{1}{2}$ '' de alto por  $1\frac{3}{8}$ '' de ancho se montará sobre la celda fotoeléctrica.
- f. Pantalla. Una pantalla metálica con una ranura de  $\frac{5}{8}$ '' de ancho por  $1\frac{1}{2}$ '' de alto se colocará entre el dispositivo absorbedor de calor y el tanque de sedimentación.
- g. Dispositivo elevador. La fuente de luz, el dispositivo absorbente de calor, la celda fotoeléctrica, el filtro retardador y la pantalla deberán ser montadas sobre un asiento movable el cual podrá ser levantado por dos tornillos principales y ajustado correctamente para que la suspensión del turbidímetro pueda ser detenida a cualquier profundidad deseada.

## **2. Microamperímetro**

Los micrómetros deberán tener un rango de 0 - 50 $\mu$ A.

Microamperímetro digital. Un contador con un rango de 199.9  $\mu$ A será satisfactorio para facilitar la lectura teórica de la operación ( $I_0$ ) fuera de un dispositivo suplementario.

## **3. Fuente de corriente**

Se usará un arrancador de 6 voltios y una batería de iluminación o una fuente de emf. constante para establecer una corriente en la lámpara.

## **4. Dispositivo**

Conforme a los requerimientos ASTM método C - 430 para prueba de fineza del cemento hidráulico.

## **5. Equipo Agitador**

Puede consistir de una escobilla cilíndrica de  $\frac{7}{4}$ " de diámetro y de  $1\frac{3}{4}$ " de longitud, con un final adecuado al contorno de un botón de  $\frac{7}{8}$ " de diámetro del tubo de prueba el cual deberá rotar a una velocidad de 3 500 rpm o cualquier otro dispositivo que sea igualmente eficiente en dispersión como medida para determinar la superficie específica de una muestra estándar.

## **6. Regulación de la bureta**

El tiempo de sedimentación para las diferentes partículas mezcladas deberá ser obtenido por el uso de una bureta por la cual el kerosene pueda fluir.

### **Procedimiento**

- a. Colocar la muestra de cemento en el tubo de prueba junto con 10 - 15 ml. de kerosene y 5 gotas de agente dispersante (ácido oleico o aceite de linaza viejo).
- b. Mover la muestra por un minuto y luego transferirla al tanque de sedimentación. Lavar el equipo mezclador y el tubo con kerosene limpio, el cual será luego adicionado con más kerosene limpio antes de que el volumen total de la suspensión en el tanque sea de 335 ml.
- c. Antes de colocar el tanque en el sendero del rayo de luz, agitar el contenido para obtener la uniformidad de la suspensión.
- d. Cubrir el tanque con un vidrio esmerilado y oscilando  $180^\circ$  al rededor del eje horizontal através del centro del tanque, voltear el tanque de arriba hacia abajo y viceversa, aproximadamente una vez cada segundo por espacio de un minuto. Tener cuidado y prevenir la perdida de kerosene.

- e. La suspensión será luego preparada para colocarla en su posición exacta en el sendero del rayo de luz.

### **Operación del Turbidímetro**

- a. Con el filtro retardador y el tanque de sedimentación conteniendo aproximadamente 100 ml. de kerosene limpio en el sendero de luz, ajustar la luz a la intensidad  $I_0$ .
- b. Pesar la muestra de cemento en la cantidad apropiada de acuerdo a la medida seleccionada (3, 4 ó 5 grs.).
- c. Colocar el puntero de nivel del asiento a la posición de 30 - 50  $\mu\text{m}$ .
- d. Llenar la bureta a la altura predeterminada con kerosene del mismo estado e igual temperatura, como los del kerosene usado en la suspensión. Continuar la oscilación hasta que el kerosene hasta la línea cero de la bureta, seguidamente para la agitación y colocar el tanque en posición del sendero del rayo de luz.
- e. Remover el filtro retardador del sendero del rayo de luz y cerrar la puerta de la caja.
- f. Leer el microamperímetro lo mas cerca a 0.1  $\mu\text{A}$  al instante en que el kerosene drene en la bureta pasando las marcas de 50, 45, 40, 35 y 30.

- g. Levantar sucesivamente el asiento a las marcas de 25, 20, 15, 10 y 7.5 sobre el puntero de la escala leyendo el microamperímetro en cada posición hasta que drene y pase a la correspondiente marca de la bureta.
- h. Bajar el asiento a la posición de 30 - 50  $\mu\text{m}$ , reemplazar el filtro en el sendero del rayo de luz, remover el tanque y chequear la intensidad de la lámpara.

## **PRUEBAS DE LABORATORIO DE LAS LECHADAS DE CEMENTO LIQUIDO**

### **Preparación de las lechadas de cemento**

#### **Equipo:**

- a. Escala. la escala indicada sobre la carga será correcta dentro de una tolerancia de 2 grs. por carga de 2,000 grs. ó más, y dentro del 0.1% de la carga indicada para cargas menores de 2,000 grs., excepto que para nuevas escalas la tolerancia exacta será de  $1\frac{1}{2}$  de estos valores. La sensibilidad reciproca no será más grande que dos veces la tolerancia permitida en la escala correcta.
- b. Pesos. Los pesos serán exactos dentro de la tolerancia mostrada en la tabla N° 4.4 excepto que para nuevos pesos de-



ben ser exactos dentro de  $1\frac{1}{2}$  de dichas tolerancias. Sobre la escala de la medida tipo donde los pesos están por encima de la medida, los pesos indicados deben estar conforme a los requerimientos de la tabla N° 4.5.

- c. Cilindro de vidrio graduado. Los cilindros de vidrio graduados serán lo suficientemente largos para medir y rendir, en una sola operación, los requerimientos de volumen de agua de mezcla a 68°F (20°C). La variación en volumen no debe exceder al +2%. La graduación debe ser subdividida por lo menos cada 5ml. La línea principal de graduación será un círculo completo, y debe ser numerada.
- d. Equipo mezclador. La mezcla patrón para la preparación de una lechada de cemento para pozos debe ser de  $\frac{1}{4}$  de galón (aprox. 1 lt), un mezclador tipo impulsor de 2 velocidades capaz de rotar a 4, 000rpm ó más sin carga a baja velocidad y 12,000 rpm ó más sin carga a alta velocidad. Las paletas de la hélice deben ser construidas de un metal resistente a la corrosión. El recipiente mezclador debe ser construido de un metal resistente a la corrosión ó vidrio (fig. N° 4.3).

### **Procedimiento**

- a. Residuos. La muestra de cemento a ser probada debe ser pasada a través de un tamiz de 850 micrómetros (número 20)

para desintegrar masas y remover materiales extraños. Los materiales removidos en la malla deben ser pesados, y el peso reportado como un porcentaje del cemento total tamizado, y una notación reportada como su característica. Esos materiales deben luego ser descartados.

- b. Agua de mezcla. Para las pruebas de referencia debemos usar agua destilada fresca ó agua destilada esencialmente libre de dióxido de carbono. Para pruebas rutinarias se puede emplear agua potable. La mezcla de agua debe ser medida en un vaso de vidrio cilíndrico graduado ó pesado por medio de escalas y pesos.
- c. Temperatura del agua y del cemento. La temperatura del agua anterior a la mezcla y del cemento debe ser de  $73 \pm 2$  °F ( $22.8 \pm 1.1$  °C).
- d. Porcentaje de agua. El porcentaje de agua por peso a ser adicionado para cada clase de cementos de pozos debe estar conforme a los valores dados en la tabla N° 4.6. El agua no debe ser adicionada para compensarse por evaporación, humedad, etc.
- e. Mezcla de agua y cemento. Los requerimientos cuantitativos de agua deben ser colocados en el recipiente mezclador, la mezcla girará a baja velocidad [ $4,000 \pm 200$ rpm], y la mues-

tra de cemento será adicionada en no más de 15 segundos. Después de que todo el cemento a sido adicionado en el agua, se colocará la tapa sobre el recipiente mezclador y el mezclado será continuado a alta velocidad [12,000 + 500 rpm] por 35 segundos.

- f. Volumen de la lechada. El volumen de la lechada en el mezclador será de 600 ml. (tabla N° 4.7).

#### **Determinación de la densidad de la lechada de cemento**

La densidad de la lechada debe ser determinada por el uso de la balanza de lodo (fig. N° 4.4), con la diferencia de que la lechada después de ser vertida en la copa, debe ser vaciado 25 veces para eliminar el aire entrampado.

El método alternativo para medir más exactamente la densidad es utilizando un balanza presurizada, que es muy similar en uso que al de la balanza de lodo convencional.

El instrumento debe ser chequeado para su calibración en igual forma como se regula la balanza de lodo, colocando agua u otros fluidos más pesados de densidad conocida en la copa muestreadora.

La copa es inicialmente llenada con la lechada a un nivel ligeramente debajo del borde superior de la copa (aproximadamente a  $\frac{1}{4}$  de pulgada).

Colocar la tapa sobre la copa y empujarla hacia abajo dentro de la boca hasta que se forme una superficie de contacto entre la orilla exterior de la tapa y el borde superior de la copa. El exceso de lechada será expulsado a través de la válvula check; cuando la tapa ha sido bien colocada sobre la copa, dejar la válvula check en posición cerrada, y limpiar y secar el instrumento.

La muestra de lechada presurizada es leída ahora por peso. El instrumento debe ser colocado sobre la cuña de soporte como se ilustra en la fig. N°4.4.

El deslizamiento del peso debe ser movido hacia la derecha o izquierda hasta que la barra esté balanceada. La barra estará balanceada cuando la burbuja esté centrada dentro de las dos marcas. La densidad es obtenida por lectura de una de las cuatro escalas calibradas sobre el lado de la flecha del deslizamiento del peso.

### **Determinación del contenido de agua libre**

La lechada de cemento preparada de acuerdo a las especificaciones API debe ser colocada inmediatamente en un consistó-

metro de presión atmosférico y agitado a 80°F (27°C) por un período de 20 minutos. La lechada de cemento deberá ser luego remezclada por 35 segundos a alta velocidad en un equipo mezclador; la cual será luego llenada en una probeta graduada limpia y seca; y cerrada para prevenir la evaporación Fig. N° 4.5. La temperatura a la cual esté expuesta la probeta será 73 + 2°F (22.8 + 1.1°C). El agua flotante desarrollada después de que la lechada haya permanecido 2 horas en la probeta será pipeteada ó decantada y medida.

Esta agua deberá ser expresada en mililitros y designada como contenido de agua libre.

### **Determinación de las propiedades reológicas de la lechada**

Para determinar las propiedades reológicas de la lechada de cemento se hace uso de un viscosímetro rotacional.

En principio, se hace la aclaración de que el procedimiento es apto para lechadas no dispersas y que para lechadas dispersas los datos son de menor calidad (sin indicar método alternativo).

### **Equipo.**

Se recomienda el uso de un viscosímetro de 12 velocidades (que puede ser el tradicional Fann 35-S con una caja reductora 10:3) con el cual se realizaran lecturas a 0.9 - 1.8 - 3 - 6 - 30 - 60 -

90 - 100 - 180 - 200 y 300 rpm. Sin embargo, se acepta el viscosímetro rotacional para tomar lecturas a 3 - 6 - 100 - 200 y 300 rpm (fig. N° 4.6).

### **Calibración.**

Además de la calibración clásica del torque del resorte, se recomienda verificar la centralización entre rotor y bobina. Se coloca un espejo debajo del rotor de la bobina y se hace girar el rotor.

### **Procedimiento.**

La lechada debe ser preparada de acuerdo a las especificaciones API sección 5; la que debe ser inmediatamente vaciada dentro del recipiente para la lechada de un consistómetro de presión atmosférica ó un consistómetro presurizado, el cual tiene que ser calentado a la temperatura de la prueba deseada + 5°F (+ 2°C).

La lechada debe ser luego agitada por espacio de 20 minutos a la temperatura de la prueba, para ser transferida a la taza del instrumento de medida (copa y medida deben ser mantenidas a la temperatura de la prueba con + 5°F (+ 2°C)).

Antes de vaciar la lechada en la copa del viscosímetro, remover las paletas y agitar la lechada con una espátula por 5 segundos

mientras esté en la copa del consistómetro para minimizar la segregación de sólidos debido al fraguado.

Con el rotor no girando, la copa precalentada debe ser levantada antes de que el nivel del líquido, esté en la línea grabada.

Inmediatamente antes de tomar las lecturas en el viscosímetro, la temperatura de la lechada debe ser registrada. La lectura inicial del instrumento a un rate de corte de 511 (1/s) debe ser tomada 60 segundos después de la rotación continua a ese rate de corte. Las siguientes lecturas del instrumento deben ser tomadas en orden descendente a intervalos de 20 segundos. Cada lectura del dial debe ser tomada justo antes de desplazarse a la siguiente velocidad más baja. La temperatura de la lechada al final de esta parte de la prueba debe ser registrada.

Las medidas reológicas de la lechada deben ser reportadas como un promedio de las temperaturas registradas en los párrafos anteriores.

### **Determinación del tiempo de espesamiento**

#### **Equipo**

Se debe usar un consistómetro presurizado (fig. N°4.7).

Este equipo consiste esencialmente de un recipiente cilíndrico rotacional para la lechada equipado con un conjunto de paletas

estacionarias, todas encerradas en una cámara a presión. El espacio entre el recipiente de la lechada y las paredes del recipiente presurizado debe estar completamente lleno con el aceite de hidrocarburo, teniendo un punto de inflamación que encuentre satisfactoriamente los requerimientos de seguridad de la organización del desarrollo de la prueba. La selección del aceite debe seguir las siguientes propiedades físicas:

- Viscosidad                      49 - 330 SSU @ 100°F
- Calor específico                0.50 - 0.58 Btu/lb-f
- Conductividad termal         0.0685 - 0.0770 Btu/h-ft²F
- Gravedad específica         0.85 - 0.91

Un elemento caliente capaz de levantar la temperatura de éste baño de aceite a un rate de por lo menos 5°F/min. Las termocuplas están provistas para determinar la temperatura del baño de aceite y también el de la lechada de cemento. El recipiente de la lechada es rotado a una velocidad de 150 rpm (2.5 r/s) + 15 rpm(0.25 r/s).

### **Calibración**

El mecanismo del potenciómetro y el circuito de medida del voltaje el cual indica la consistencia debe ser calibrada usando un peso cargado tipo potenciómetro. Este invento es usado para aplicar torque al potenciómetro, usando un radio de la estructura



del potenciómetro (normalmente 52 mm) como un brazo de palanca.

### **Procedimiento**

- a. Instrucciones de operación. Los detalles de instrucciones de operación son suministradas por el fabricante.
- b. Llenado del equipo. La lechada preparada de acuerdo a la sección 5, debe ser rápidamente vaciada en el recipiente invertido de la lechada. Durante esta operación, la lechada debe ser agitada ligeramente para prevenir la segregación. Cuando el recipiente de la lechada esté completamente lleno, el fondo debe ser atornillado, tener cuidado y asegurarse de que el aire sea excluido, el tapón del centro luego será atornillado ajustadamente, el recipiente colocado en la cámara de presión, y la cámara llenada con el baño de aceite. Luego, el ensamble de la cabeza de la cámara de presión será atornillada, el recipiente de la lechada colocado para rotar, y el bombeo del aceite a presión empezará. Con la bomba en operación, el aire en el tope de la cámara debe ser desfogado. La operación de llenado y sellado del recipiente de la lechada, colocando el recipiente en la cámara de presión, sellando y desfogando la presión de la cámara, y colocando el

equipo en operación debe hacerse dentro de los 5 min posteriores a la completación del período de mezcla.

- c. Control de temperatura y presión. Durante el período de prueba, la temperatura de la lechada de cemento, debe ser determinada con una termocupla en la posición central del recipiente de la lechada, y la presión del recipiente debe ser incrementada de acuerdo con el catálogo de las especificaciones dadas en el API para este procedimiento.
- d. Tiempo de espesamiento. El lapso de tiempo entre la aplicación de la presión y temperatura de el equipo y el acontecimiento de una consistencia de 100 Uc debe ser reportado como el tiempo de espesamiento a la especificación particular del catálogo de la prueba. Para el catálogo con temperaturas de 200°F ó más, está permitido parar la prueba una consistencia de aproximadamente 70 Uc y extrapolarla a valores de 100 Uc para plotear los resultados.

\* La bombeabilidad o consistencia de la lechada es medida en unidades de consistencia (Uc), la cual es una cantidad adimensional con un factor no directo de conversión a unidades de viscosidad tales como el poise.

Las unidades de consistencia (Uc) se obtienen en un consistómetro presurizado como el de la figura N° 4.7.

## **Determinación del filtrado de la lechada.**

### **equipo.**

- a. Filtro prensa (a temperatura de laboratorio y 100 psi). El filtro prensa debe estar constituido de una estructura y de un ensamble cilíndrico similar al que se muestra en la fig. N° 4.8. El cilindro debe tener un diámetro interno de  $3 + 0.07$  pulgadas y una altura mínima de 2.5 pulgadas. El ensamble del cilindro debe ser construido por un material que no sea afectado por las soluciones alcalinas y así adaptado para que a una presión media pueda estar convenientemente dentro y drenado desde el tope. El fondo del cilindro debe ser cerrado por una capa teniendo un tubo de drenaje y necesariamente una empaquetadura para proveer un sello efectivo. El área de filtración debe ser de  $7.1 \text{ pulg}^2$ .
- b. Filtro prensa (alta presión, alta temperatura). Este filtro prensa es muy similar al anterior con la diferencia de que el cilindro debe tener un diámetro interior de  $2.130 + 0.005$  pulgs. y la altura media interna debe ser de 2.5 pulgs. y 8.5 pulgs. dependiendo del tipo de equipo.
- c. Presión media. La presión debe ser abastecida por un compresor de aire, nitrógeno ó cualquier otro medio seguro y adecuado para mantener constante la presión del gas.

### **Preparación del Filtro Prensa y la Lechada.**

- a. El filtro prensa debe ser ensamblado seco.
- b. Una vez preparada la lechada, ésta es colocada en un consistómetro presurizado ó un consistómetro a presión atmosférica y agitado por 20 minutos. El tiempo entre el término de la agitación y la aplicación de la presión no debe exceder a los dos minutos.

### **Período de Prueba.**

El período de prueba debe ser tomado desde el instante en que se aplica la presión inicial con la varilla del fondo abierta. La lectura del filtro debe ser tomada a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1, 2 y 5 minutos y después a intervalos de 5 minutos, antes del lapso de 30 minutos. Si la deshidratación ocurre antes de que termine el período de 30 minutos, el tiempo requerido para deshidratar la muestra debe ser observado.

## **PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO FRAGUADO:**

### **Determinación de la resistencia a la compresión**

**Equipo.** Consta de:

- a. Malla: Debe ser de 850 micrones según los requerimientos dados en las normas ASTM E11

- b. Molde de muestra y máquina probadora de la resistencia a la compresión. El molde debe ser chequeado por tolerancias y la máquina probadora debe ser calibrada al menos una vez cada dos años ó más frecuentemente si es susceptible a errores.
- c. Base y placa de cubierta. Se debe usar una placa de vidrio ó metal no corrosivo con un mínimo espesor de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.
- d. Baño de agua de curado. Debe emplearse un baño de curado ó depósito con dimensiones apropiadas para la completa inmersión de los moldes de la resistencia a la compresión en agua y poder mantener en el rango de  $+ 3^{\circ}\text{F}$  ( $+ 2^{\circ}\text{C}$ ) de las temperaturas prescrita (fig. N° 4.9). Los dos tipos de depósitos son:
- \* Un recipiente no presurizado para muestras de curado a temperaturas de  $180^{\circ}\text{F}$  ( $82^{\circ}\text{C}$ ) o menos, debe tener un agitador apropiado ó un sistema de circulación para garantizar una temperatura uniforme en el recipiente.
  - \* Un recipiente apropiado para muestras de curado a temperaturas arriba e incluyendo los  $380^{\circ}\text{F}$  ( $193^{\circ}\text{C}$ ) y a presiones que pueden ser controladas entre los 0 y 3 000 psi. El recipiente debe tener suficiente capacidad de calefacción

para levantar la temperatura uniformemente desde los 80°F hasta los 340°F en 75 minutos.

- e. Baño de enfriado. Este debe ser tal que la muestra a ser enfriada desde la temperatura de curado pueda estar sumergida completamente en agua y mantenida a  $80 \pm 5$  °F.
- f. Indicadores de temperatura:
  - \* Termómetro, con un rango de 0 a 220 °F, y una escala mínima de divisiones de 2°F debe ser usado en un recipiente no presurizado.
  - \* Pirómetro, con un rango de 0 a 400 °F con divisiones mínimas en la escala no excediendo a los 5°F calibrada con una precisión de +1%, debe ser usado en un recipiente a presión.
- g. Varilla sedimentadora: Debe ser de vidrio o metal no corrosivo de aproximadamente 8 pulgadas de longitud por  $\frac{1}{4}$  pulgada de diámetro.
- h. Grasa: Cualquier grasa sujetas a temperaturas y presiones especificadas en la tabla N° 4.7 y que tenga las propiedades siguientes:
  - \* Una consistencia tal, que permita su fácil aplicación.
  - \* Propiedades de buena adherencia para prevenir las filtraciones.

\* Resistencia al agua.

La grasa debe ser no corrosiva en un rango de temperaturas de 80 a 400 °F.

### **Procedimiento**

La fase interior del molde y la superficie en contacto de las placas deben estar cubiertas con una delgada capa de grasa. El molde debe ser colocado sobre una delgada placa engrasada.

La lechada debe ser colocada en el molde en una capa igual a la mitad de la profundidad del molde y debe ser sedimentada 25 veces por muestra con una varilla sedimentadora.

La lechada debe ser colocada en el compartimiento de la muestra antes de que se inicie la operación de sedimentación. Luego de que se sedimente la capa, el resto de la lechada debe ser agitada por el operario usando una varilla sedimentadora ó una espátula para eliminar la segregación, el molde es llenado rebosando y sedimentado como por la primera capa. Después de la sedimentación, el exceso de lechada debe ser quitada al ras con el tope del molde usando un emparejador. La muestra en el molde, la cual mostrará evidencia de fuga será descargada. La grasa que cubre la placa debe ser colocada en la parte superior del molde.

**Período de Curado.** Es el lapso de tiempo desde que la muestra está sujeta a temperatura en el recipiente de curado para probarla por resistencia.

- a. Para muestras curadas a presión atmosférica, el período de curado empieza cuando la muestra es colocada inicialmente en el baño de curado, inmediatamente después de que la lechada a sido colocada en el molde. El período de curado termina cuando la muestra a sido probada por resistencia.
- b. Para muestras curadas a presiones superiores a la atmosférica, el período de curado empieza con la aplicación inicial de la presión y temperatura, las cuales son aplicadas inmediatamente después de que la muestra es sellada en el recipiente de curado.
- c. Los períodos de curado especificado para las muestras de la prueba son de 8 y 24 horas con excepción de los cementos de la clase J para los cuales los períodos de curado son de 12 hr, 24 hr y 7 días.

**Presión y Temperatura de Curado.**

- a. Curado bajo los 180°F. Para curados a presión atmosférica y temperaturas de 180°F ó menos, una ó más de las siguientes temperaturas son recomendadas: 80, 100, 120, 140, 160, 180 °F. Para curados a presiones sobre la atmosférica



y temperaturas sobre los 170°F ó menos el catálogo 4S es especificado (tabla N° 4.7).

- b. Curado sobre los 180°F. Para temperaturas de curado sobre los 180°F, uno ó más de los siguientes catálogos (ver tabla N° 4.7) están especificados: 6S, 8S, 9S y 10S.
- c. Curado a presión atmosférica. La muestra de prueba, inmediatamente después de ser colocada en el molde y ser cubierta, debe ser sumergida en el baño de agua a la temperatura de curado y mantenida a ésta.

Cuando la muestra va a ser probada a período de menos de 24 hrs., ellas deben ser removidas del baño de curado aproximadamente 45 minutos antes de el período al cual vayan a ser probadas, inmediatamente removidas de su molde, y colocadas en un baño de agua mantenida a  $80 \pm 5$  °F por aproximadamente 35 minutos.

Si las muestras van a ser probadas a períodos de 24 hrs. ó más, ellas deberán ser removidas del baño de curado 20 a 23 hrs. después de que la lechada haya sido inicialmente mezclada, e inmediatamente removida de su molde, y retornada al baño de curado. Ellas permanecerán en el baño de curado hasta 45 minutos antes del período al cual van a ser probadas, tiempo en el

cual van a ser transferidas al baño de agua y mantenidas a  $80 + 5$  °F por aproximadamente 35 minutos.

### **Curado a Presiones Sobre la Atmosférica**

En este caso las muestras a probar inmediatamente después de ser moldeadas y cubiertas, deben ser sumergidas en agua a  $80 + 5$  °F en un recipiente a presión. Calor y presión deben ser aplicados de acuerdo con el catálogo apropiado como se recomienda en la tabla N° 4.8. La máxima temperatura y presión del catálogo debe ser mantenida como se muestra en las notas 1 y 2 de la tabla N° 4.7 hasta 1hr y 45 min antes del período al cual la muestra va a ser probada, el resto de la presión luego será liberada gradualmente y la muestra removida de los moldes, transferida a un baño de agua y mantenida a  $80 + 5$  °F por aproximadamente 35 minutos.

### **Prueba de la Muestra.**

El cubo de la muestra debe ser probado inmediatamente después de ser removido del baño de agua fría.

- a. Se debe usar una máquina hidráulica (fig. N° 4.10) cuyo rate de cargas para muestras de resistencia normal debe ser de 4,000 psi/min.

Para muestras de baja resistencia, 500 psi ó menos, se debe usar un rate de 1,000 psi/min. cuando la resistencia final está cerca.

- b. En los cálculos de resistencia a la compresión, variaciones de el área específica de la sección transversal (4 pulg<sup>2</sup>) debe ser omitida a menos que la desviación de 1/16 pulgadas ó más de la dimensión lineal especificada de 2.0 pulg. sea reportada.

#### **Determinación de la permeabilidad del cemento.**

##### **Equipo.**

Se debe usar un permeámetro de cemento similar al que se muestra en la fig. N° 4.11 debe para determinar la permeabilidad del cemento fraguado. El equipo debe consistir de lo siguiente:

- a. Molde. Se debe usar un molde de latón ó acero inoxidable de 1.0 pulg. de longitud, de 1.102 - 1.154 pulg. de diámetro interior y 2.0 pulg. de diámetro exterior.
- b. Soporte. Se debe proveer de un soporte en el cual el tope y el fondo del molde puedan ser sellados con O-rings.
- c. Medida de presión. La presión debe ser abastecida por aire comprimido, nitrógeno ó cualquier otro medio que mantenga constante la presión del gas. El gas debe desplazar mercu-

rio desde un cilindro, el cual vuelve a desplazar agua desde otro cilindro, forzando el agua a través de la muestra de cemento.

- d. Pipeta graduada. Se debe usar una pipeta graduada para medir el flujo a través de la muestra. Esta debe ser de 0.1 ml. para muestras de baja permeabilidad, de 1.0 ml. para muestras de permeabilidades medias y de 5.0 ml. para muestras de altas permeabilidades.

#### **Preparación de la Muestra.**

La lechada de cemento preparada es colocada en el molde y curada de acuerdo a los pasos seguidos para la prueba de resistencia a la compresión.

#### **Preparación de la Prueba.**

Para preparar la prueba, el molde conteniendo la muestra es sellado dentro del soporte del cilindro por medio de O-rings. Para prevenir la colección de aire en agua bajo la muestra, el siguiente procedimiento es seguido tomando como referencia el diagrama de la fig. N° 4.12:

- a. Con mercurio en el sistema, la válvula A cerrada las válvulas B, C y D abiertas, una botella aspiradora conteniendo agua destilada, filtrada y hervida recientemente se conecta a la válvula C por medio de un tubo de goma, teniendo en cuenta

que la cámara este llena antes de que el agua rebose a través de la válvula D.

- b. Con las válvulas B, C y D cerradas y la válvula A abierta, ajustar el regulador de aire para obtener la caída de presión deseada a través de la muestra de cemento observándose la escala de presión G (20 a 200 psi, generalmente).
- c. Conectar la botella aspiradora a la válvula E.
- d. Con la botella aspiradora; 12 a 24 pulg. más alta que la válvula E, abrir las válvulas D y E ligeramente para permitir un pequeño flujo de agua que pasará a través del molde conteniendo el cemento fraguado a medida que la capa de la estructura es roscada dentro del lugar.
- e. Cerrar la válvula D y abrir la válvula E completamente.
- f. Conectar la botella de la aspiradora a la válvula F, abrir ésta ligeramente; permitir que el agua fluya sobre el tope de la muestra y sobre la varilla de la pipeta para obtener un punto inicial de referencia.

#### **Prueba de Permeabilidad.**

La prueba de permeabilidad debe ser realizada como se indica a continuación:

- a. Tener en cuenta una diferencia de presión de 20 a 200 psi para forzar el agua a través de la muestra de cemento fraguado.
- b. Debe nivelarse el agua a través de la muestra por un máximo de 15 minutos o antes de que  $\pm 1$  mililitro de agua sea forzado a través de ésta dentro del tubo de medida.
- c. se debe usar un tubo de medida apropiado.
- d. El rate de flujo debe ser medido por lo menos dos veces.

## **PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO**

### **Relación agua - cemento**

La máxima y la mínima densidad de la mezcla asequible cuando se usan cementos limpios, varían de acuerdo a la fineza del cemento. La fineza promedio o área superficial de un cemento de clase A ó C varía entre 150 a 220 m<sup>2</sup>/Kg.

El Agua Máxima de una lechada es el volumen de agua de mezclado que separa 1.5% como agua libre. Para ésta determinación se usan probetas graduadas de 250 ml., en las cuales se vuelca la lechada luego de haber sido mezclada en un consistómetro de presión atmosférica durante 20 minutos, midiéndose el agua que separa en anillos y calculando el porcentaje. El agua

máxima es la cantidad generalmente utilizada en la mayor parte de las cementaciones, porque nos da el máximo rendimiento.

El agua Normal es el volumen de agua de mezclado que nos da una lechada de 11 Uc, medidas en un consistómetro de presión atmosférica después de 20 minutos de agitación. Al agua normal también se le denomina agua óptima, y nos da una muy buena lechada y fácilmente bombeable.

El Agua Mínima para cualquier clase de cemento está dada por el volumen de agua que nos produce una lechada de 30 Uc en el consistómetro de presión atmosférica, después de 20 minutos de agitación. Representa una lechada muy espesa y viscosa, que se usa por ejemplo, para controlar pérdidas de circulación.

Debemos tener en cuenta que en una columna cementada, el exceso de agua libre se separa formando bolsones, en lugar de emigrar las gotas hacia la parte superior. Esto puede ser observado en ensayos de laboratorio con columnas de vidrio, notándose la separación del anillo de agua que comienza a formarse 15 minutos después de que la lechada ha sido puesta en el tubo.

También debe considerarse, que si bien el incremento del agua nos permitirá mayores tiempos de bombeo y retardo en el fragüe, no debemos incrementarla a menos que agreguemos ben-

tonita o un material similar, los cuales tienen las propiedades de retener el agua.

## **Densidad**

El rango de densidad de la lechada de cemento neto está limitada por la mínima y la máxima relación de agua/cemento dada por el standard API.

La densidad de una lechada en todos los trabajos de cementación, excepto en las cementaciones a presión, debe ser lo suficientemente elevada para controlar al pozo. Sin embargo, para proyectos de de cementación primaria y de resane se requieren densidades de lechada más bajas. En tales casos una lechada puede ser aligerada usando cualquiera de los siguientes métodos:

1. Usando extendedores tipo arcilla ó silicatos químicos junto con agua extra.
2. Usando materiales tales como puzolanas, cerámicas microesferas o nitrógeno. Estos materiales aligeran la lechada debido a que ellos tienen más bajas densidades que las partículas de cemento.

Las lechadas de alta densidad son usadas en formaciones delezna- bles, donde la máxima densidad lograda con el cemento neto,



usando el mínimo contenido de agua permisible, está en el rango de 17.5 a 18.0 lb/gal. En estos casos, se requiere de dispersantes para incrementar la fluidez de la lechada.

Bajos contenidos de agua en la lechada son fácilmente mezclados a 18.0 lb/gal con la ayuda de dispersantes, pero ellos no son comúnmente usados en cementaciones primarias. Su uso está principalmente restringido a altas resistencias como son tapones para trabajos de perforación direccional.

### **Control de pérdida de fluido**

El control del filtrado en las mezclas de cemento es muy importante en cementaciones de pozos profundos, lanas y cementaciones a presión.

La pérdida por filtrado a través de un medio permeable puede causar un aumento en la viscosidad de la lechada y una rápida deposición de revoque del filtrado, restringiendo el flujo.

Los factores que influyen en la pérdida de filtrado de las lechadas son: el tiempo, la presión, la temperatura y la permeabilidad.

Los valores normales para pérdida de filtrado en lechadas de cementos sin aditivos son muy elevados, varían de 800 a 1,000 ml/30 min a 1,000 psi de presión diferencial.

Los valores recomendados para cementar casing están entre 100 y 200 ml/30 min a 1,000 psi. Para squeeze ó cementación de lana son recomendados valores entre 50 y 150 ml/30 min.

Cuando todo el filtrado se recibe de la celda de ensayo, en menos de 30 minutos la siguiente ecuación se utiliza para calcular el valor hipotético de filtrado a 30 minutos.

$$F_{30} = F_t * \frac{5.477}{t^{1/2}}$$

Donde  $F_{30}$  es el filtrado en 30 minutos y  $F_t$  es el filtrado en un tiempo  $t$  de ensayo. Un valor óptimo de pérdida de filtrado en 30 minutos y 1,000 psi de presión es 100 cc.

### **Propiedades reológicas de la lechada de cemento**

La capacidad de flujo de una lechada a través de pequeñas aberturas ó fracturas depende mayormente de su consistencia. Esta debe ser medida exactamente como un suceso en una operación de cementación, dependiendo del llenado completo de todos los canales en el espacio anular. Contrariamente, los tapones de pérdida de circulación deben ser de una consistencia tal que no fluya dentro de la fractura o vacíos.

La adición de aditivos diseñados para alcanzar lechadas fijas pueden resultar en una modificación de la viscosidad de la lechada. Por ejemplo, retardadores de lignosulfonatos tienden a reducir la viscosidad, mientras que los aditivos para pérdida de fluido derivados de las celulosas pueden incrementar significativamente la viscosidad de la lechada.

La viscosidad aparente de los fluidos puede ser baja usando dispersantes tales como lignosulfonatos, polifosfatos y ácidos orgánicos. Todos ellos sirven para reducir el esfuerzo de corte de los fluidos plásticos de Bingham. La viscosidad plástica de un fluido, sin embargo, es dependiente de su contenido de sólidos y no de cambios ocurridos por cualquier química adicionada.

La viscosidad del cemento neto se encuentra usualmente en un rango entre 5 y 20 unidades de consistencia.

### **Tiempo de espesamiento**

El tiempo de bombeabilidad es el tiempo mínimo requerido para mezclar y bombear la lechada hacia el anillo entre la tubería y el pozo.

Los ensayos de tiempo de bombeabilidad simulando las condiciones del pozo se establecen para temperaturas de hasta 500°F (260°C) y presiones que exceden los 25,000 psi.

Mientras se aplica calor y presión a la lechada de cemento colocada en el consistómetro, continuamente se lee y registra en un gráfico la consistencia de la misma. El límite de la bombeabilidad ha sido establecido cuando la lechada adquiere 100 Uc. Sin embargo, 50 Uc son generalmente considerados para ser la consistencia máxima bombeable.

Las condiciones específicas del tiempo de bombeabilidad dependen del tipo de trabajo, condiciones del pozo y del volumen de cemento que se desea bombear.

Para colocar un tapón de cemento el tiempo de bombeabilidad no deberá exceder de una hora, debido a que la mayoría de los trabajos se terminan en menos de una hora.

Para trabajos de cementación críticos, en profundidades mayores a 12,000 pies, el agua que se usará mezclada con el cemento deberá ser siempre ensayada antes de la cementación.

### **Resistencia a la compresión**

En una situación normal, el cemento fraguado está sujeto a fuerzas compresivas horizontales debido a la presión de los poros de la formación y a fuerzas de tensión verticales debido al peso del casing.

Para soportar el casing, debe haber una suficiente adherencia entre el casing y el cemento para transmitir la resistencia a la tensión necesaria, aunque la fuerza de adherencia cemento-casing no está directamente relacionada a las resistencias de tensión del cemento; estudios hechos por Farris (ref. N° 10), han demostrado que la fuerza de adherencia cemento-casing mejoran a medida que se incrementa el esfuerzo a la tensión.

La capacidad del cemento fraguado para resistir las fuerzas causadas por las presiones hidráulicas durante las operaciones de inyección o producción, pueden ser consideradas como una función directa de esta resistencia a la compresión. Se debe notar, sin embargo, que mientras una resistencia a la compresión del cemento normal o alta es siempre deseable para completar zonas aisladas, la acción de las fuerzas geológicas e hidráulicas en el cemento y el casing son difíciles de evaluar.

Las investigaciones han demostrado que una capa de cemento en un anillo de 10 pies, teniendo solamente 8 psi de resistencia a la tensión, puede soportar más de 200 pies de casing, aún bajo pobres condiciones de adhesividad del cemento.

Debido a que los ensayos de resistencia del cemento son analizados más para compresión que para tensión, los valores deben ser convertidos de resistencia a la compresión a resistencia a la

tensión. Como regla general, la resistencia a la compresión es de 8 a 10 veces mayor que la resistencia a la tensión.

Es generalmente aceptada en la industria del petróleo que una resistencia a la compresión de 500 psi es adecuada para la mayoría de las operaciones.

Al decidir cuanto tiempo deberá esperarse para que el cemento fragüe; es decir, el tiempo WOC, es importante:

- Conocer la resistencia del cemento antes de que la perforación pueda continuar.
- Conocer las características del desarrollo de la resistencia de los cementos en uso.

Las siguientes observaciones que muestran la resistencia a la compresión de los cementos para soportar cañería están basados en investigaciones y experiencias de campo:

1. Resistencias elevadas del cemento no siempre son requeridas para soportar el casing durante la perforación. Mediante el aumento de la densidad de la lechada, el tiempo requerido para desarrollar el esfuerzo a la compresión adecuado se ve disminuido.
2. El aumento en la densidad de la mezcla, incrementa la resistencia a la compresión y el calor de hidratación del cemento.

3. Las mezclas con excesiva relación agua/cemento dan por resultado cementos débiles, y por consiguiente deberán evitarse en los extremos de la cañería.
4. Mediante la selección de cementos apropiados y la aplicación de buenas prácticas de cementación, el tiempo de WOC de cementación de la cañería de superficie puede reducirse de 3 a 4 horas en condiciones operativas en verano, y de 6 a 8 horas bajo condiciones operativas en invierno.

### **Permeabilidad**

Aunque al diseñar las mezclas de cemento sólo se da énfasis a la permeabilidad del cemento fraguado, existen métodos para medir la permeabilidad al agua y al gas.

El cemento fraguado tiene muy baja permeabilidad, más baja que la que poseen la mayoría de las formaciones. Los resultados de campo han demostrado que a temperaturas menores de 200°F (93°C), la permeabilidad decrece con el tiempo y con la temperatura. Después de 7 días de curado, la permeabilidad es muy baja para ser medida. La permeabilidad al gas, del cemento fraguado, es más elevada que al agua, pero, las determinaciones de la permeabilidad al gas son más dificultosas por las mediciones del flujo de gas.

Los cementos fraguados de 3 a 7 días tienen menos de 0.1 md de permeabilidad. Como referencia se puede mencionar que, las calizas y dolomitas tienen de 2 a 3 md de permeabilidad promedio y las areniscas tienen una permeabilidad al gas en un rango de 0.1 a 2,000 md.



## 5. CEMENTOS USADOS EN OPERACIONES PETROLIFERAS DEL NOROESTE

### 6. 1. ANALISIS DE LABORATORIO (CARACTERIZACION)

Con la finalidad de realizar un estudio de las características de los cementos usados en las operaciones petrolíferas del Noroeste Peruano y basado en los análisis físicos y químicos, trataremos de clasificar a los cementos Pacasmayo y Atlas de acuerdo a las especificaciones dadas por el American Petroleum Institute (API).

Para lograr este objetivo, se envió una muestra de cemento PACASMAYO al Centro de Investigación de Tomball en Estados Unidos, perteneciente a la compañía BJ Services y una muestra de cemento ATLAS al Centro de Tecnología para América Latina en la ciudad de Ojeda, Estado de Zulia - Venezuela, perteneciente a la compañía Dowell.

Según los informes recibidos de estos laboratorios, los análisis de las muestras enviadas dieron los siguientes resultados:

## CEMENTO PACASMAYO

### ANALISIS QUIMICO

#### Composición de los óxidos

La composición de los óxidos para éste tipo de cemento se muestran en el siguiente cuadro.

#### Composición de los óxidos

#### Análisis XRF

(% en peso)

Compuesto	Cmto. Pacasma- yo
MgO	5.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.10
SiO <sub>2</sub>	20.20
P <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0.30
SO <sub>3</sub>	1.80
K <sub>2</sub> O	0.90
CaO	62.80
TiO <sub>2</sub>	0.20
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20

## Composición de las fases principales

### Análisis XRF

(% en peso)

Compuesto	Cmto. Pacasma- yo
C <sub>3</sub> S	58.10
C <sub>2</sub> S	14.08
C <sub>3</sub> A	8.1
C <sub>4</sub> AF	9.73

### Pruebas para la lechada de cemento

Para realizar las pruebas de la lechada de cemento se preparó ésta según las especificaciones API con una relación de agua/cemento de 46% (800 gramos de cemento y 368 mililitros de agua), la que nos proporcionó una lechada de densidad 15.6 lb/gl, la que fue colocada en un consistómetro presurizado para ser llevada a una temperatura de circulación de 105°C. A esta lechada se le tomaron las pruebas especificadas por el API dando los siguientes resultados:

**a.- Pérdida de Filtrado:**

Filtrado en 17.16" Vol = 47cc.

mediante la siguiente fórmula obtuvimos los resultados siguientes:

$$F = 2 \times V \times \sqrt{30 \times 60/t}$$

$$F = 2 \times 47 \times \sqrt{30 \times 60/17.16}$$

$$F = 963 \text{ cc.}$$

**b.- Reología:**

En el cuadro siguiente se muestran los resultados de la prueba realizada

RPM	Lectura del dial
300	105
200	93
100	67
6	32
3	24
V <sub>p</sub>	67
Y <sub>p</sub>	0

**c.- Agua libre:**

La muestra de cemento fue dejada en una probeta por un tiempo de dos horas, luego del cual la cantidad de agua libre registrada fue de cero por ciento.

**d.- Tiempo de Bombeabilidad:**

El tiempo empleado para alcanzar 50 unidades de consistencia fue de 2 horas 10 minutos; mientras que el tiempo requerido para alcanzar 100 unidades de consistencia fue de 2 horas 20 minutos.

**e.- Resistencia a la compresión:**

Para realizar esta prueba tomamos tres bloques de cemento fraguado, cuyo tiempo de curado y temperatura de curado fue de 24 horas y 129°F respectivamente, las que dieron los siguientes valores para la resistencia a la compresión:

Bloques	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peso (lbs)	Resis. comp. (psi)
1	5.095	4.95	14,500	3,709.30
2	5.099	4.96	14,000	3,571.3
3	5.1	4.97	15,500	3,944.77

## CEMENTO ATLAS

### ANALISIS QUIMICO

#### Composición de óxidos.

La composición de los óxidos (CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), fue determinada por la prueba de absorción atómica, utilizando el procedimiento de extracción con ácido clorhídrico.

El contenido de dióxido de silicio fue determinado mediante el procedimiento por el método gravimétrico ASTM C114/sección 6 para cementos con residuos insolubles mayores de 1%.

El porcentaje en peso de los óxidos encontrados en las muestras en el siguiente cuadro.

#### Composición de óxidos

(% en peso)

Compuesto	. Atlas
CaO	64.50
SiO <sub>2</sub>	21.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.98
MgO	1.40
Na <sub>2</sub> O	0.06
K <sub>2</sub> O	0.13
SO <sub>3</sub>	4.10

### **Contenido de las fases menores.**

La pérdida por ignición fue medida siguiendo el procedimiento del ASTM - C114 Sección 16. En este método el cemento es incinerado en una mufla a una temperatura controlada de 1000°C. La pérdida se asume que representa la humedad total y el CO<sub>2</sub> presentes en el cemento.

El residuo insoluble fue determinado después de la digestión del cemento en HCl, en el cual todas las fases principales son solubilizadas. La solución fue calentada a 100°C, luego filtrada y enjuagada con agua caliente hasta que el filtrado estuviese libre de iones cloruro. El filtro fue secado en horno a 100°C durante una hora e incinerado a 1,000°C durante 45 minutos. El residuo fue luego secado. Es de hacer notar que el residuo insoluble del cemento Portland está compuesto principalmente de sílica amorfa y alúmina.

La composición de estas fases menores se muestran en el siguiente cuadro:

## Composición de las fases menores

(% en peso)

Prueba	Cmto. Atlas
Pérdida por ignición	0.92
Residuos insolubles	1.30
Contenido de cal libre	0.52

### Composición de las fases principales.

Los cálculos de Bogue nos permiten calcular la composición teórica de las fases del cemento ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ ) a partir de la composición de los óxidos previamente discutidos.

Este método considera que todo el  $SO_3$  está contenido en los sulfatos, álcalis é ignora la posible presencia de sulfato de calcio semihidratado, anhidrita y singenita.

La cantidad de  $CaO$ , contenida en el yeso (expresada como  $CaO$ ), es sustraída del contenido total de  $CaO$  antes de calcular la composición de las diferentes fases. De igual forma, se sus-traen las cantidades de cal libre y de carbonato de calcio, ambos expresados como  $CaO$ .

Los resultados obtenidos, mediante los cálculos de Bogue, se presentan en el siguiente cuadro.



## Composición de las fases principales

(% en peso)

Fases	Cmto. Atlas
C <sub>3</sub> S	50.67
C <sub>2</sub> S	22.30
C <sub>4</sub> AF*	10.20
C <sub>3</sub> A*	8.10
C <sub>3</sub> S + C <sub>2</sub> S*	73.00
C <sub>3</sub> S + C <sub>2</sub> S**	73.00

Una pequeña modificación es usada por Dowell para mejorar la exactitud de los resultados. Adicionalmente al método usual, el siguiente parámetro se toma en cuenta antes de calcular la composición de las fases:

La cantidad de residuos insolubles, que se asume sea sílica pura, se sustrae del contenido de SiO<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos por este método modificado se presentan en el cuadro siguiente:

Composición de las fases principales  
calculada por el método modificado  
(% en peso)

Fases	Cmto. Atlas
C <sub>3</sub> S	60.60
SO <sub>2</sub>	11.10
C <sub>4</sub> AF	10.20
C <sub>3</sub> A	8.10

#### ANALISIS FISICO (GRANULOMETRIA)

La distribución del tamaño de las partículas es determinado por difracción de un "laser beam" (Aparato CILAS 715, F022). Unos pocos miligramos de cemento anhidro son colocados en suspensión en metanol absoluto (o etanol) y luego dispersos con ultrasonido antes de su medición a través de la celda.

Los resultados se presentan en el siguiente cuadro.

Características del tamaño de las partículas  
(micrones)

	Cmto. Atlas
<b>Diámetro medio</b>	<b>16.20</b>
Finos	5.20

## **Pruebas para la lechada de cemento**

De igual modo realizamos pruebas para las lechadas de cemento Atlas, las mismas que fueron corridas en el laboratorio de la compañía BJ Services en el distrito de Somatito - Perú.

Se preparó una lechada con una relación de agua/cemento de 46% (800 gr. de cemento y 368 mililitros de agua) la que nos dio una lechada de densidad 15.6 lb/gal.

Esta lechada resulto no ser fluida.

Por otro lado, preparamos una lechada con 650 grs. de cemento y 429 mililitros de agua, la que nos proporciona una lechada de densidad 14.1 lb/gal. Esta lechada resulto ser mucho más fluida y pudimos tomar las siguientes pruebas según la especificaciones API.

### **a.- Pérdida de Filtrado:**

Filtrado en 52.72" vol – 65 cc.

$$F = 2 \times V \times \sqrt{30} \times 60/t$$

$$F = 2 \times 65 \sqrt{30} \times 60/52.72$$

$$F = 759.61 \text{ cc.}$$

**b.- Reología:**

RPM	Lec. dial
300	118
200	108
100	94
6	43
3	35
Vp	36
Yp	82

**c.- Contenido de Agua Libre:**

La muestra de cemento fue dejada en reposo por un tiempo de dos horas, luego del cual, la cantidad de agua libre registrada fue de cero por ciento. d.- Tiempo de Bombeabilidad:

El tiempo empleado para alcanzar 50 unidades de consistencia fue de 2 horas 10 minutos; mientras que el tiempo requerido para alcanzar 100 unidades de consistencia fue de 2 horas 20 minutos.

**e.- Resistencia a la compresión:**

Para realizar esta prueba tomamos tres bloques de cemento fraguado, cuyo tiempo de curado y temperatura de curado fue de 24 horas y 129°F respectivamente, las que dieron los siguientes valores para la resistencia a la compresión:

Bloques	Largo (cm)	Ancho (cm)	Peso (lbs)	Resis. comp. (psi)
1	4.97	4.97	7,500	1,958.9
2	5.095	4.97	7,000	1,783.5
3	5.095	4.96	7,500	1,914.7

## 5.2. COMPARACION CON EL API

En este punto compararemos los resultados de las muestras de cemento Pacasmayo enviada al Centro de Investigación de Tomball en los Estados Unidos, y la muestra de cemento Atlas enviada al Centro de Tecnología para America Latina de Dowell en Venezuela.

Las muestras serán comparadas con las especificaciones dadas por el API.

Es de hacer notar que los valores de referencia son únicamente comparativos, y en ningún momento, deben ser tomados como valores representativos de un cemento catalogado como perfecto.

### **CEMENTO PACASMAYO.**

Según los requerimientos químicos dados por el API, la muestra de cemento Pacasmayo se puede catalogar como un cemento tipo ordinario clase "A" (cemento para construcción) que puede ser usado como un cemento para pozos que van desde los cero pies hasta los 6,000 pies de profundidad cuando no se requieren propiedades especiales.

Los requerimientos químicos para esta clase de cementos son:

Máximo contenido de MgO menor ó igual al 6%.

Máximo contenido de SO<sub>3</sub> igual a 3.5%

Cuando el contenido de C<sub>3</sub>A es menor ó igual a 8%, el máximo contenido de SO<sub>3</sub> debe ser 3%.

Por otro lado, cuando la relación en porcentaje de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es menor ó igual a 0.64, el contenido de C<sub>3</sub>A es cero.

Cuando la relación Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es mayor que 0.64 el compuesto debe ser calculado como:

$$C_3A = (2.65 \times \%Al_2O_3) - (1.69 \times \%Fe_2O_3)$$

Reemplazando en esta fórmula nuestros valores, obtenemos:

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 5.1/3.2 = 1.594, valor que es superior a 0.64 y por lo tanto el valor de C<sub>3</sub>A será calculado usando la anterior fórmula.

$$C_3A = (2.65 \times 5.2) - (1.69 \times 3.2) \quad 8.107\%$$

$$C_4AF = (3.04 \times \%Fe_2O_3) - 3.04 \times 3.2\%$$

$$C_4AF = 9.728\%$$

$$C_3S = (4.07 \times \%CaO) - (7.60 \times \%SiO_2) - (6.72 \times \%Al_2O_3) - (1.43 \times \%Fe_2O_3) - (2.85 \times \%SO_3)$$

$$C_3S = (4.07 \times 62.8\%) - (7.60 \times 20.2\%) - (6.72 \times 5.1\%) - (1.43 \times 3.2\%) - (2.85 \times 1.8\%)$$

$$C_3S \quad 58.098\%$$

Sin embargo, no existen requerimientos API para un cemento ordinario clase A en términos de las fases de los silicatos y de los aluminatos.

De acuerdo a las especificaciones API 10A, la pérdida por ignición y los residuos insolubles de un cemento clase A debe ser de 3% y 0.75% respectivamente.

En lo que respecta a las pruebas de resistencia a la compresión, observamos que según las normas API, está no debe ser menor de 1800 psi para un tiempo de curado de 24 horas y una temperatura de curado de 100°F, en nuestro caso la temperatura de curado fue de 129°F y la prueba nos dio valores mayores a los 3000 psi.

En la prueba para el tiempo de espesamiento, éste no debe ser menor de 90 minutos para obtener una consistencia de 30 unidades; para nuestro caso este tiempo de espesamiento para alcanzar una consistencia de 50 y 100 unidades fue de 130 y 140 minutos respectivamente.

En lo que respecta a las pruebas del contenido de agua libre la muestra de cemento Pacasmayo nos dio 0%, valor que es acep-



tados por el API ya que no se mencionan valores al respecto para los cementos clase A.

En la prueba de filtrado obtuvimos para el cemento Pacasmayo un valor de 963 cc.

Compuesto	Cmto. Clase A	Cmto.		Cmto. Pacasmayo
		Clase G ó H MSR	HSR	
Oxido de Magnesio MgO...(máx %)	6.00	6.00	6.00	5.00
Trióxido de azufre ..... (máx %)	3.50	3.00	3.00	1.80
Pérdida por ignición ..... (máx %)	3.00	3.00	3.00	--
Residuos insolubles ..... (máx %)	0.75	0.75	0.75	--
Aluminato tricálcico ..... (máx %)	--	8.00	3.00	8.10
Silicato tricálcico ..... (máx %)	--	58.0	65.0	58.09
..... (mín %)	--	48.0	48.0	
Contenido total de álcali (Na <sub>2</sub> O) <sub>equiv</sub> ..... (máx %)	--	0.75	0.75	0.59
C <sub>4</sub> AF + 2(C <sub>3</sub> A) .....(máx %)	--	24.0	24.0	25.94
Resist. a la comp. (psi)..... (mín %)	1,800*	--	--	+ 3,000
Tiempo de espesamiento... (mín %)	90'♣	90'♣	90'♣	140'•
Cant. de agua libre ..... (máx ml)	--	3.5	3.5	--

\* 1800 psi para una temperatura de curado de 100°F.

♣ 90 min para una consistencia de 30 unidades.

• 140 min para una consistencia de 100 unidades.

## CEMENTO ATLAS

Según los requerimientos químicos, la muestra de cemento enviada al Centro de Tecnología para América Latina de Dowell corresponde al tipo de cemento ordinario - clase "A" (cemento para construcción); el cual presenta valores para el contenido de óxido de magnesio y la pérdida por ignición de 1.40% y 0.92% respectivamente, valores que se encuentran dentro de los rangos dados por el API que son como máximo de 6% y 3% respectivamente.

En lo que respecta a los residuos insolubles el valor reportado es de 1.30%, valor que está por encima del máximo reportado por el API que es de 0.75%.

Por otro lado, el contenido de trióxido de azufre reportado es de 4.1%, mientras que el valor máximo dado por el API es de 3.5%.

Aunque no existen requerimientos químicos API en cuanto a las fases de los aluminatos y silicatos, el contenido de estos se puede hallar haciendo uso de las expresiones que se dan en la tabla de requerimientos químicos dados por el API.

Cuando la relación de los porcentajes de  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$  es de 0.64 ó menos, El  $C_3A$  contenido es cero. Cuando la relación de

$\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es mayor a 0.64 el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  debe ser calculado como sigue:

$$\text{Por lo tanto, } \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4.98/2.99 \quad 1.67 > 0.64$$

Luego, el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  será:

$$\text{C}_3\text{A} = (2.65 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1.69 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_3\text{A} = (2.65 \times 4.98\%) - (1.69 \times 2.99\%)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 8.14\%$$

$$\text{C}_4\text{AF} = (3.04 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) = 3.04 \times 2.99\%$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 9.09\%$$

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{S} = & (4.07 \times \% \text{CaO}) - (7.60 \times \% \text{SiO}_2) - (6.72 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - \\ & (1.43 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2.85 \times \% \text{SO}_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{S} = & (4.07 \times 64.5\%) - (7.60 \times 21.1\%) - (6.72 \times 4.98\%) - \\ & (1.43 \times 2.99\%) - (2.85 \times 4.1\%) \end{aligned}$$

$$\text{C}_3\text{S} = 52.73\%$$

Por otro lado, es importante mencionar que el contenido de cal libre reportado de 0.52%, está por debajo del máximo límite recomendado que es de 1.5%.

Según los requerimientos físicos, el diámetro medio de las partículas es de 16.2 micrones y corresponde al comúnmente encon-

trado en las muestras de cemento tipo ordinario - clase "A" (cemento para construcción).

En lo que respecta a las pruebas de esfuerzo a la compresión, observamos que según las normas API, esta no debe ser menor que 1,800 psi para un tiempo de curado de 24 horas y una temperatura de curado de 100°F .

En nuestro caso la temperatura de curado fue de 129°F y la resistencia a la compresión que obtuvimos fue en su menor valor de 1,783.5 psi, valor que no difiere mucho del mínimo recomendado.

De igual modo, el tiempo de espesamiento observado para los cementos de tipo ordinario - clase "A" no debe ser menor de 90 minutos para obtener una consistencia de 30 unidades, en nuestro caso el tiempo para alcanzar una consistencia de 50 y 100 unidades fue de 122 y 128 minutos respectivamente.

En la prueba realizada para hallar el contenido de agua libre obtuvimos un valor de 0%, lo que está de acuerdo al API (la muestra no debe contener agua libre).

En lo que respecta a la pérdida de filtrado, se obtuvo un valor de 759.61 cc.

A continuación presentaremos un cuadro comparativo de estos datos y especificaciones API.

Compuesto	Cmto. Clase A	Cmto.		Cmto. Atlas
		Clase G ó H MSR	HSR	
Oxido de Magnesio MgO .. (máx %)	6.00	6.00	6.00	1.40
Trióxido de azufre ..... (máx %)	3.50	3.00	3.00	4.10
Pérdida por ignición ..... (máx %)	3.00	3.00	3.00	0.92
Residuos insolubles ..... (máx %)	0.75	0.75	0.75	1.30
Aluminato tricálcico ..... (máx %)	--	8.00	3.00	8.10
Silicato tricálcico ..... (máx %)	--	58.0	65.0	50.67
..... (mín %)	--	48.0	48.0	
Contenido total de álcali (Na <sub>2</sub> O) <sub>equiv</sub> ..... (máx %)	--	0.75	0.75	0.65
C <sub>4</sub> AF + 2(C <sub>3</sub> A) ..... (máx %)	--	24.0	24.0	26.3
Resist. a la comp (psi) ..... (mín %)	1,800*	--	--	1,784
Tiempo de espesamiento .. (mín %)	90'♣	90'♣	90'♣	128'●
Cant. De agua libre ..... (máx ml)	--	3.5	3.5	--

\* 1800 psi para una temperatura de curado de 100°F.

♣ 90 min para una consistencia de 30 unidades.

● 128 min para una consistencia de 100 unidades.

## **6. EVALUACION DE LAS LECHADAS DE CEMENTO USADAS EN OPERACIONES DEL NOROESTE.**

Para llevar a cabo esta evaluación, se realizó una recopilación de datos de archivos de los pozos de los cuales hemos tomado las propiedades de las lechadas requeridas.

### **6.1. TIPOS Y PROPIEDADES PRINCIPALES DE LAS LECHADAS DE CEMENTO.**

Las lechadas de cemento utilizadas en las operaciones de cementación de los pozos del Noroeste peruano se pueden clasificar en dos tipos: lechadas convencionales y lechadas modificadas, que son usadas de acuerdo con los problemas que se encuentren en el pozo y por ende de acuerdo a las propiedades que se requieran de las lechadas.

#### **6.1.2. LECHADAS CONVENCIONALES**

Las lechadas convencionales son aquellas en las que no se requieren de propiedades especiales y por lo tanto no necesitan de aditivos especiales.

## 6.1.2. LECHADAS MODIFICADAS

Las lechadas modificadas son aquellas que vamos a usar en el caso de que tengamos la certeza de que se van a presentar problemas al momento de cementar un pozo.

Entre los problemas más frecuentes que se pueden presentar tenemos el de pérdida de circulación y el de flujo de gas en el espacio anular.

- **Pérdida de circulación**

La pérdida de circulación es definida como la pérdida total ó parcial del fluido de perforación ó cemento a zonas de alta permeabilidad, formaciones cavernosas y fracturas naturales ó inducidas durante la perforación ó completación de un pozo o en formaciones depletadas.

- **Flujo de gas en el espacio anular**

El flujo de gas interzonal y en el espacio anular poco después de haber colocado el cemento, continúa siendo el mayor problema asociado a la aplicación de cementación en tuberías de producción y lánas. Estos problemas son de particular significación en pozos con presión de gas anormal y las mediciones de corrección para controlar tal flujo requieren a menudo de mayor consideración.

Mientras el mecanismo exacto de la falla puede ser muy complejo, hay evidencia sustancial que indica que el flujo de gas ocurre debido a una reducción en la presión hidrostática ejercida por la columna de cemento durante su período inicial de hidratación.

El objeto de resolver el flujo de gas en el espacio anular involucra una nueva lechada de cemento diseñada para mantener un gradiente de fluido cerca de la densidad original durante el período de hidratación inicial. El cemento diseñado para este tipo de operación, está formulado para contener burbujas de gas diminutas que actúan como compensadores de presión compresibles durante el período inicial de hidratación. A medida que la lechada de cemento estático comienza a perder su gradiente hidrostática inicial estas burbujas de gas se expanden para mantener una presión constante en el fondo del pozo, proveyendo así un desbalance hidrostático positivo adecuado.



## 7. DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CEMENTO

En este punto tomaremos como ejemplo al pozo 7968 perforado en el yacimiento Peña Negra por el equipo N° 8, hasta la profundidad final de 4,500', para obtener producción comercial de petróleo del Mbro. Mogollón superior, Fms. Ostrea, Echino Ins., Echino Rep. y el Mbro. Terebratula.

Los topes tanto de las formaciones estimadas como las encontradas, así como las gradientes de fractura de estas se dan a continuación:

Formación	Tope estimado	Formación	Tope encontrado	Grad. de fractura (psi/pie)
HELICO	0'	ALUVIAL	0'	0.90
LOBITOS	525'	HELICO	60'	0.90
TEREBRATULA*	1,175'	LOBITOS	600'	0.90
ECHINO REP.*	1,800'	TEREBRATULA*	1,100'	0.70
CLAVEL REP.	2,460'	ECHINO REP.*	1,980'	0.75
ECHINO INS.*	2,575'	ECHINO INS.*	2,490'	0.80
CLAVEL INS.	2,950'	CLAVEL	2,930'	0.90
OSTREA*	3,150'	OSTREA*	3,570'	0.80
MOGOLON SUP.	3,500'	MOGOLLON*	3,820'	0.75
MOG. MED*	4,450'	MOG. MED*	4,370'	0.75

\* Formaciones de interés.

El programa de forros a usar fue el siguiente:

Forros de superficie: 0' - 200' 9 <sup>5</sup>/<sub>8</sub>" H-40, 32.3 lb/pie STC

Forros de Producción: 0' - 500' 5 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>" N-80, 17.0 lb/pie LTC

500' - 4 500' 5 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>" J-55, 15.5 lb/pie STC

Para la elaboración de el diseño de las mezclas de cemento se tomó en cuenta la información de la densidad del lodo de perforación según el reporte de el avance de este.

Prof. (ft)	Den. #/gl	Pres. (psi)	Prof. (ft)	Den. #/gl	Pres. (psi)	Prof. (ft)	Den. #/gl	Pres. (psi)
316	8.8	145	2931	10.2	1555	3995	11.7	2431
621	8.9	287	3065	10.9	1737	4064	11.6	2451
1030	9.2	493	3208	10.9	1818	4119	11.9	2549
1418	9.2	678	3313	11.1	1912	4188	11.9	2592
1667	9.3	806	3397	11.2	1978	4244	11.8	2604
1881	9.3	910	3486	11.3	2048	4301	11.9	2662
2093	9.5	1034	3602	11.7	2192	4361	12.0	2721
2300	9.6	1148	3664	11.6	2210	4402	11.9	2724
2473	9.7	1247	3748	11.7	2280	4412	12.0	2753
2590	9.8	1320	3784	11.7	2302	4473	11.9	2768
2786	9.9	1434	3830	11.7	2330	4500	11.9	2785

Para diseñar las mezclas que vamos a usar para cementar el pozo 7968 de Peña Negra, seguiremos los pasos que a continuación se indican:

## **I. Gráfico de las curvas de presión poral y presión de fractura.**

1.- Trazamos las curvas del lodo de perforación - profundidad vs. presión poral, donde la presión poral está dada por la siguiente fórmula:

$$P_{\text{poral}} = 0.052 \times \rho_{\text{lodo}} \times \text{Prof. (para todas las profundidades reportadas)}.$$

2.- Trazamos la curva de gradiente de la formación con las gradientes tomadas de los fracturamientos más recientes de los pozos vecinos y los espesores de las formaciones.

3.- Hallamos las mezclas adecuadas de acuerdo a las formaciones encontradas y teniendo en cuenta que las longitudes de las mezclas no deben ser menores de 700 pies y que éstas no debe estar por debajo de la curva de presiones porales ni por encima de las curvas de presión de fractura.

## **II. Cálculo de las densidades y profundidades de las mezclas**

**Mezcla I.-** Probaremos con una mezcla de 12.5 lb/gl. y una longitud de 1000 pies.

$$P_A = \rho_m \times 0.052 \times \text{prof.}$$

$$P_A = 12.5 \times 0.052 \times 1000 = 650 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. A)

Con la densidad del agua:

$$P_1 = 8.34 \times 0.052 \times 1000' = 433.68 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 1 = (650, 1000) y unimos los puntos O, A y 1; como ésta gráfica se encuentra dentro de las curvas de presión poral y presión de fractura, entonces nuestra primera mezcla será de 12.5 lb/gal.

**Mezcla II.-** Probaremos con una mezcla de 13.5 lb/gal. y una longitud de 1 000 pies.

$$P_B = P_A + 13.5 \times 0.052 \times 1000 = 1352 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. B)

Con la densidad del agua:

$$P_2 = P_A + 8.34 \times 0.052 \times 1000' = 1083.68 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 2 = (1083.68, 2000) y unimos los puntos A, B y 2; como ésta gráfica se encuentra dentro de las curvas de presión poral y presión de fractura, entonces nuestra segunda mezcla será de 13.5 lb/gal.

**Mezcla III.-** Probaremos con una mezcla de 14.1 lb/gal. y una longitud de 1100 pies.

$$P_C = P_B + 14.1 \times 0.052 \times 1100 = 2158.52 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. C)

Con la densidad del agua:

$$P_3 = P_B + 8.34 \times 0.052 \times 1100' = 1829.04 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 3 = (1829.04, 3100) y unimos los puntos B, C y 3; como ésta gráfica se encuentra dentro de las curvas de presión poral y presión de fractura, entonces nuestra tercera mezcla será de 14.1 lb/gal.

**Mezcla IV.-** Probaremos con una mezcla de 14.7 lb/gl. y una longitud de 1400 pies.

$$P_D = P_C + 14.7 \times 0.052 \times 1400 = 3228.68 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. D)

Con la densidad del agua:

$$P_4 = P_C + 8.34 \times 0.052 \times 1400' = 2765.67 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 4 = (2765.67, 4500) y unimos los puntos C, D y 4; como ésta el punto de 4 se encuentra debajo de las curvas de presión poral y, entonces vamos a variar las longitudes de las mezclas.

Nuevamente rediseñaremos nuestras dos últimas mezclas:

**Mezcla III\*.-** Probaremos con una mezcla de 14.1 lb/gal. y una longitud de 1200 pies.

$$P_{C'} = P_B + 14.1 \times 0.052 \times 1200 = 2231.84 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. C)

Con la densidad del agua:

$$P_{3'} = P_B + 8.34 \times 0.052 \times 1100' = 1872.42 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 3' = (1872.42, 3200) y unimos los puntos B, C' y 3'; como ésta gráfica se encuentra dentro de las curvas de presión poral y presión de fractura, entonces nuestra tercera mezcla será de 14.1 lb/gal.

**Mezcla IV\*.-** Probaremos con una mezcla de 14.7 lb/gal. y una longitud de 1300 pies.

$$P_{D'} = P_{C'} + 14.7 \times 0.052 \times 1300 = 3225.56 \text{ psi.}$$

luego graficamos presión vs. profundidad (pto. D')

Con la densidad del agua:

$$P_{4'} = P_{C'} + 8.34 \times 0.052 \times 1300' = 2795.62 \text{ psi.}$$

luego graficamos el punto 4' = (2795.62,4500) y unimos los puntos C', D' y 4'; como ésta el punto de 4 se encuentra en el límite de la curva de presión poral pero por debajo de la curva de presión de fractura, entonces podemos aceptar este peso y por lo tanto las dos últimas mezclas halladas.

### III. Cálculo de los volúmenes de cemento para cada mezcla de cemento.

Teniendo las mezclas definidas como se indica:

Composición	Mezcla I	Mezcla II	Mezcla III	Mezcla IV
Cemento	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%
Puzolana	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%
D020	8.00%	3.50%	---	---
D112	0.47%	0.50%	0.48%	0.53%
D065	0.10%	0.10%	0.25%	0.25%
DO47	0.006 gl/Sx	0.005 gl/Sx	0.005 gl/Sx	0.004 gl/Sx

#### Nota

Las puzolanas son materiales silíceos, los cuales en presencia de limo y agua reaccionan químicamente y desarrollan propiedades cementantes. Las puzolanas pueden ser naturales, si son de origen volcánico; y artificiales, si son obtenidas por el tratamiento caliente de arcillas, esquistos y otras rocas silíceas.

Para nuestro caso hemos usado una mezcla de 50% cemento y 50% puzolana debido a las ventajas que ofrece la puzolana, como:

- Aligeran el peso de la lechada
- Ahorro económico
- Resistencia a la corrosión

- Bajo calor de hidratación
- Baja permeabilidad
- Mejora de la bombeabilidad de la mezcla

**Mezcla I: (0' - 1000')  $\rho = 12.5$  lbs/gal.**

Cmto + 50%puz. + 8%D020 + 0.47%D112 + 0.10%D065 + 0.006g

l/sxD047

Cálculo de requerimientos de agua y rendimiento.

Tomando como base un saco de material cementante, con los datos de los porcentajes en peso de cada componente, gravedades específicas y haciendo uso de las fórmulas de densidad hallamos la siguiente tabla:

Componente	Sp-gr	W(lb)	V(gal)
Cemento	3.14	47.00	$47/8.34 \times 3.14 = 1.795$
Puzolana	2.46	37.00	$37/8.34 \times 2.46 = 1.803$
D020	2.65	6.72	$6.72/8.34 \times 2.65 = 0.304$
D112	1.15	0.39	$0.39/8.34 \times 1.15 = 0.041$
D065	1.58	0.084	$0.084/8.34 \times 1.58 = 0.006$
D047	1.00	0.050	0.006
AGUA	1.00	83.803	$83.803/8.34 = 10.0498$
			$V_M = 14.0048$



$$\rho = W/V \quad W = W1 + W2 + \dots \quad V = V1 + V2 + \dots$$

$$\frac{\rho}{W_a \times 8.34} = \frac{(47 + 37 + 6.72 + 0.39 + 0.084 + 0.0500 + W_a)}{3.14 \times 47 + 2.46 \times 37 + 2.65 \times 6.72 + 1.15 \times 0.39 + 1.58 \times 0.084 + 1 \times 0.0500 + W_a}$$

$$1.4988 \times (32.987 + W_{\text{agua}}) = 91.244 + W_{\text{agua}}$$

$$W_{\text{agua}} = W_a = 83.8075 \text{ lbs.}$$

$$V_{\text{agua}} = 10.0488 \text{ gal.}$$

$$\text{rendimiento: } r = V_M/7.48 = 14.0048/7.48 = 1.872 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$$

$$0 - 227.6': V_{(9 \frac{5}{8}" - 5 \frac{1}{2}"})} = 0.2769 \times 227.6 = 63 \text{ ft}^3$$

$$227.6' - 1000': V_{(9 \frac{1}{8}" - 5 \frac{1}{2}"})} = 0.2891 \times 772.4 = 223.3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Luego de } 0 - 1000': V = 286.3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Sx equiv.} = 286.3/1.872 = 153 \text{ Sx} < > 12847 \text{ lbs}$$

$$\text{Sx cemento} = 12847 \times 0.54/94 = 73 \text{ Sx}$$

$$\text{Sx puzolana} = 12847 \times 0.46/74 = 80 \text{ Sx.}$$

Aditivos:

$$\text{D020: } 12847 \times 8.00\% = 1028 \text{ lbs.}$$

$$\text{D112: } 12847 \times 0.47\% = 60.4 \text{ lbs.}$$

$$\text{D065: } 12847 \times 0.10\% = 13 \text{ lbs.}$$

$$\text{D047: } 153 \times 0.006 = 1 \text{ gal.}$$

Mezcla II: (1000' - 2000')  $\rho = 13.5 \text{ lbs/gal.}$

Cmto + 50%puz. + 3.5%D020 + 0.5%D112 + 0.1%D065 + 0.005gl/  
sxD047

Cálculo de requerimientos de agua y rendimiento.

Siguiendo el mismo procedimiento que para la mezcla anterior ha-  
llamos la siguiente tabla:

Componente	Sp-gr	W(lb)	V(gal)
Cemento	3.14	47.00	1.795
Puzolana	2.46	37.00	1.803
D020	2.65	2.94	0.133
D112	1.15	0.42	0.044
D065	1.58	0.084	0.0064
D047	1.00	0.0417	0.005
AGUA	1.00	58.778	7.0433
			$V_M = 10.8297$

rendimiento:  $r = V_M/7.48 = 10.8297/7.48 = 1.4478 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$

1000' - 2000':  $V_{(9 \ 1/8 - 5 \ 1/2)} = 0.2891 \times 1000 = 289 \text{ ft}^3$

Sx equiv. =  $289/1.4478 = 199.6 \text{ Sx} < > 16768 \text{ lbs}$

Sx cemento =  $16768 \times 0.54/94 = 96 \text{ Sx}$

$$Sx \text{ puzolana} = 16768 \times 0.46/74 = 104 \text{ Sx.}$$

Aditivos:

$$D020: 16768 \times 3.50\% = 587 \text{ lbs.}$$

$$D112: 16768 \times 0.50\% = 84 \text{ lbs.}$$

$$D065: 16768 \times 0.10\% = 17 \text{ lbs.}$$

$$D047: 199.6 \times 0.005 = 1.0 \text{ gal.}$$

**Mezcla III: (2000' - 3200')  $\rho = 14.1 \text{ lbs/gal.}$**

$$\text{Cmto} + 50\% \text{puz.} + 0.48\% \text{D112} + 0.25\% \text{D065} + 0.005 \text{gal/sxD047}$$

Hallamos la siguiente tabla, de la misma forma como lo hicimos para las mezclas anteriores:

Componente	Sp-gr	W(lb)	V(gal)
Cemento	3.14	47.00	1.795
Puzolana	2.46	37.00	1.803
D112	1.15	0.4032	0.042
D065	1.58	0.210	0.0159
D047	1.00	0.0417	0.005
AGUA	1.00	47.8693	5.7355
			$V_M = 9.3964$

$$\text{rendimiento: } r = V_M/7.48 = 9.3964/7.48 = 1.2562 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$$

$$2000' - 3200': V_{(9 \ 1/8 - 5 \ 1/2)} = 0.2891 \times 1200 = 346.92 \text{ ft}^3$$

$$Sx \text{ equiv.} = 346.92/1.2562 = 276.16 \text{ Sx} < > 23198 \text{ lbs}$$

$$Sx \text{ cemento} = 23198 \times 0.54/94 = 133 \text{ Sx}$$

$$Sx \text{ puzolana} = 23198 \times 0.46/74 = 144 \text{ Sx.}$$

Aditivos:

$$D112: 23198 \times 0.50\% = 111 \text{ lbs.}$$

$$D065: 23198 \times 0.10\% = 58 \text{ lbs.}$$

$$D047: 276 \times 0.005 = 1.38 \text{ gal.}$$

**Mezcla IV: (3200' - 4460')  $\rho = 14.7 \text{ lbs/gal.}$**

Cemento + 50%puzolana + 0.53%D112 + 0.25%D065 + 0.004gal/sx

D047

Cálculo de requerimientos de agua y rendimiento.

Por último hallamos la cuarta mezcla de la misma forma como lo hicimos para la mezcla anterior:

Componente	Sp-gr	W(lb)	V(gal)
Cemento	3.14	47.00	1.795
Puzolana	2.46	37.00	1.803
D112	1.15	0.4452	0.0464
D065	1.58	0.210	0.0159
D047	1.00	0.0336	0.004
AGUA	1.00	40.4148	4.8459
			$V_M = 8.5103$

rendimiento:  $r = V_M/7.48 = 8.5103/7.48 = 1.1377 \text{ ft}^3/\text{Sx}$ .

3200' - 4460':  $V_{(9 \frac{1}{8} - 5 \frac{1}{2})} = 0.2891 \times 1260 = 364.22 \text{ ft}^3$

Sx equiv. =  $364.22/1.1377 = 320.18 \text{ Sx} < > 26859 \text{ lbs}$

Sx cemento =  $26859 \times 0.54/94 = 155 \text{ Sx}$

Sx puzolana =  $26859 \times 0.46/74 = 167 \text{ Sx}$ .

Aditivos:

D112:  $26859 \times 0.53\% = 143 \text{ lbs}$ .

D065:  $26859 \times 0.25\% = 67 \text{ lbs}$ .

D047:  $320 \times 0.004 = 1.3 \text{ gal}$ .

#### IV. Desplazamiento

De los datos registrados en el archivo, sabemos que el zapato guía se encuentra a 4460' y que la válvula flotadora se encuentra a 4420', luego mediante las capacidades, hallamos el volumen de fluido requerido para el desplazamiento del cemento:

$$V_d = 500 \times 0.0232 + (4420 - 500) \times 0.0238 = 105 \text{ bls.}$$

#### V. Presión de llegada

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P - P_H$$

$$P_t = 0.052 \times 12.5 \times 1000 + 0.052 \times 13.1 \times 1000 + 0.052 \times 14.1 \times 1200 + \\ 0.052 \times 14.7 \times 1220 + 200 - 0.366 \times 4420 = 1725 \text{ psi.}$$

⇒ Presurizamos a 2000 psi y probamos con 2700 psi.

## VI. Análisis de costos

El análisis de costos para este trabajo lo haremos de tomando como base la cementación del pozo diseñado anteriormente, pozo 7968 Peña Negra, tanto para una mezcla de cemento pacasmayo (cemento tipo ordinario - clase A) como para una mezcla de cemento para pozos clase H.

### CEMENTO PACASMAYO

La cantidad de cemento usada en este pozo corresponde al suma del cemento requerido para cada una de las mezclas halladas más la cantidad de puzolana y bentonita empleada.

En este análisis no tomaremos en cuenta la cantidad de aditivos que se han requerido debido a que como han sido usados en poca cantidad no afectaría mucho el costo de la mezcla.

cant. de cemento usado:  $73 + 96 + 133 + 155 = 457$  Sx.

Cant. de puzolana:  $80 + 104 + 144 + 167 = 495$  Sx.

Cant. de bentonita:  $1028 + 587 = 1615$  lbs.

Costo del saco de cemento: S/. 14.00

Costo del saco de puzolana: \$. 4.01

Costo de la libra de bentonita: \$. 0.06

cotizando el dólar : S/. 2.65

Costo total del cemento:

$$S/. 14.00 \times 457 = S/. 6393.43 = \quad \quad \quad \$ . 2414.34$$

$$\text{Costo total de la puzolana: } \$ . 4.01 \times 495 = \quad \$ . 1984.95$$

$$\text{Costo total de la bentonita: } \$ . 0.06 \times 1615 = \quad \$ . \quad 96.90$$

$$\text{Costo total del material cementante:} \quad \quad \quad \$ . 4496.19$$

### **CEMENTO CLASE H**

Para hacer el análisis de costos de las mezclas de cemento a usar en el pozo mencionado anteriormente con esta clase de cemento, asumiremos que todo el material cementante a usar es cemento clase H y para ello haremos un análisis de volúmenes; de igual manera que para el cemento Pacasmayo, no tomaremos en cuenta el costo de los aditivos requeridos.

**Mezcla I: (0'- 1000')  $\rho = 12.5 \text{ lbs/gal.}$**

$$Sp-gr_{cmento} = 3.16$$

$$\rho_{H_2O} = 8.34 \text{ lbs/gal.}$$

Tomando como base 1 sx de cemento:

$$V_{cmento} = \frac{94}{3.16 \times 8.34} = 3.56 \text{ gal}$$

$$\rho = W/V \quad \quad W = W1 + W2 + \quad \quad V = V1 + V2 + \dots$$

$$\frac{\rho}{W_a \times 8.34} = \frac{(94 + W_a)}{\frac{94 + W_a}{3.16}}$$

$$W_a = 99.0684 \text{ lbs.}$$

$$V_a = 99.0684/8.34 = 11.8787 \text{ gal.}$$

$$V_M = V_a + V_{\text{cmto}} = 11.8787 + 3.5668 = 15.4455 \text{ gal.}$$

$$\text{rendimiento } r = 15.4455/7.48 = 2.0649 \text{ ft}^3/\text{gal.}$$

$$0 - 227.6': V_{(9 \frac{5}{8} \cdot (9' - 5 \frac{1}{2}'))} = 0.2769 \times 227.6 = 63 \text{ ft}^3$$

$$227.6' - 1000': V_{(9 \frac{1}{8} \cdot 5 \frac{1}{2}')} = 0.2891 \times 772.4 = 223.3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Luego de } 0 - 1000': V = 286.3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Sx de cemento} = 286.3/2.0649 = 138.65 \text{ Sx}$$

**Mezcla II: (1000' - 2000')  $\rho = 13.5 \text{ lbs/gal.}$**

Siguiendo el mismo procedimiento que para la mezcla anterior llamamos:

$$W_a = 77.8260 \text{ lbs.}$$

$$V_a = 77.8260/8.34 = 9.3317 \text{ gal.}$$

$$V_M = V_a + V_{\text{cmto}} = 9.3317 + 3.5668 = 12.8985 \text{ gal.}$$

$$\text{rendimiento } r = V_M/7.48 = 12.8985/7.48 = 1.7244 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$$

$$1000' - 2000': V_{(9 \frac{1}{8} \cdot 5 \frac{1}{2}')} = 0.2891 \times 1000 = 289 \text{ ft}^3$$

$$\text{Sx de cemento} = 289/1.7244 = 167.65 \text{ Sx}$$



**Mezcla III: (2000' - 3200')  $\rho = 14.1$  lbs/gal.**

De la misma forma como lo hicimos para las mezclas anteriores:

$$W_a = 63.2864 \text{ lbs.}$$

$$V_a = 63.2864/8.34 = 7.5883 \text{ gal.}$$

$$V_M = V_a + V_{\text{cmto}} = 7.5883 + 3.5668 = 11.1551 \text{ gal.}$$

$$\text{rendimiento } r = V_M/7.48 = 11.1551/7.48 = 1.4913 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$$

$$2000' - 3200': V_{(9 \frac{1}{8} - 5 \frac{1}{2})} = 0.2891 \times 1200 = 346.92 \text{ ft}^3$$

$$\text{Sx de cemento} = 346.92/1.4913 = 232.62 \text{ Sx}$$

**Mezcla IV (3200' - 4460')  $\rho = 14.7$  lbs/gal.**

$$W_a = 54.5097 \text{ lbs.}$$

$$V_a = 54.5097/8.34 = 6.5359 \text{ gal.}$$

$$V_M = V_a + V_{\text{cmto}} = 6.5359 + 3.5668 = 10.1027 \text{ gal.}$$

$$\text{rendimiento } r = V_M/7.48 = 10.1027/7.48 = 1.3506 \text{ ft}^3/\text{Sx.}$$

$$3200' - 4460': V_{(9 \frac{1}{8} - 5 \frac{1}{2})} = 0.2891 \times 1260 = 364.22 \text{ ft}^3$$

$$\text{Sx de cemento} = 364.22/1.3506 = 256.35 \text{ Sx}$$

Total de cemento a usar:

$$V_I + V_{II} + V_{III} + V_{IV} = 138.65 + 167.65 + 232.63 + 256.35$$

$$V \text{ total} = 759.28 \text{ Sx.}$$

Costo del saco de cemento: \$ 11.00

Costo total del cemento:  $\$.11.00 \times 759 = \$ 8349.00$

## 8. CONCLUSIONES

Según los resultados de las muestras enviadas al laboratorio de la compañía BJ Services en Estados Unidos y complementados con los resultados de las pruebas realizadas en la compañía BJ Services del distrito de Somatito para la muestra de cemento Pacasmayo, al efectuar la comparación con las especificaciones API hemos podido observar lo siguiente:

- El contenido de óxido de Magnesio y trióxido de Azufre de ésta muestra cumple con las especificaciones API tanto para las clase A tipo ordinario y G y H de alta y moderada resistencia a los sulfatos.
- En cuanto al contenido de  $C_3A$  y  $C_3S$  los valores para este tipo de cemento son ligeramente superiores a los del cemento para pozos clase G y H en los tipos de alta y moderada resistencia a los sulfatos.
- El contenido de  $C_4AF + 2(C_3A)$  es superior al valor máximo dado para las clases G y H en un 2% aproximadamente.
- El contenido de agua libre es de cero mililitros, que está de acuerdo con las especificaciones API para el cemento clase A y que está por debajo del máximo dado para los cementos clases G y H en los tipos de alta y moderada resistencia a los sulfatos.

Por lo expuesto anteriormente, podemos decir de que el cemento Pacasmayo no cumple con las especificaciones API para los cementos recomendados para pozos de petróleo como son el cemento clase G y H, en cambio, según los valores hallados ésta muestra de cemento puede ser catalogada como un cemento clase A tipo ordinario ya que el contenido de sus componentes está dentro del rango especificado por el API, por otro lado para los cementos clase A no se hace referencia al contenido de las fases de los aluminatos y silicatos.

Según los resultados de la muestra de cemento Atlas enviada al laboratorio de la compañía Dowell en Venezuela y complementándolas con los resultados de las pruebas realizadas en la compañía BJ Services del distrito de Somatito, al efectuar las comparaciones con la de las especificaciones dadas por el API, pudimos observar:

- El contenido de óxido de Magnesio reportado está muy por debajo del máximo especificado, en cambio el contenido de trióxido de Azufre se encuentra sobre el contenido máximo especificado tanto para la clase de cemento A tipo ordinario como para las clases G y H de los tipos de alta y moderada resistencia a los sulfatos de los cementos recomendados para pozos de petróleo.
- En cuanto al valor reportado para la pérdida por ignición este es mucho más bajo al valor dado como máximo por el API, en cambio el valor reportado para los residuos insolubles es superior al dado

por las especificaciones API en un 73%, tanto para las clases de cementos A, G y H.

- En cuanto a las fases del  $C_3A$  y  $C_3S$ , los valores reportados se encuentran dentro de los límites para las clases de cemento G y H de moderada resistencia a los sulfatos.
- Respecto al contenido de las fases de  $C_4AF + 2(C_3A)$ , el valor reportado es superior al máximo establecido por el API para los cementos de las clases G y H, en cambio el contenido total de álcali se encuentra debajo del máximo dado por el API para los cementos de las clases G y H.
- El contenido de agua libre hallado fue de cero mililitros, valor que corresponde al dado por las especificaciones API para el caso de el cemento clase A pero que a su vez se encuentra por debajo de un cemento clase G ó H.

Por lo expuesto anteriormente, podemos decir de que este cemento no cumple con las especificaciones dadas por el API para un cemento de pozos recomendado como lo es la clase G ó H, en lo que respecta a un cemento clase A las cantidades registradas para la muestra dada están, por lo general, por debajo de los requerimientos especificadas por el API, aunque éste no hace referencia al contenido de las fases de los aluminatos ni de los silicatos. Es por esta razón,

que quizás podamos clasificar al cemento Atlas dentro de este grupo.

Por otro lado, es importante tener presente que durante la fabricación del cemento, factores tales como la composición del material crudo, el tiempo de exposición al calor, la temperatura máxima del horno y el proceso de enfriamiento del clinker afectan a las fases presentes en el mismo, sus relaciones y propiedades.

Referente a los datos recopilados del archivo de los pozos, habiéndolos ordenado de acuerdo al número de equipo con que se perforaron, a las profundidades a las que se colocaron las mezclas de cemento y al tipo de mezcla usada, podemos observar que luego de hacer un histograma de frecuencias para cada una de las propiedades de las lechadas involucradas, estas en la mayoría de los casos no adopta ninguna de las curvas que normalmente se deben obtener al hacer este tipo de gráfico, lo que se obtiene en cambio son curvas multimodales, en especial para las mezclas colocadas en las zonas superiores.

Observando los gráficos realizados para la tercera mezcla colocada en las zonas de mayor interés de los pozos perforados por el equipo N°8, apreciamos que los valores para las propiedades requeridas de

la mezcla, oscilan dentro de un rango determinado (para cada propiedad). Sin embargo, tendríamos que tomar en cuenta que los valores más alejados de este rango se desprecien.

Con respecto al análisis de costos, podemos observar que cementar un pozo con el cemento Pacasmayo, resulta más económico que hacerlo con el cemento recomendado para pozos de petróleo como lo es el cemento clase H (usado en la selva peruana). Sin embargo, se debe mencionar que una de las razones por la que estos costos se elevan es por el transporte del material cementante a la locación en donde se realiza la operación.

## 9. RECOMENDACIONES.

1. Continuar usando el cemento Pacasmayo en las operaciones de cementación, ya que en general los trabajos realizados en estos últimos años han sido satisfactorios en su mayoría.
2. Al momento de realizar el diseño de las mezclas de cemento se deben tener en cuenta los valores de las densidades del lodo de perforación que se está usando hasta el final de la perforación de tal manera, que al plotear la curva de presión poral y la de presiones de fractura para hallar las mezclas adecuadas, tengamos la seguridad de que nos encontramos dentro de estas y no por debajo ni por encima de estas, de tal manera que obtengamos un diseño adecuado.
3. Luego de observar los datos de las propiedades de las mezclas de cemento usadas en los pozos tomados para realizar una evaluación de estas, sugerimos que de acuerdo a las profundidades y tipos de mezclas a usar, se tomen en cuenta valores que se encuentren dentro de un rango adecuado y no suceda lo que observamos con los datos recopilados, que para ninguna de las propiedades la curva del polígono de frecuencias se puede adaptar a ninguna curva típica, ya que como hemos observado en su mayoría son multimodales.



4. Al momento de hacer el diseño de las mezclas de cemento, tener en cuenta los aditivos que se van a usar para hallar los requerimientos de agua y por ende el rendimiento de la mezcla, para así tener un valor más real del volumen de mezcla requerida.

**TABLA N° 3.1**

**CEMENTOS CLASE "G", POR DOS TECNICAS**

CEMENTO	AREA DE SUPERFICIE m <sup>2</sup> /gr.	
	BLAINE	B.E.T.
G1	0.30	0.90
G2	--	0.60
G3	0.30	0.90
G4	0.27	0.50

**TABLA N° 3.2**

**DISMINUCION DEL PORCENTAJE DE VOLUMEN  
ABSOLUTO DEL CEMENTO PORTLAND**

MUESTRA	N°	1 DIA	7 DIAS	28 DIAS	100 DIAS
CMTO. PORTLAND	1	2.80	4.80	6.00	6.90
CMTO. PORTLAND	2	1.70	4.40	--	6.30
CMTO. PORTLAND	3	2.70	8.00	8.60	8.70
CON YESO	4	2.60	6.30	7.50	7.60

**TABLA N° 3.3**

**SOLUBILIDAD DE VARIOS SULFATOS**

SULFATO	SOLUBILIDAD grm/litro
YESO	2.40
SEMIHIDRATADO	6.00
ANHIDRITA SOLUBLE	6.00
ANHIDRITA INSOLUBLE	2.10
SINGENITA	2.50



TABLA IV 4.2

REQUERIMIENTOS FISICOS

				A	B	C	D	E	F	G	H	J	
Cementos para pozos													
Porcentaje de agua por peso de cementos de pozos				46	46	56	38	38	38	44	38	£	
Sonido (expansión autoclave), máximo %				0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	--	
Fineza* (superficie específica), mínimo (m <sup>2</sup> /kg)				150	160	220	--	--	--	--	--	--	
Contenido de agua libre, máximo (ml)				--	--	--	--	--	--	3,5**	3,5**	--	
	Número de catálogo	Temp. de curado °F (°C)	Presión de curado psi (KPa)	Mínimo Esfuerzo a la Compresión, psi (MPa)									
Prueba de resistencia a la compresión tiempo de curado ocho horas	--	100 (38)	Atms.	250 (1,7)	200 (1,4)	300 (2,1)	--	--	--	--	300 (2,1)	300 (2,1)	--
	--	140 (60)	Atms.	--	--	--	--	--	--	--	1500 (10,3)	1500 (10,3)	--
	6S	230 (110)	3000 (20700)	--	--	--	500 (3,5)	--	--	--	--	--	--
	8S	290 (143)	3000 (20700)	--	--	--	--	500 (3,5)	--	--	--	--	--
	9S	320 (160)	3000 (20700)	--	--	--	--	--	500 (3,5)	--	--	--	--
Prueba de resistencia a la compresión tiempo de curado veinte horas	8S	290 (143)	3000 (20700)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	500 (3,5)
Prueba de resistencia a la compresión tiempo de curado veinticuatro horas	--	100 (38)	Atms.	1800 (12,4)	1500 (10,3)	2000 (13,8)	--	--	--	--	--	--	--
	4S	170 (77)	3000 (20700)	--	--	--	1000 (6,9)	1000 (6,9)	--	--	--	--	--
	6S	230 (110)	3000 (20700)	--	--	--	2000 (13,8)	--	1000 (6,9)	--	--	--	--
	8S	290 (143)	3000 (20700)	--	--	--	--	2000 (13,8)	--	--	--	--	--
	9S	320 (160)	3000 (20700)	--	--	--	--	--	1000 (6,9)	--	--	--	--
	10S	350 (177)	3000 (20700)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1000 (6,9) <sup>s</sup>
Presión y temp. de la prueba de tiempo de espesamiento	Especific. de la prueba número de catálogo	Máxima consistencia Periodo de agitación (15-30 min)		Mínimo Tiempo de Espesamiento, minutos ***									
		Bc <sup>∞</sup>											
	1	30	90	90	90	--	--	--	--	--	--	--	--
	4	30	90	90	90	90	--	--	--	--	--	--	--
	5	30	--	--	--	--	--	--	--	90	90	--	--
	5	30	--	--	--	--	--	--	--	120 máx <sup>∨</sup>	120 máx <sup>∨</sup>	--	--
	6	30	--	--	--	--	100	100	100	--	--	--	180
	8	30	--	--	--	--	--	154	--	--	--	--	--
	9	30	--	--	--	--	--	--	190	--	--	--	180

£ Agua recomendada por el fabricante.

\* Determinado por el turbidímetro Wagner, equipo descrito en ASTM C115: Fineza del cemento Portland por el método del turbidímetro.

\*\* Basado en un volumen de 250 ml., el porcentaje de 3,5 ml., es 1,4%.

La resistencia a la compresión después de 7 días no debe ser menor que la resistencia a la compresión después de 24 horas dada en el catálogo 10S.

∞ Unidades Barden de consistencia de la lechada (Bc).

Bc - Unidades Barden de consistencia obtenidas en un consistómetro presurizado.

∞ - Unidades Barden de consistencia obtenidas en un consistómetro presurizado a presión atmosférica.

**TABLA N° 4.3**

**VARIACION PERMISIBLE EN PESO PARA  
LA PREPARACION DE LA MEZCLA**

<b>PESO (grms.)</b>	<b>VARIACION (grms.)</b>
100	0.5
500	0.35
300	0.3
200	0.2
100	0.15
50	0.1

**TABLA N° 4.4**

**COMPOSICION DE LAS LECHADAS DE CEMENTO**

CLASES DE CEMENTOS API	% DE AGUA POR PESO DE CEMENTO	AGUA GALONES POR SACO
A & B	46	5.19
C	56	6.32
D, E, F & H	38	4.29
G	44	4.97
J	*	*

\* RECOMENDADO POR EL FABRICANTE



**TABLA N° 4.5**

**REQUERIMIENTOS EN VOLUMEN DE LA MEZCLA DE CEMENTO**

VOLUMEN DE LA LECHADA (ml)	COMPONENTES	CLASES DE CEMENTO API			
		A & B (grms)	C (grms)	D, E, F & H (grms)	G (grms)
600	AGUA	355	383	327	349
	CEMENTO	772	684	860	792

## TABLA N°4.6

### ACEPTANCIA DE PARAMETROS PARA PRUEBA DE FINEZA

CLASES DE CEMENTOS API	FINEZA SUP. ESPECIFICA MIN. (m <sup>2</sup> /kgr)
A	150
B	160
C	220
D, E, F, G, H y J	NO REQUERIDO

**TABLA 4.7**

**CATALOGO DE ESPECIFICACIONES PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESION DE  
LA MUESTRA CURADA**

Nº DE CATALOGO	PROF.	PRESION (psi)	TEMPERATURA °F									
			LAPSO DE TIEMPO DESDE LA PRIMERA APLICACION DEL CALOR Y LA PRESION, horas:minutos									
			00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	4:00 *
4S	6 000	3 000	116	120	124	128	131	139	147	155	162	170
			(El catálogo 4S está especificado para las clases D y E de los cementos de pozos, Tabla 4.2)									
6S	10 000	3 000	133	148	154	161	167	180	192	205	218	230
			(El catálogo 6S está especificado para las clases D y F de los cementos de pozos, Tabla 4.2)									
8S	14 000	3 000	153	189	210	216	223	236	250	263	277	290
			(El catálogo 8S está especificado para las clases E y J de los cementos de pozos, Tabla 4.2)									
9S	16 000	3 000	164	206	248	254	260	272	284	296	308	320
			(El catálogo 9S está especificado para las clases F de los cementos de pozos, Tabla 4.2)									
10S	18 000	3 000	179	227	277	302	307	315	324	333	341	350
			(El catálogo 10S está especificado para las clases J de los cementos de pozos, Tabla 4.2)									

- 1 La prueba de presión debe ser aplicada tan pronto como la muestra sea colocada en el recipiente a presión y mantenida a la presión dada dentro de los siguientes límites para la duración del periodo de curado.  
Catálogo 4S hasta 10S ..... 3 000 psi +/- 500 psi.
- 2 La temperatura final (última columna), debe ser mantenida a +/- 3°F a través del resto del periodo de curado.

**TABLA N° 4.8**

**REQUERIMIENTOS DE LA MINIMA RESISTENCIA A LA COMPRESION**

CLASE DE CEMENTO	NUMERO DE CATALOGO	TEMP. DE CURADO ° F	PRESION DE CURADO PSI	RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI) A TIEMPO DE CURADO INDICADO			
				8 HORAS	20 HORAS	24 HORAS	7 DIAS
				A	--	100	Atms.
B	--	100	Atms.	200	--	1 500	--
C	--	100	Atms.	300	--	2 000	--
D	4S	170	3 000	--	--	1 000	--
	6S	230	3 000	500	--	2 000	--
E	4S	170	3 000	--	--	1 000	--
	8S	290	3 000	500	--	2 000	--
F	6S	230	3 000	--	--	1 000	--
	9S	320	3 000	500	--	1 000	--
G,H	--	100	Atms.	300	--	--	--
	--	140	Atms.	1 500	--	--	--
J	8S	290	3 000	--	500	--	1 000*
	10S	350	3 000	--	--	1 000	--

\* La resistencia a la compresión en 7 días no debe ser menor que la resistencia a la compresión

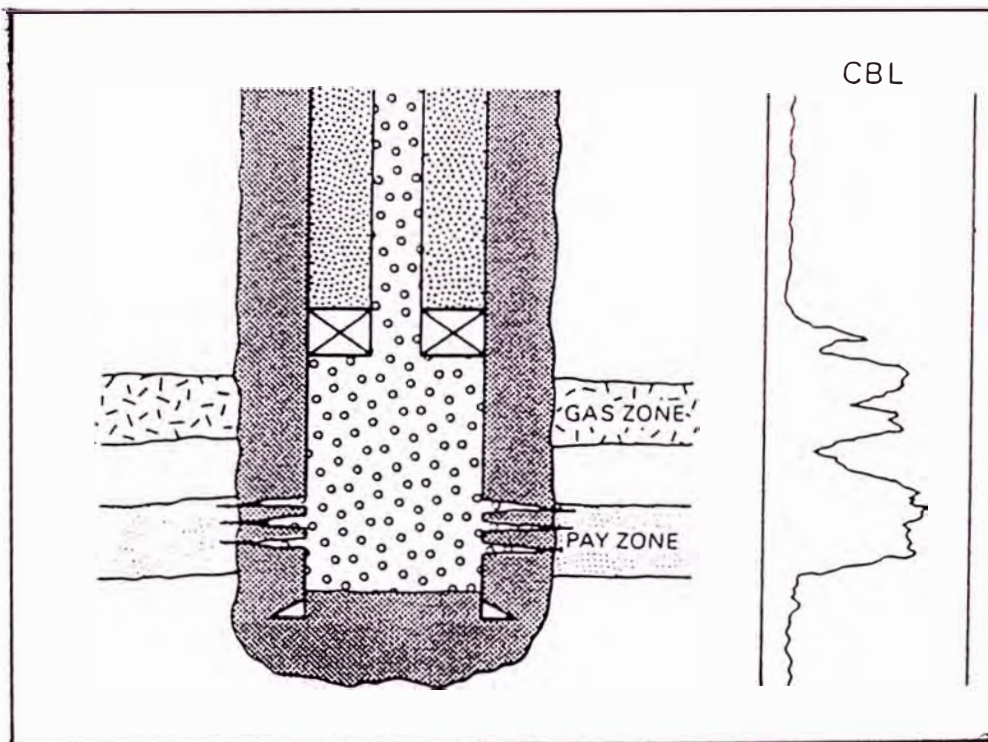


Fig. 3.1 Cementación primaria de casing deficiente.

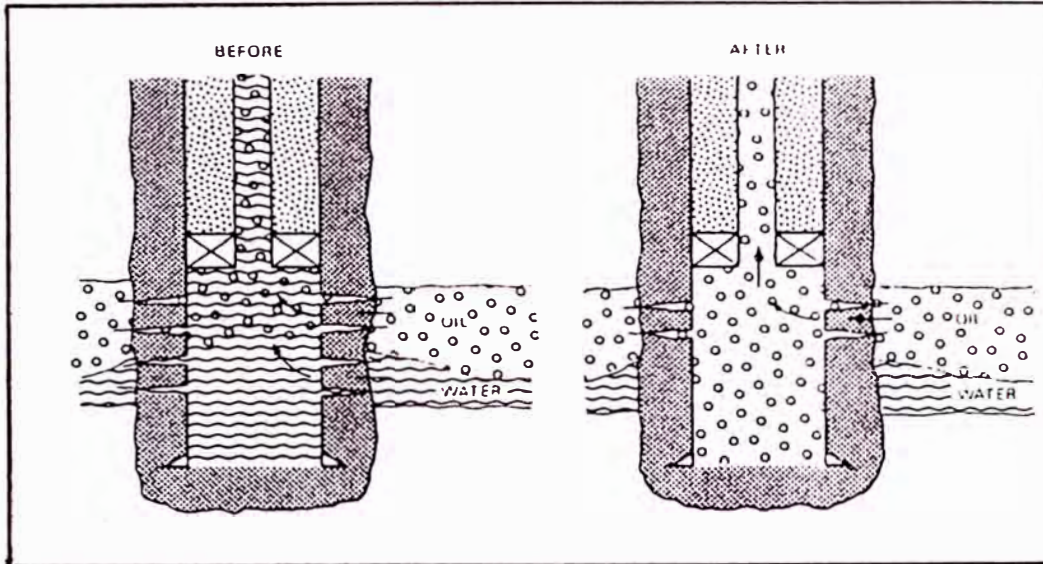


Fig. 3.2 Eliminación de la intrusión de agua.

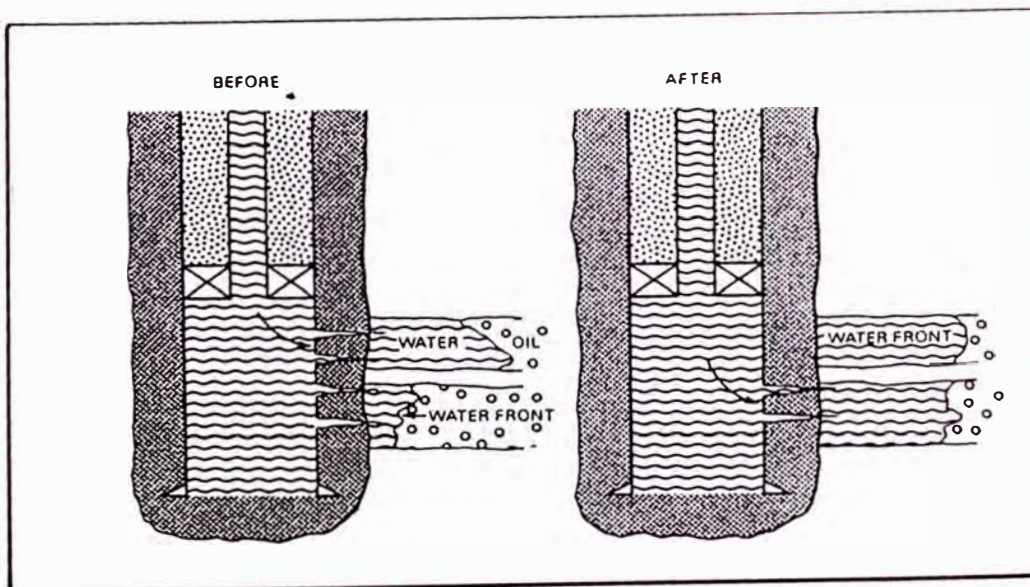


Fig. 3.3 Diversión de fluidos de inyección.



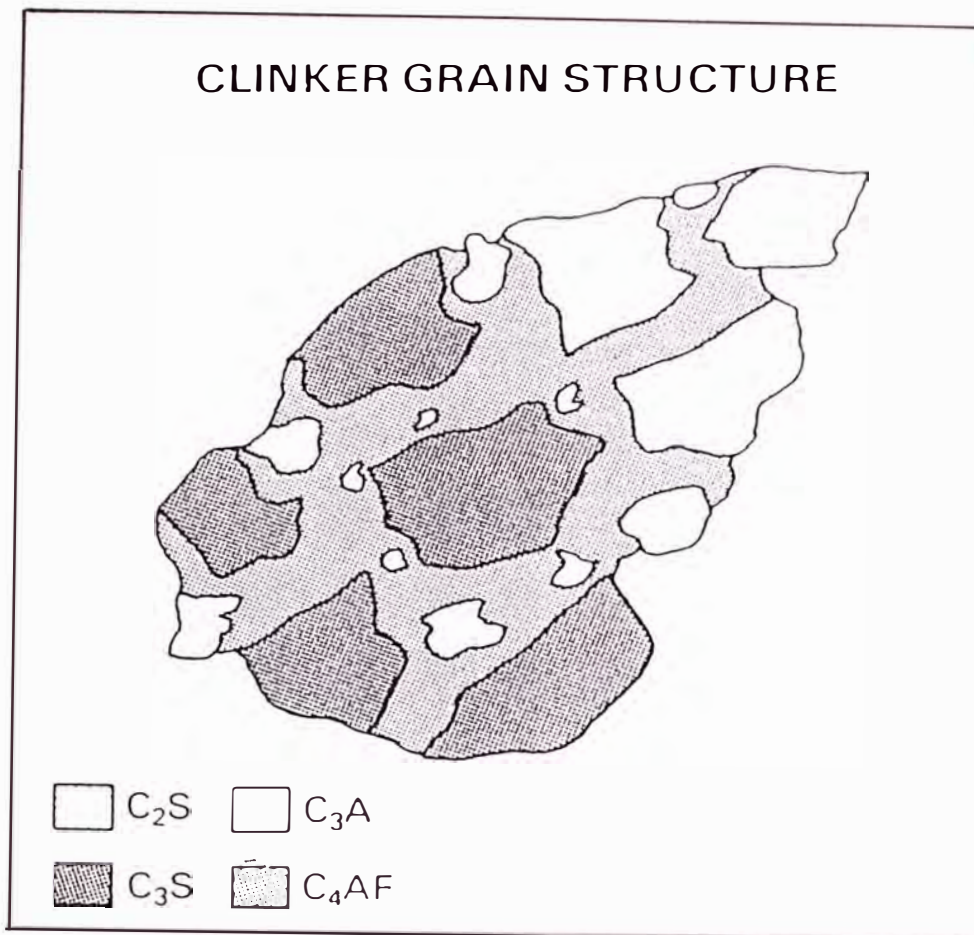


Fig. 3.4 Estructura de los granos del clinker.

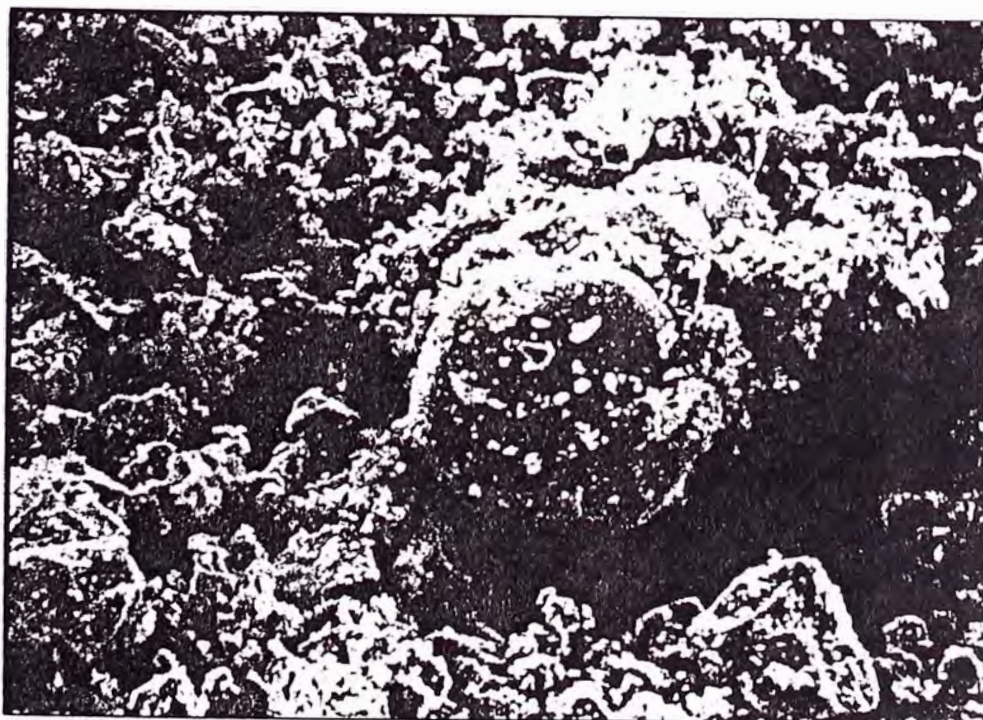


Fig. 3.5 Producto final del clinker.

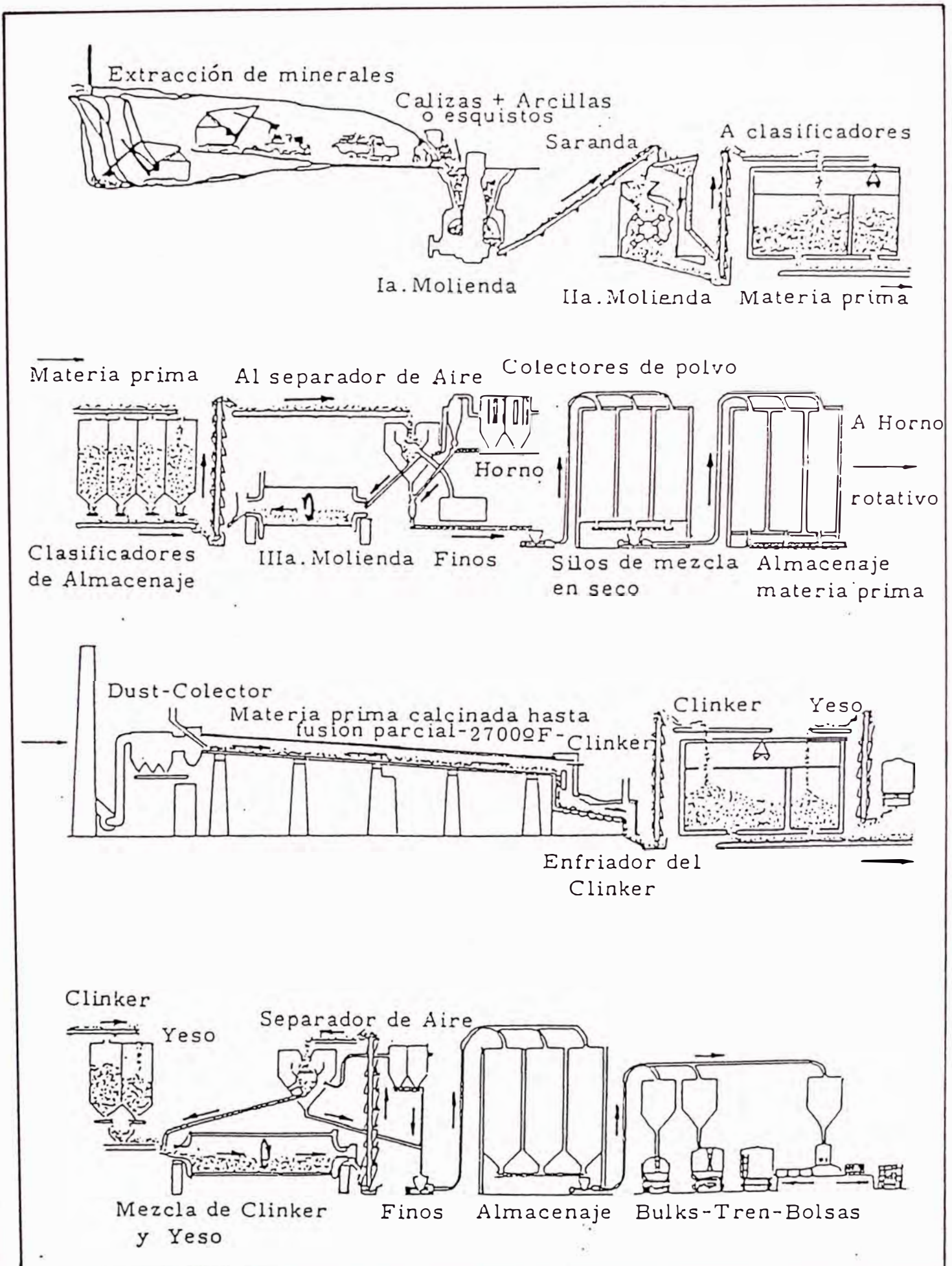


Fig. 3.6 Manufactura del clinker - Proceso seco.



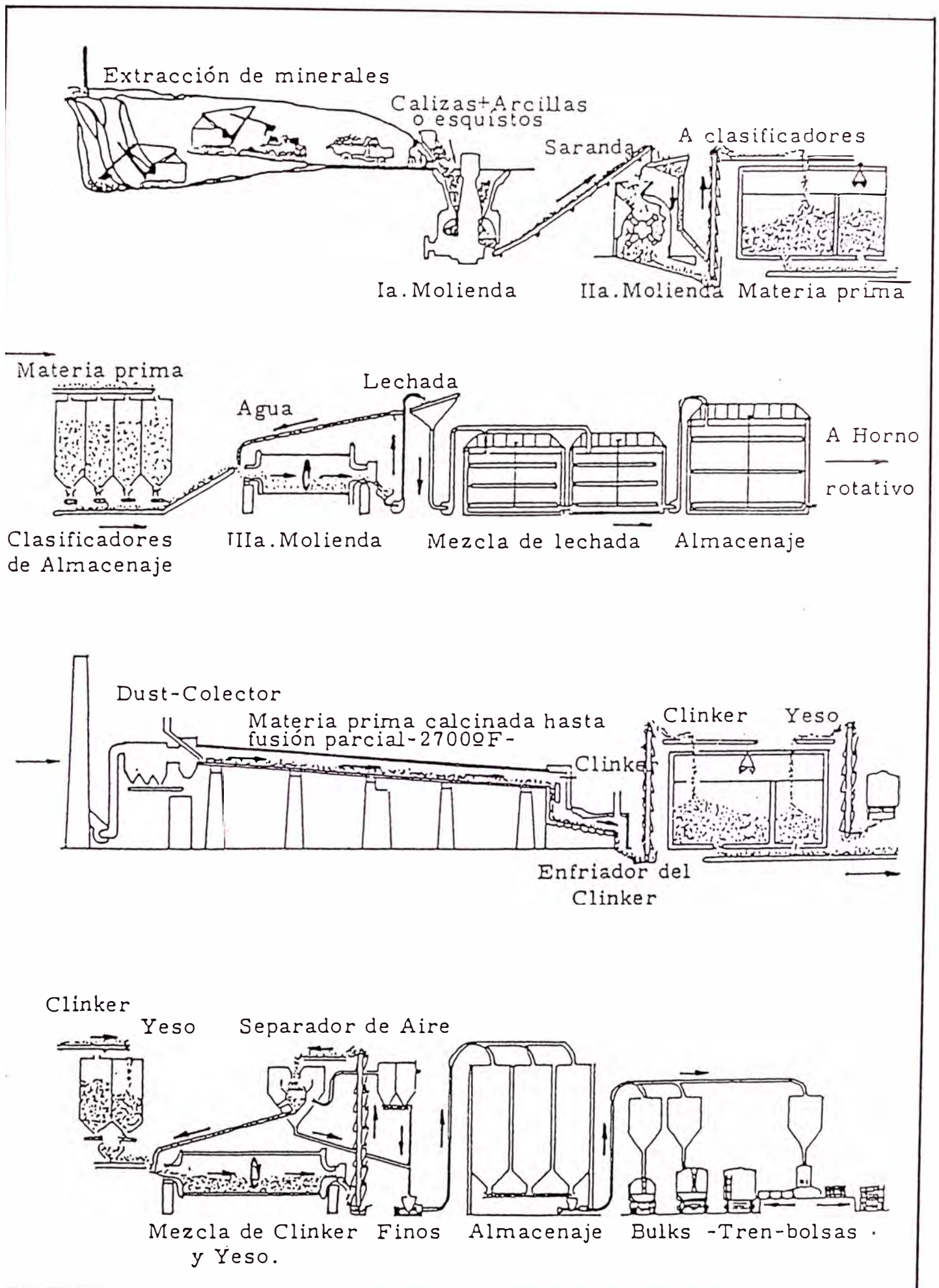


Fig. 3.7 Manufactura del clinker - Proceso húmedo.

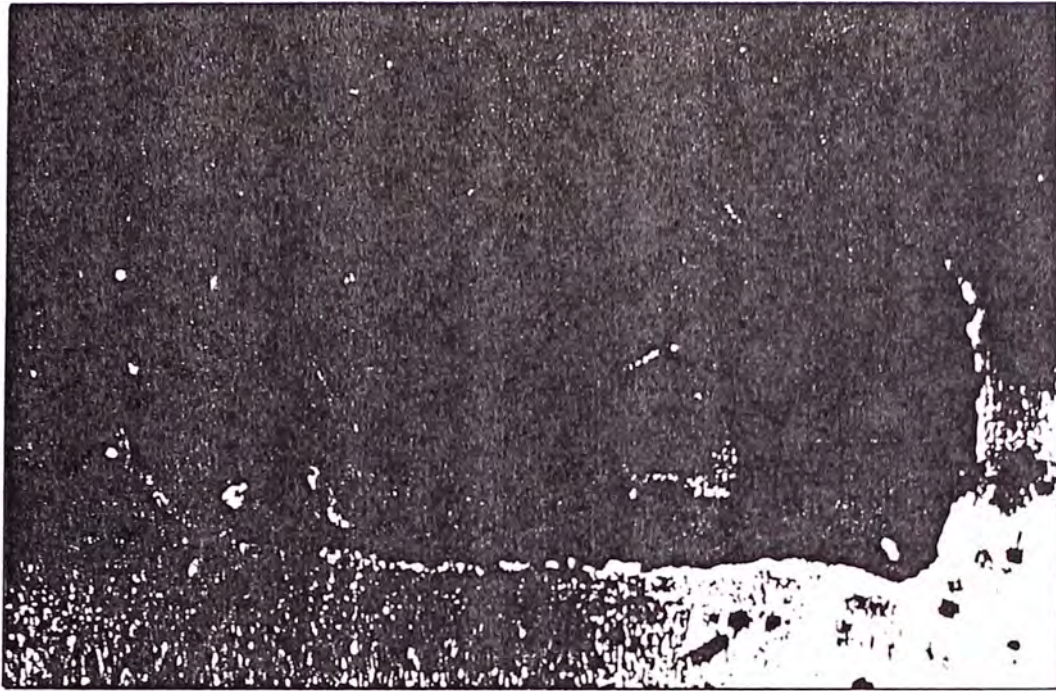


Fig. 3.8 Aliata con inclusiones de cuarzo.

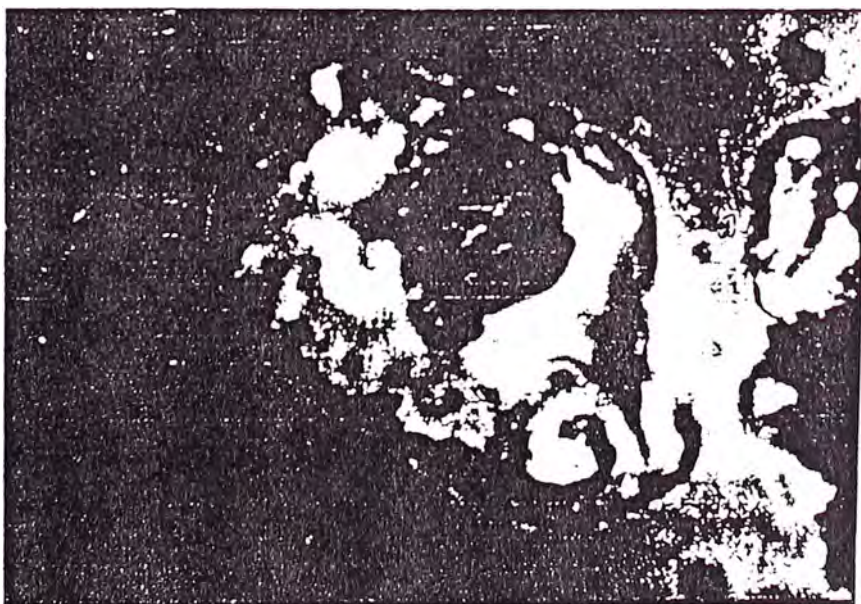


Fig. 3.9 Etapa de cocción más completa. Aliata con inclusiones de belita estriada.





Fig. 3.10 Cristales agrietados de alita.

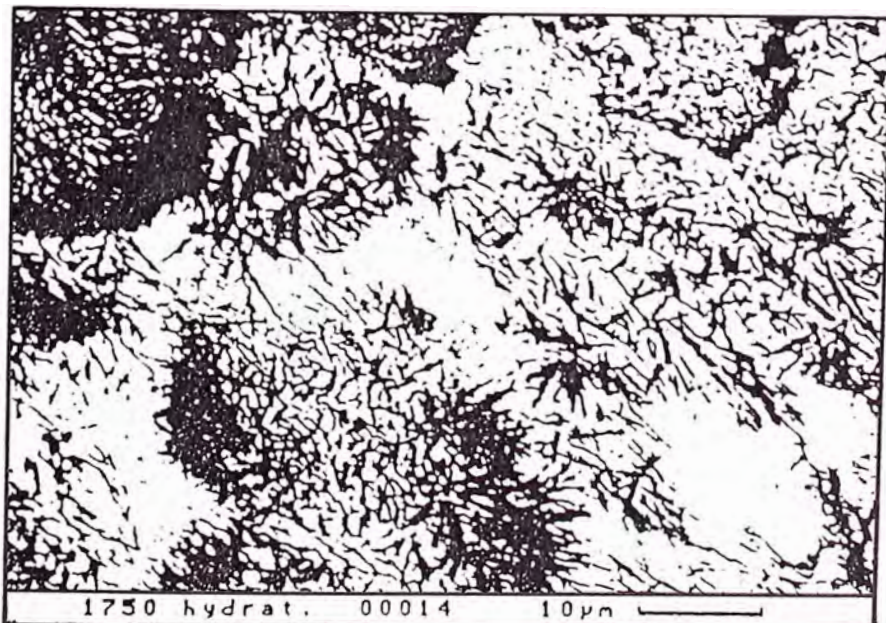


Fig. 3.11 Fotografía del Ettringite.

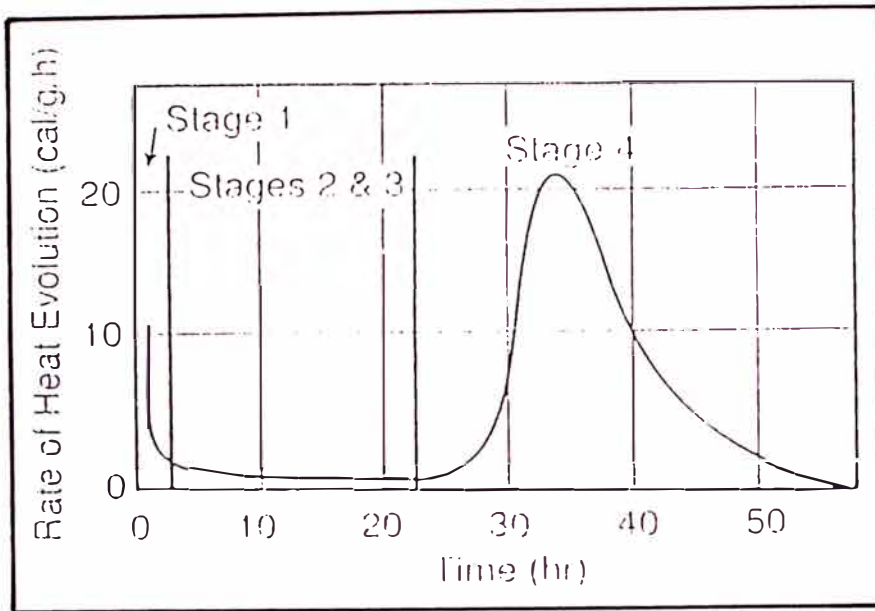


Fig. 3.12 Termograma esquemático de la hidratación del cemento Portland.

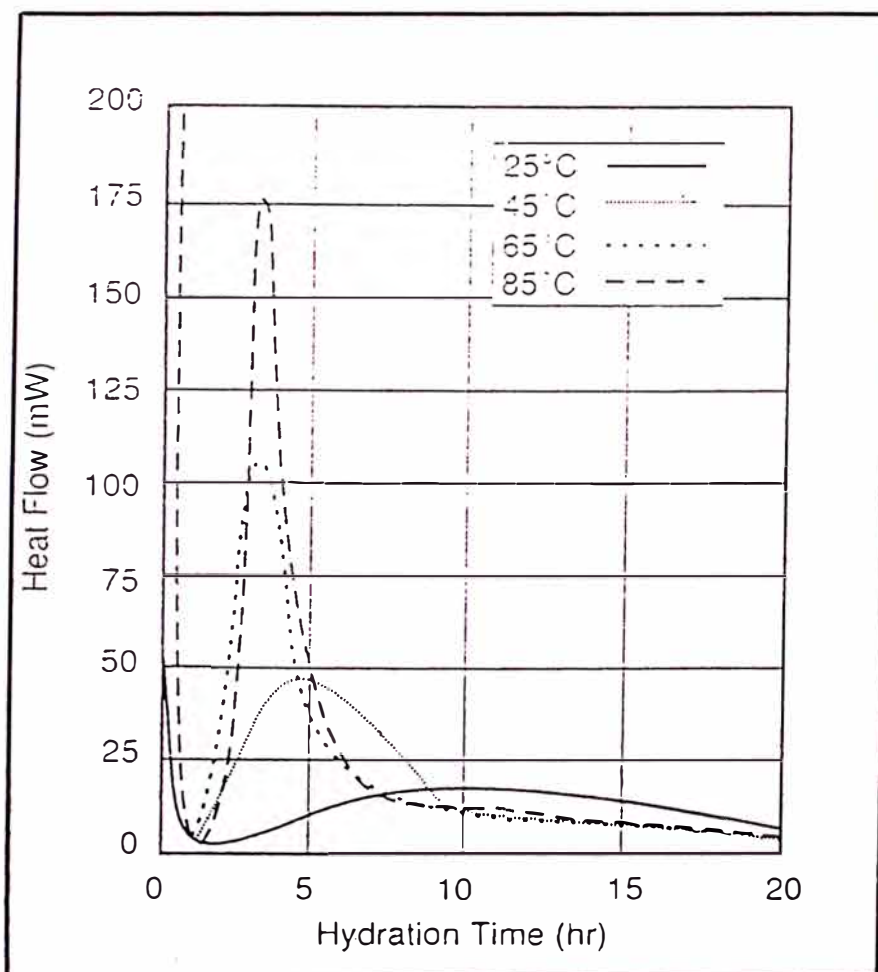


Fig. 3.13 Efectos de la temperatura sobre la cinética de hidratación para el cemento clase G.

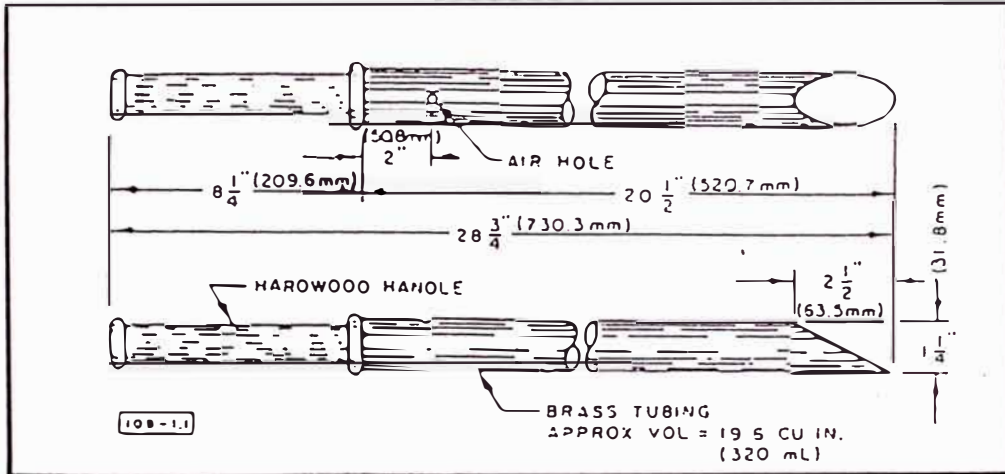


Fig. 4.1 Tubo muestreador para cemento medido.

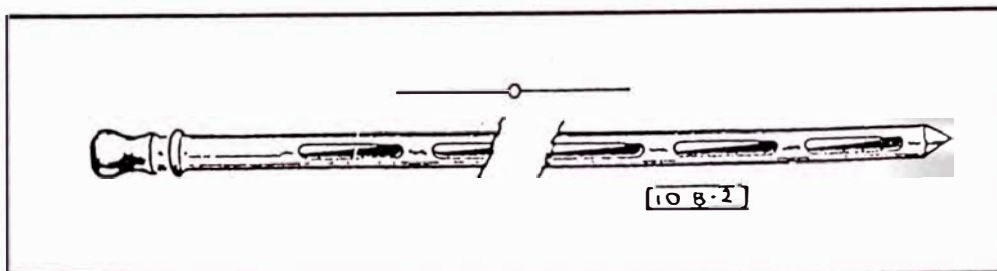


Fig. 4.2 Tubo muestreador para carga de cemento.





Fig. 4.3 Equipo mezclador.



Fig. 4.4 Balanza presurizada para medir la densidad del fluido.

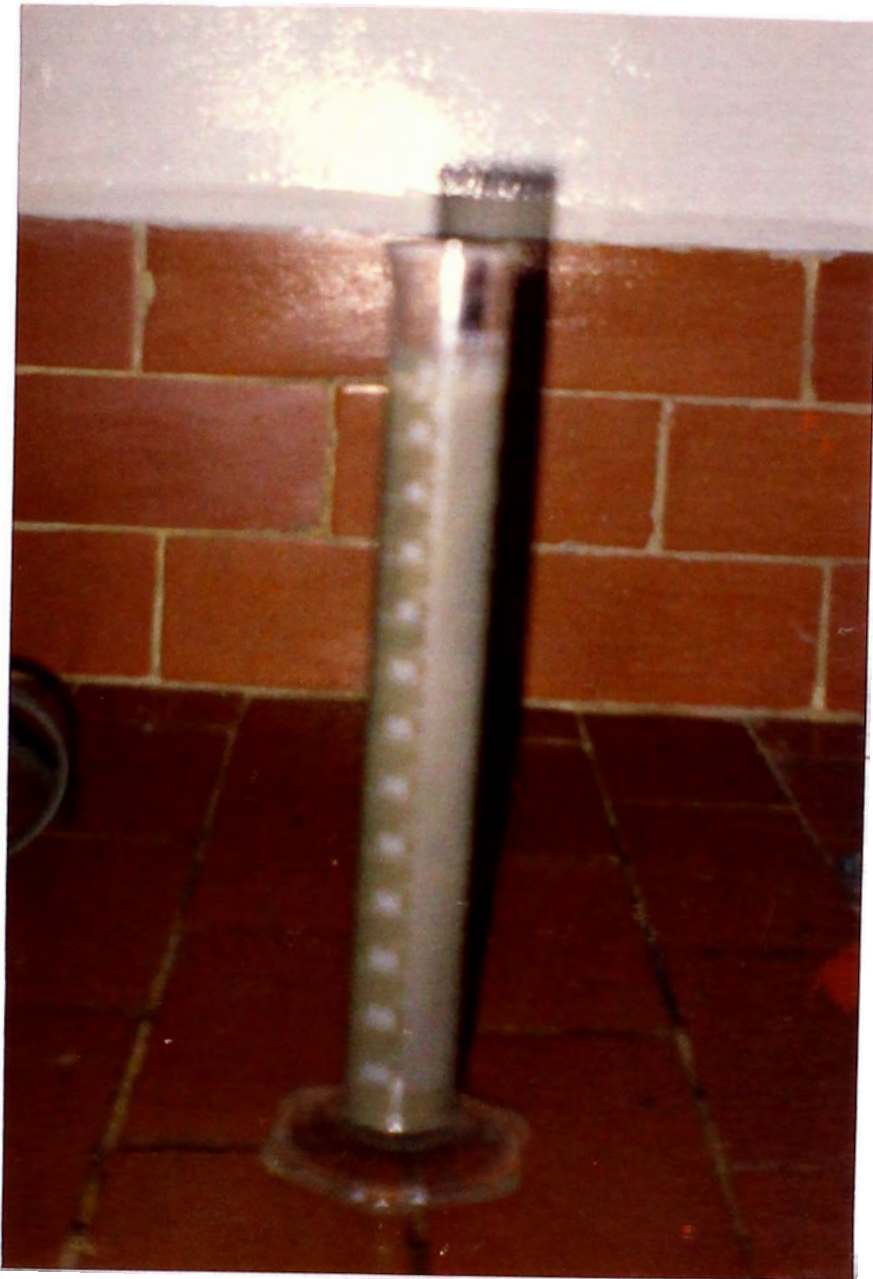


Fig. 4.5 Probeta graduada para medir el contenido de agua libre.



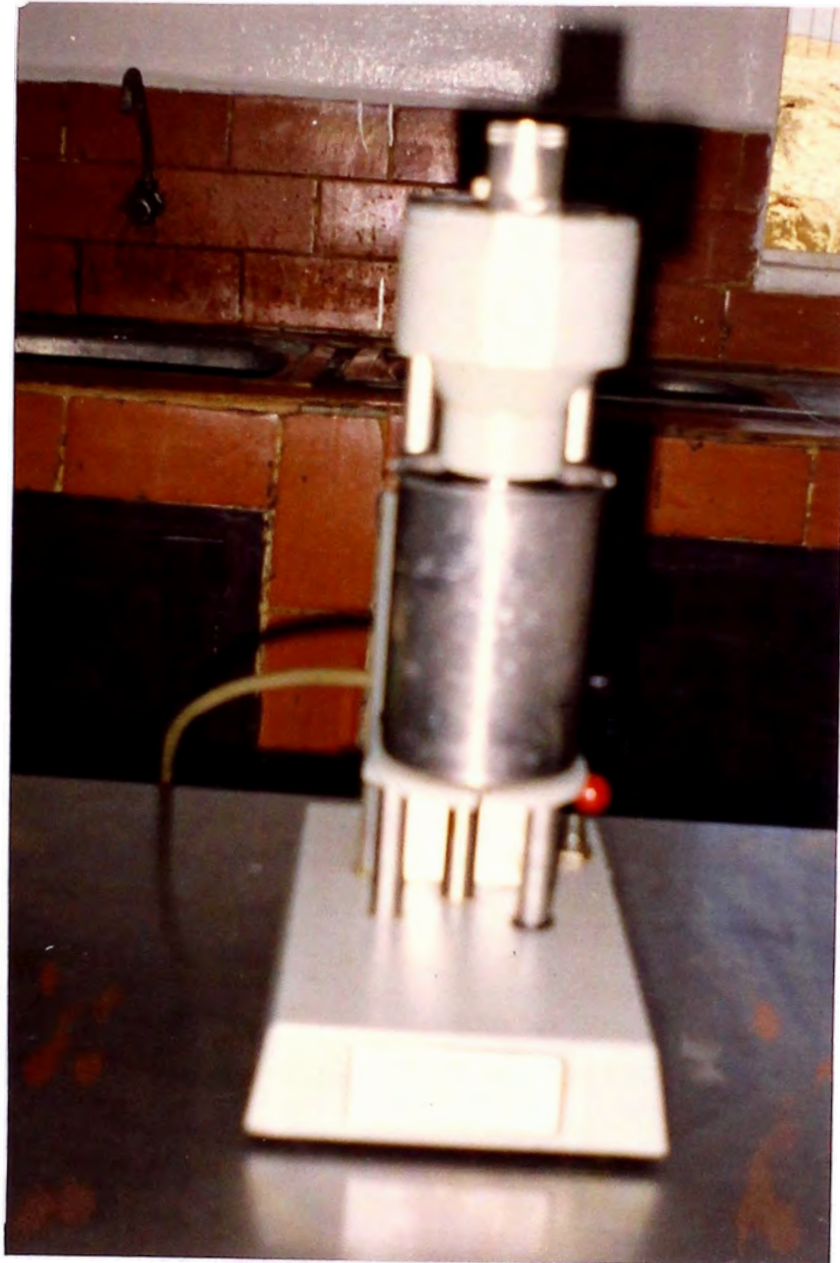


Fig. 4.6 Viscosímetro rotacional.

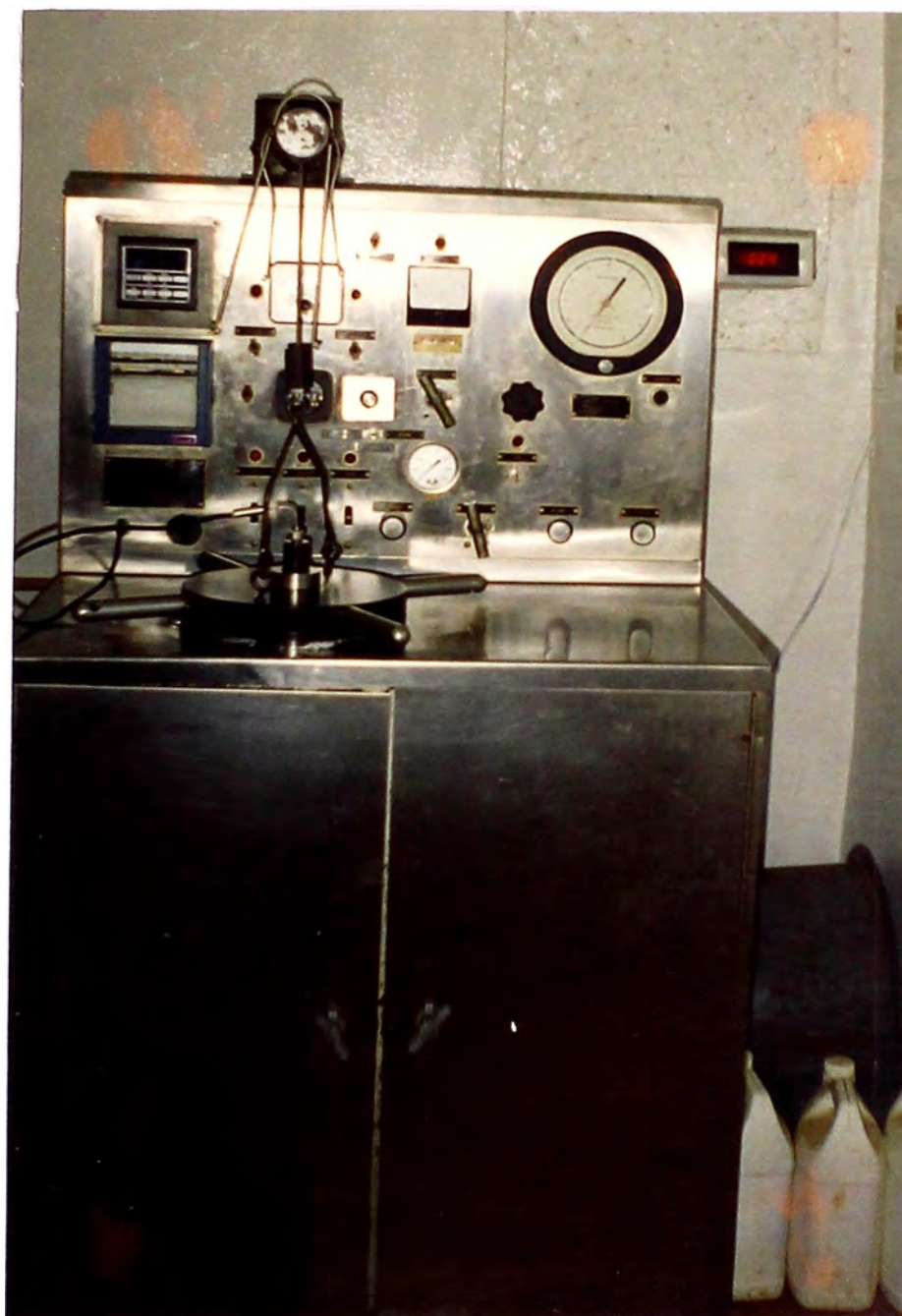


Fig. 4.7 Consistómetro presurizado.



Fig. 4.8 Filtro prensa





Fig. 4.9 Cámara de curado presurizada.

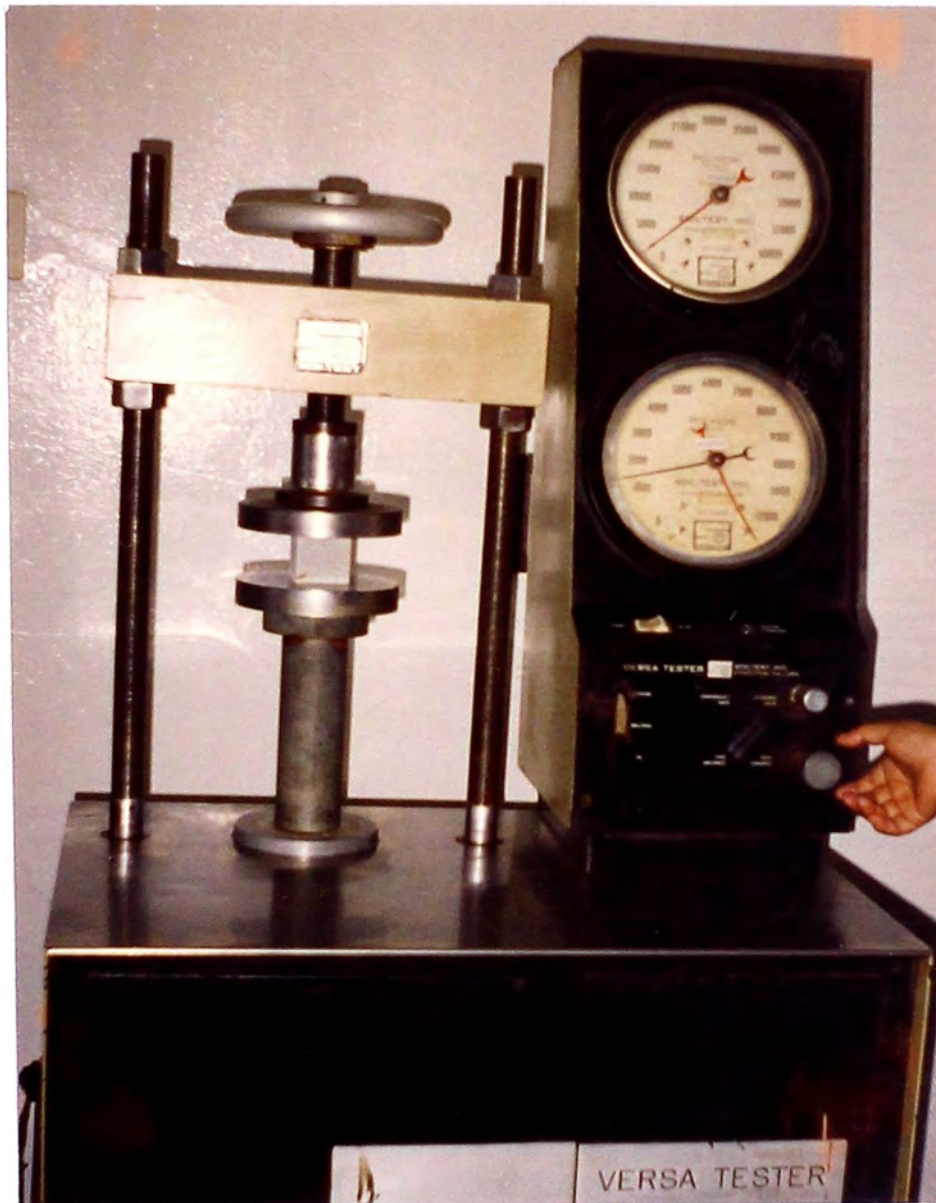


Fig. 4.10 Máquina hidráulica para medir la resistencia a la compresión

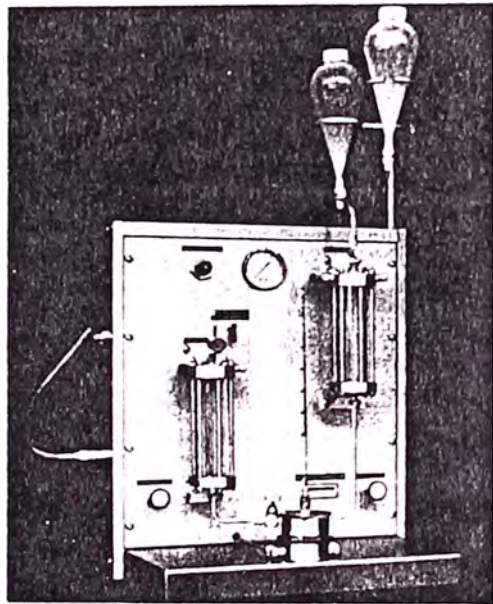


Fig. 4.11 Permeámetro de cemento.

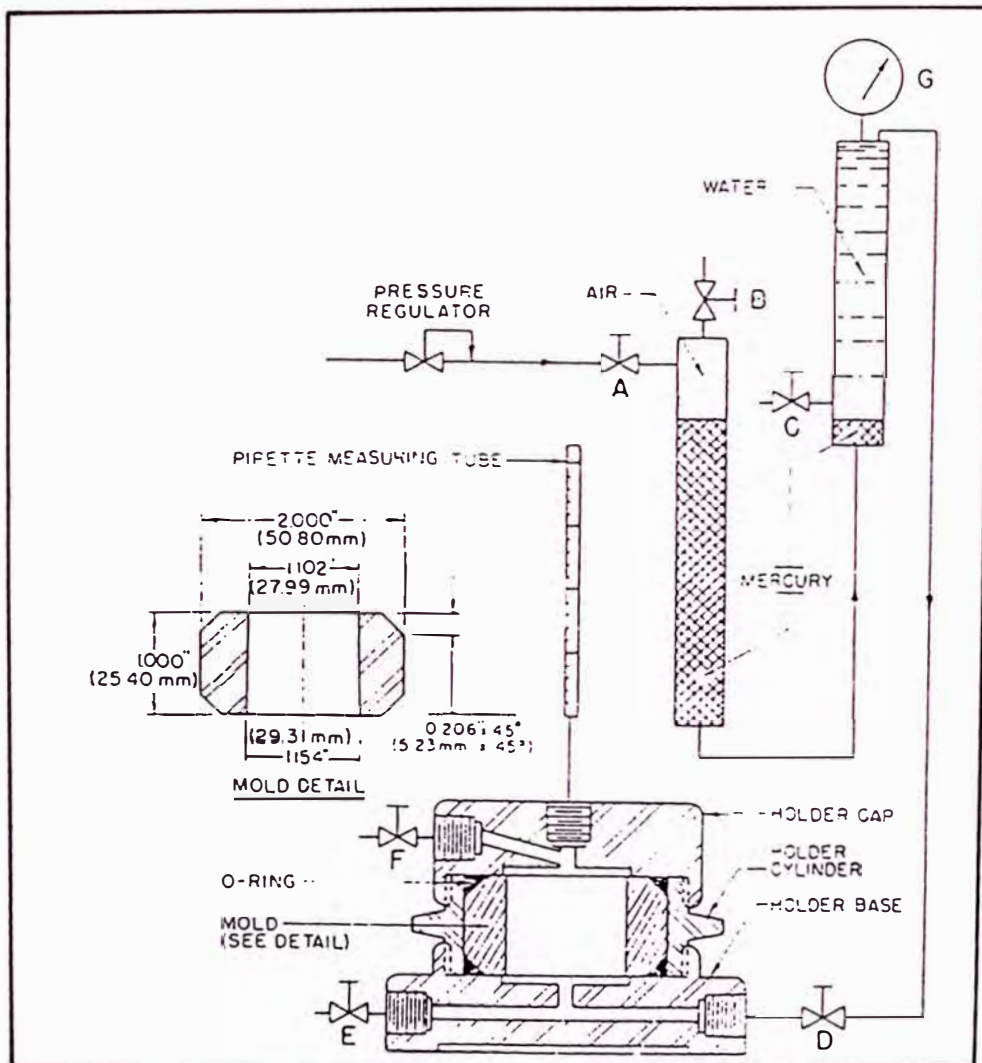
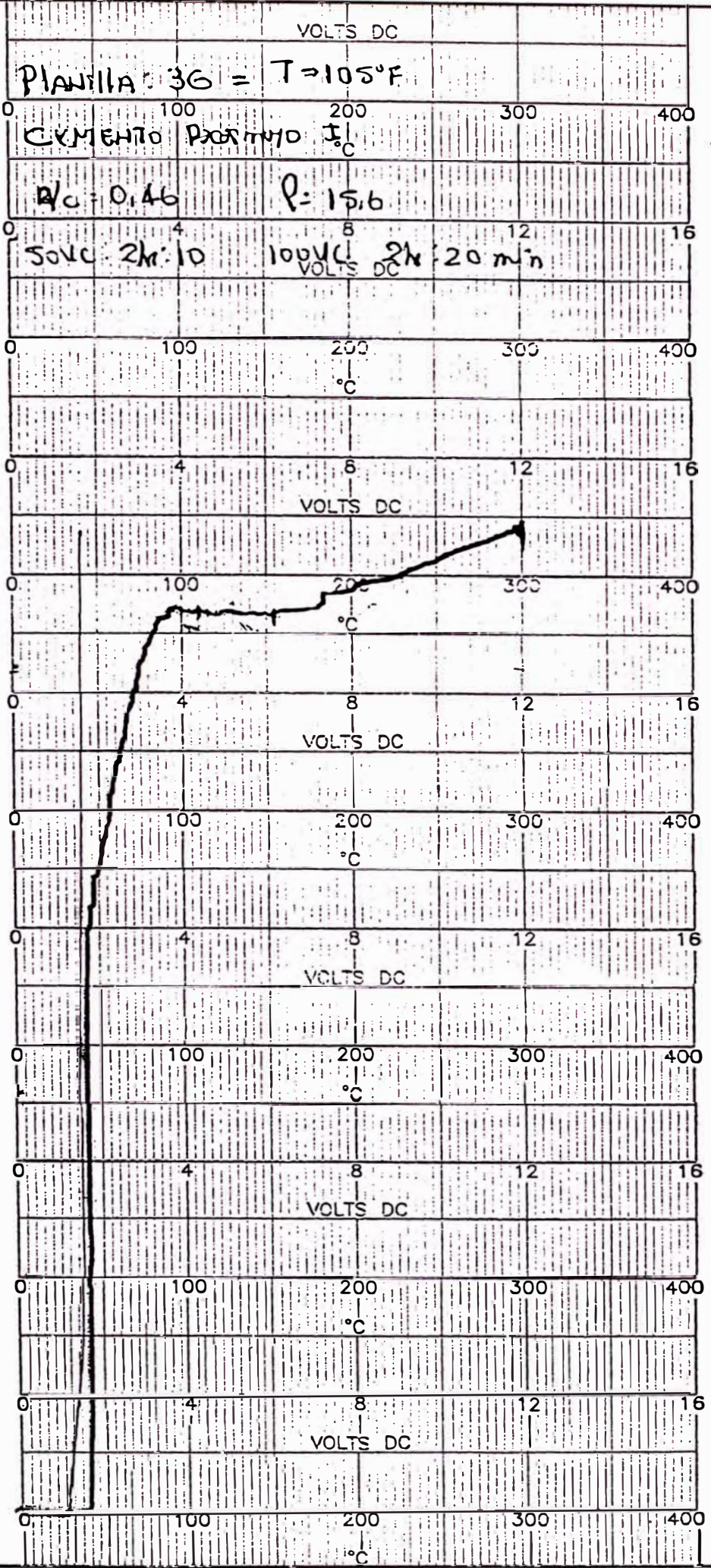


fig. 4.12 Diagrama del permeámetro de cemento.



0. GD200074



PRINTED IN U.S.A.

*Brand*

CHART NO. GD200074

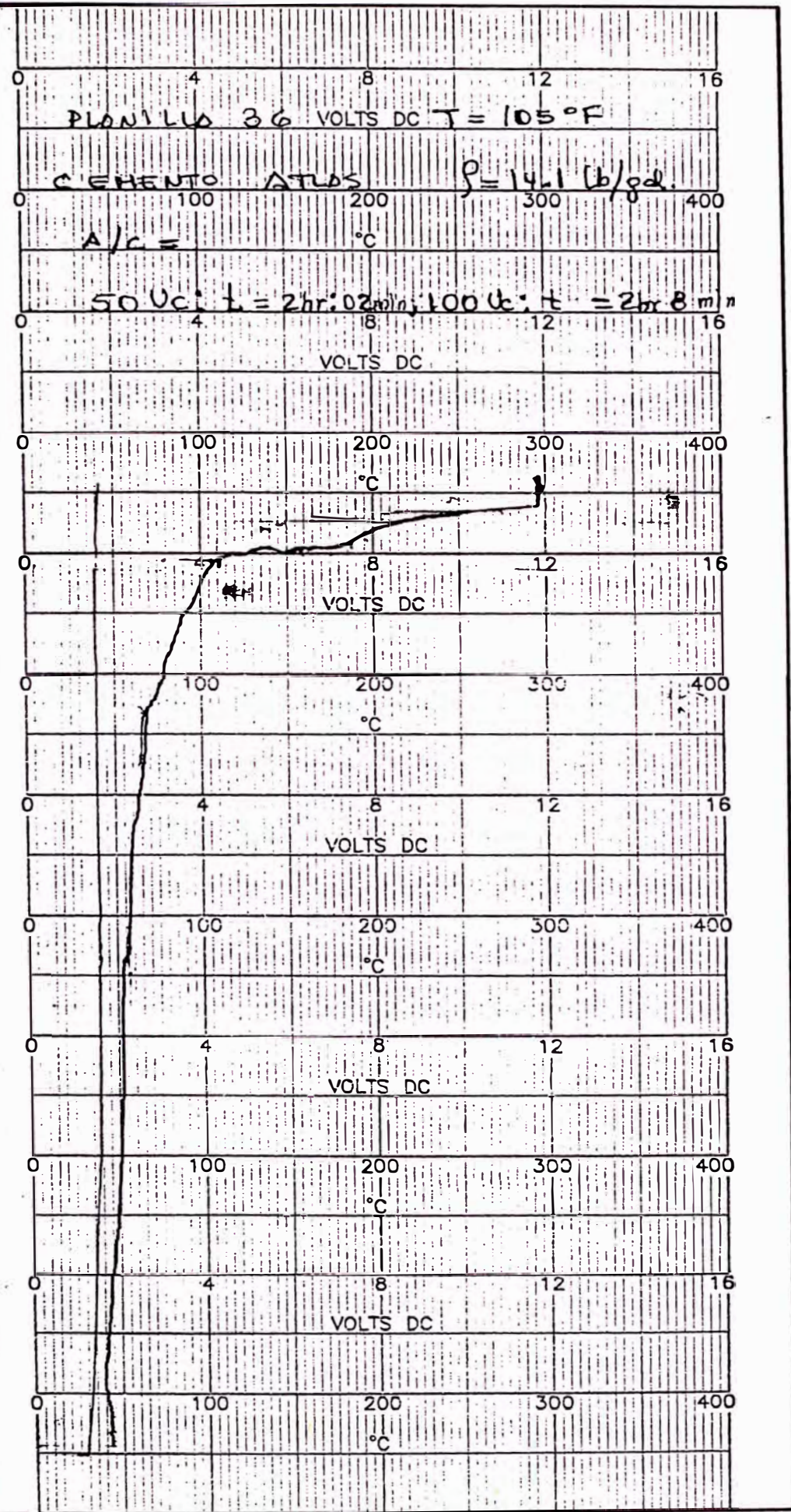
Carta del tiempo de espesamiento para la muestra de cemento Pacasmayo.



CHART NO. GD200074

PRINTED IN U.S.A.

CHART



Carta del tiempo de espesamiento para la muestra de cemento Atlas.



PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE CEMENTO

PROFUNDIDAD: 0 - 1400'

EQUIPO N°8

POZO N°	EQUIPO	RESERVORIO	INTERVALO		N° MEZCLA	DENS. MEZCLA (#/gal)	TIEMP. ESPESAMIENTO			RESIST. COMP.		PERDIDA FILTRADO (ml)	CONT. AGUA LIBRE (ml/%)	TEMP. CIRCULACION (°F)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies²)	LECT. ROT.	
			TOPE (pies)	FONDO (pies)			50 Uc	75 Uc	100 Uc	12 hr. (psi)	24 hrs. (psi)						L300	L100
7908	8	REVENTONES	0	1300	I	13.1	5:40		6:30		170	333	1	105	31.5	5.5	37	16
7909	8	REVENTONES	0	1300	I	13.1		6:20				342	1%	96	9	1	10	4
7918	8	REVENTONES	0	1300	I	13.1						430	1%	107	10.5	-0.5	10	3
7957	8	REVENTONES	0	1400	I	14.7						211	0	103	58.5	1.5	60	21
7959	8	REVENTONES	0	1440	I	13.1	5:20		6:00			410	0	110	23.8	5.5	28	14
7961	8	REVENTONES	0	1300	I	13.1		7:00				324	0	100	33	3	36	14
7963	8	REVENTONES	0	1300	I	13.1		5:48				345	1%	100	43.5	3.5	47	18
7978	8	REVENTONES	0	2200	I	13.1		5:25				260	0.8%	103	40.5	2.5	43	16
7981	8	REVENTONES	0	1600	I	13.1	6:00		6:50			285	0.5	105	25.3	3.4	28	13.5
7916	8	BALLENA	0	1400	I	13.1		6:30				345	0.1%	106	27	1	28	10
7917	8	BALLENA	0	1300	I	13.1	5:45		6:45		170	329	0.5	105	31.5	5.5	37	16
7921	8	BALLENA	0	1300	I	13.1	5:00		5:50			350	0.5		26.3	4.3	30	14
7928	8	BALLENA	0	1300	I	14.1	3:45		4:05		455	296	0.2	105	37.5	2.5	40	16
7929	8	BALLENA	0	1300	I	13.1	6:00		5:50			379	0		28.8	4.1	33	15
7949	8	BALLENA	0	1500	I	13.1	4:55		5:35		185	329	0.2	105	31.5	5.5	37	16
7953	8	BALLENA	0	1200	I	13.1		5:25				285	0.8%	98	39	1	40	14
7954	8	BALLENA	0	1300	I	13.1			>6:00			348	1%	105	26	2.4	28	11
7983	8	BALLENA	0	1100	I	14.1	3:45		4:05		480	295	0	105	36.2	4.35	40	16
7927	8	TAIMAN	0	1519	I	14.1		4:15				258	0.4%	100	21	0	21	7
7936	8	TAIMAN	0	1500	I	14.1	4:40		5:20			300	0.2	105	32.1	5.5	37	16
7854	8	TAIMAN	0	1500	I	13.1			>5:00			300	2		16.7	1.4	18	7
7971	8	TAIMAN	0	1500	I	14.1	3:45		4:05		400	295	0	115	36	4	40	16
7972	8	TAIMAN	0	1400	I	14.1	5:15		5:45			302	0	110	36	5.3	40	18
7864	8	MERINA	0	1500	I	12.6	6:00		7:00		125	620	2%	100	18	2	20	8
7894	8	MERINA	0	1400	I	13.1		6:30				280	0.1%		27	1	28	10
7896	8	MERINA	0	1500	I	13.1		5:45	6:35		155	415	0.5	100	30.75	7.25	38	17.5
7941	8	MERINA	0	800	I	13.1		6:00				410	0.8%	91	24	2	26	10
7941	8	MERINA	800	1700	II	13.1		5:50				175	0	91	43.5	4.5	48	19
7973	8	MERINA	0	1270	I	13.1	5:35		6:35			334	1	100	25.5	2.5	28	11



PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE CEMENTO

PROFUNDIDAD: 1400 - 2800'

EQUIPO N°8

POZO N°	EQUIPO	RESERVORIO	INTERVALO		N° MEZCLA	DENS. MEZCLA (#/gal)	TIEMP. ESPESAMIENTO			RESIST. COMP.		PERDIDA FILTRADO (ml)	CONT. AGUA LIBRE (ml/%)	TEMP. CIRCULACION (°F)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies²)	LECT. ROT.	
			TOPE (pies)	FONDO (pies)			50 Uc	75 Uc	100 Uc	12 hr. (psi)	24 hrs. (psi)						L300	L100
7908	8	REVENTONES	1300	2600	II	14.1	4:20		4:55		440	232	0	105	49.5	5.5	55	22
7909	8	REVENTONES	1300	2700	II	14.1		5:05		250	540	220	.5%	96	27	2	29	11
7918	8	REVENTONES	1300	2700	II	14.1						290	0.7%	107	27	2	29	11
7957	8	REVENTONES	1400	2600	II	14.7						138	0	103	96	6	102	38
7959	8	REVENTONES	1440	2300	II	14.1	4:10		4:30			314	0	110	28.5	6.5	35	16
7959	8	REVENTONES	2300	3300	III	14.1	2:38		2:54			220	0	110	39.5	4.8	43	19
7961	8	REVENTONES	1300	2700	II	14.7		5:10		200	460	242	0	100	67.5	2.5	70	25
7963	8	REVENTONES	1300	2600	II	14.7		4:10				280	0	100	102	9	111	43
7978	8	REVENTONES	0	2200	I	13.1		5:25				260	0.8%	103	40.5	2.5	43	16
7978	8	REVENTONES	2200	3000	II	14.1		4:30				380	0.4%	103	76.5	7.5	84	33
7981	8	REVENTONES	1600	2700	II	14.1	5:03		5:34			246	0	105	33	12	45	23
7916	8	BALLENA	1400	2900	II	14.1		5:30		75	250	260	0.4%	106	21	0	0	7
7917	8	BALLENA	1300	3100	II	14.1	4:25		4:55		430	236	0	105	49.5	4.5	54	21
7921	8	BALLENA	1300	2500	II	14.1	4:05		4:40			275	0		55	11.6	64	32
7928	8	BALLENA	1300	3000	II	14.7	2:40		3:44		930	193	0	105	102	11	113	45
7929	8	BALLENA	1300	2000	II	14.1	4:10		4:35			280	0		55.2	5.7	62	24
7929	8	BALLENA	2000	2900	III	14.1	3:40		4:20			229	0		58.1	5.4	65	25
7949	8	BALLENA	1500	3000	II	14.1	3:40		4:44		420	236	0	105	49.5	4.5	54	21
7953	8	BALLENA	1200	2200	II	14.7		3:35				245	0.4%	98	34.5	-0.5	34	11
7953	8	BALLENA	2200	3210	III	15.6		3:05				165	0.2%	98	40.5	1.5	42	15
7954	8	BALLENA	1300	2300	II	14.1			> 6:00			262	0	105	36.1	3.7	39	17
7954	8	BALLENA	2370	2700	III	14.1			5:00			188	0	105	52.8	4	55	24
7983	8	BALLENA	1100	2700	II	14.7	2:45		3:45		920	225	0	105	102	11.3	113	45
7927	8	TAIMAN	1519	2419	II	14.7		3:30				210	0.2%	100	34.5	0.5	35	12
7927	8	TAIMAN	2419	3760	III	15.6		2:55				180	0	100	52.5	2.5	55	20
7936	8	TAIMAN	1500	2500	II	14.7	3:50		4:20			222	0	105	69.1	9.1	76	34
7936	8	TAIMAN	2500	3700	III	15.6	3:00		3:30			187	0	105	89	7.2	95	40
7854	8	TAIMAN	1500	2500	II	13.1	3:50		4:40			200	1		25.9	2.2	28	11.5
7854	8	TAIMAN	2500	3850	III	14.1	3:15		3:50			160	0		64.6	3.5	68	28
7971	8	TAIMAN	1500	2200	II	14.7	2:45		3:45		750	225	0	115	102	11	113	45
7971	8	TAIMAN	2200	2990	III	15.5	2:30		3:15		1350	192	0	115	79.5	7.5	87	34
7972	8	TAIMAN	1400	2900	II	14.7	4:30		4:55			230	0	110	47.3	5.3	52	23
7864	8	MERINA	1500	2500	II	13.1	5:00		6:00		190	564	2.4%	100	25.5	2.5	28	11
7894	8	MERINA	1400	2100	II	14.7		4:20				180	0		36	4	40	16
7894	8	MERINA	2100	2940	III	15.6		3:16				150	0		55.5	0.5	56	19
7973	8	MERINA	1270	2940	II	15.6	3:12		3:38			167	0	100	63	12	75	33
7896	8	MERINA	1500	2300	III	15.6		2:15	3:10		1300	182	0	100	58.5	11.5	70	31
7941	8	MERINA	1700	2420	III	15.6		4:05				220	0.3%	91	54	2	56	20



PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE CEMENTO

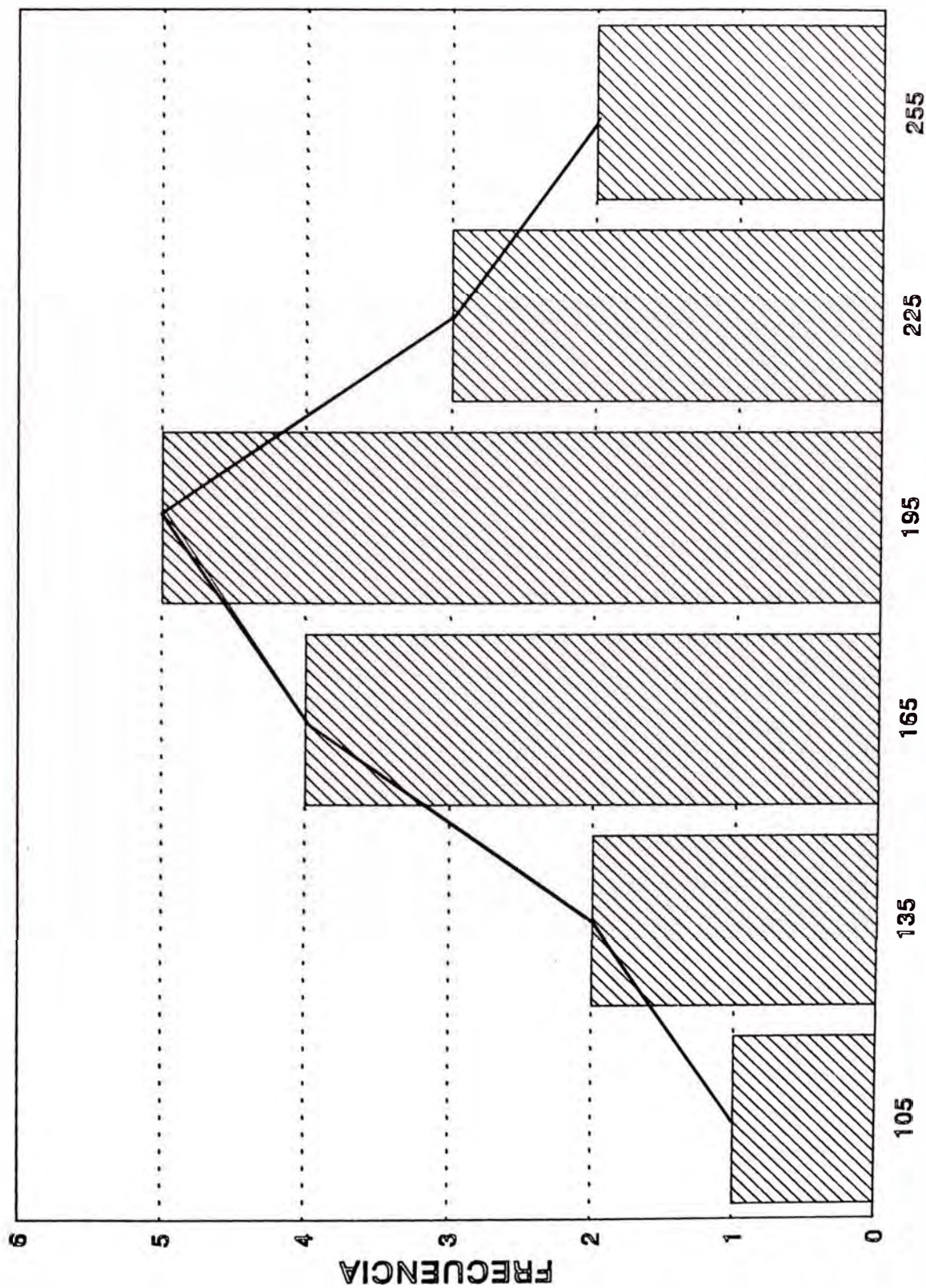
PROFUNDIDAD: 2800 - 4500'

EQUIPO N°8

POZO N°	EQUIPO	RESERVORIO	INTERVALO		N° MEZCLA	DENS. MEZCLA (#/gal)	TIEMP. ESPESAMIENTO			RESIST. COMP.		PERDIDA FILTRADO (ml)	CONT. AGUA LIBRE (ml/%)	TEMP. CIRCULACION (°F)	VISCOSIDAD PLASTICA (cp)	PUNTO DE CEDENCIA (lb/100pies²)	LECT. RÓT.	
			TOPE (pies)	FONDO (pies)			50 Uc	75 Uc	100 Uc	12 hr. (psi)	24 hrs. (psi)						L300	L100
7908	8	REVENTONES	2600	3520	III	14.7	3:10		3:45		720	158	0	105	99	6	114	48
7909	8	REVENTONES	2700	3450	III	14.7		4:10		350	760	210	0.3%	96	57	1	58	20
7918	8	REVENTONES	2700	3700	III	14.1						220	0.5%	107	24	4	28	12
7918	8	REVENTONES	3700	4620	IV	14.7		3:50		260	600	170	0.1%	107	48	2	50	18
7957	8	REVENTONES	2600	3080	III	15.6		1:46				112	0	103	138	162	>300	208
7959	8	REVENTONES	2300	3300	III	14.1	2:38		2:54			220	0	110	39.5	4.8	43	19
7959	8	REVENTONES	3300	4600	IV	15.6	1:52		2:32			162	0	110	63.1	3.6	65	26
7961	8	REVENTONES	2700	3400	III	15.6		3:48		1150	1950	183	0	100	49.5	3.5	53	20
7963	8	REVENTONES	2600	3600	III	15.6		3:30		1150	1950	184	0	100	46.5	3.5	50	19
7978	8	REVENTONES	2200	3000	II	14.1		4:30				380	0.4%	103	76.5	7.5	84	33
7978	8	REVENTONES	3000	3860	III	14.7		3:20				165	0	103	112.5	13.5	126	51
7981	8	REVENTONES	2700	4200	III	14.7	3:50		4:15			141	0	105	70.8	6.4	75	32
7916	8	BALLENA	2900	4260	III	14.7		4:30		160	440	195	0.2%	106	36	4	40	16
7917	8	BALLENA	1300	3100	II	14.1	4:25		4:55		430	236	0	105	49.5	4.5	54	21
7917	8	BALLENA	3100	4290	III	14.7	3:10		3:43		725	146	0	105	99	17	116	50
7921	8	BALLENA	2500	4400	III	14.7	3:40		4:00			195	0		82.6	19.2	98	50
7928	8	BALLENA	1300	3000	II	14.7	2:40		3:44		930	193	0	105	102	11	113	45
7928	8	BALLENA	3000	4380	III	15.6	2:30		3:25		1350	152	0	105	78	10	88	36
7929	8	BALLENA	2900	4500	IV	14.7	3:40		4:00			190	0				86	35
7949	8	BALLENA	3000	4200	III	15.6	2:15		2:35		1450	182	0	105	90	38	128	69
7953	8	BALLENA	2200	3210	III	15.6		3:05				165	0.2%	98	40.5	1.5	42	15
7983	8	BALLENA	2700	3680	III	15.6	2:05		2:40		1500	140	0	105	85.9	25	110	53
7927	8	TAIMAN	2419	3760	III	15.6		2:55				180	0	100	52.5	2.5	55	20
7936	8	TAIMAN	2500	3700	III	15.6	3:00		3:30			187	0	105	89	7.2	95	40
7854	8	TAIMAN	2500	3850	III	14.1	3:15		3:50			160	0		64.6	3.5	68	28
7971	8	TAIMAN	2200	2990	III	15.5	2:30		3:15		1350	192	0	115	79.5	7.5	87	34
7972	8	TAIMAN	2900	3830	III	15.6	3:02		3:32			190	0	110	75.2	4.7	78	32
7864	8	MERINA	2500	3955	III	14.1	4:10		4:45		430	220	0.1%	100	67.5	11.5	56	11
7894	8	MERINA	2100	2940	III	15.6		3:16				150	0		55.5	0.5	56	19

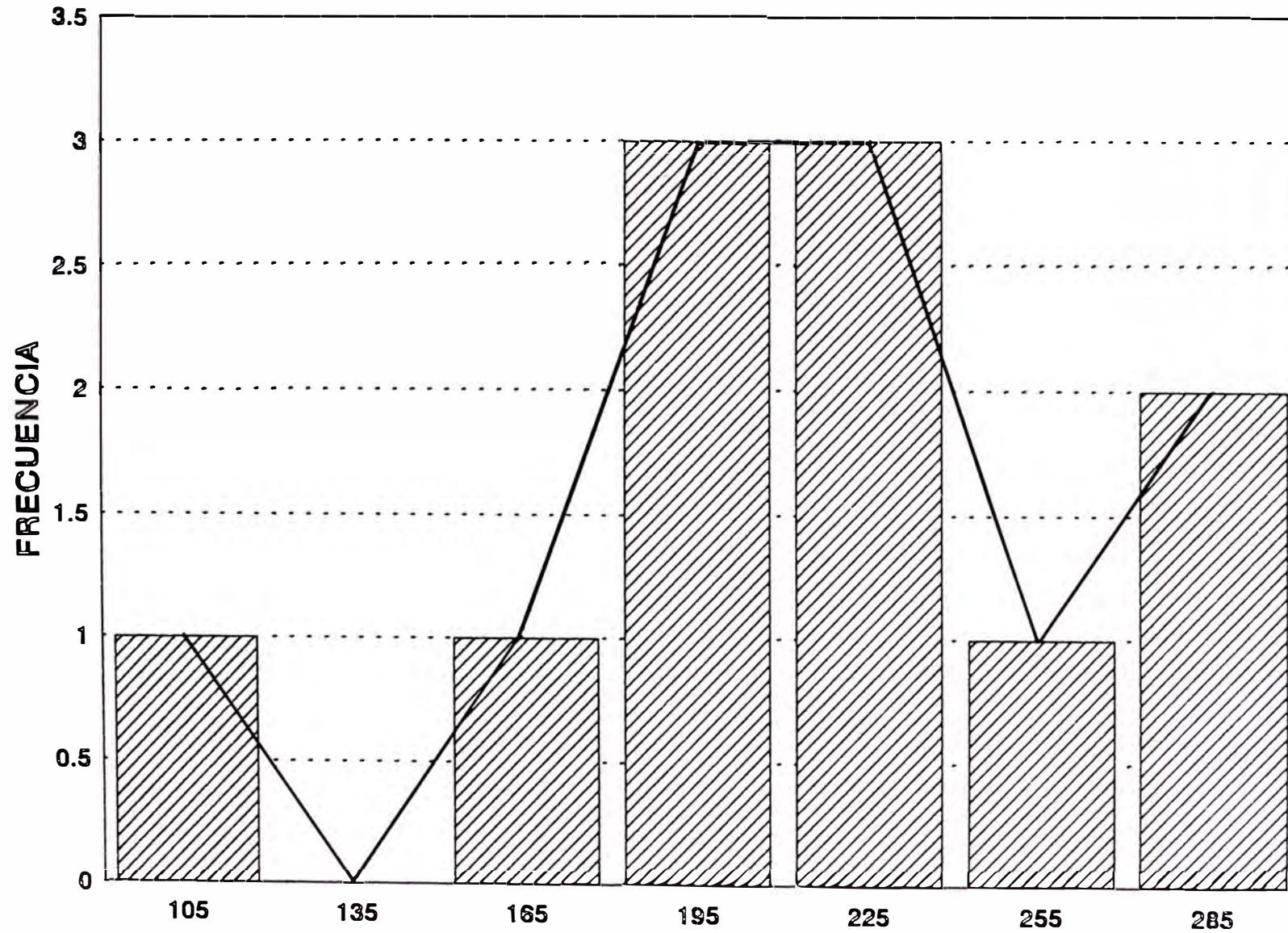


TIEMPO DE ESPESAMIENTO (50 Ue)  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



TIEMPO DE ESPESAMIENTO (min)

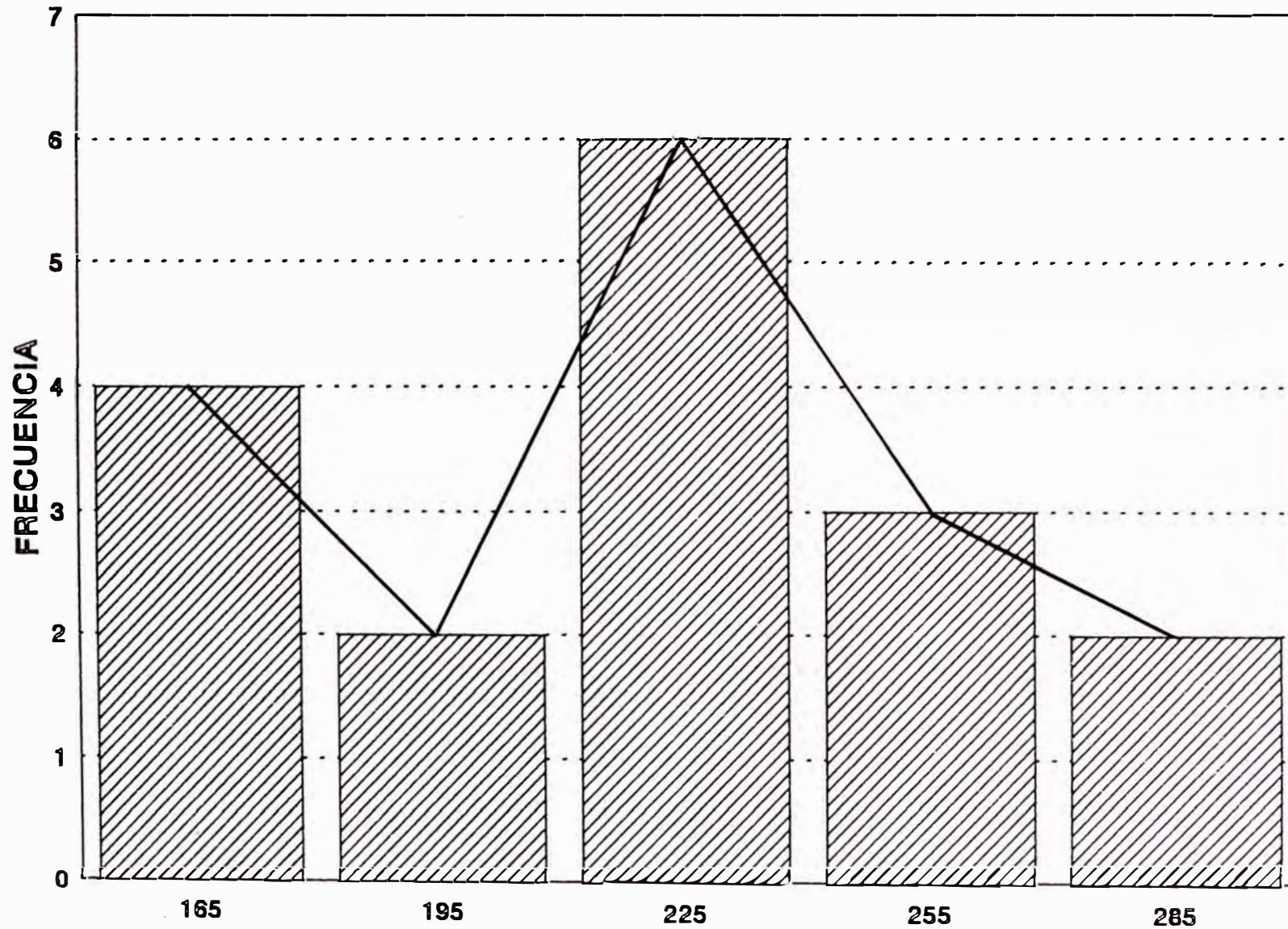
TIEMPO DE ESPESAMIENTO (75 U<sub>c</sub>)  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



TIEMPO DE ESPESAMIENTO (min)

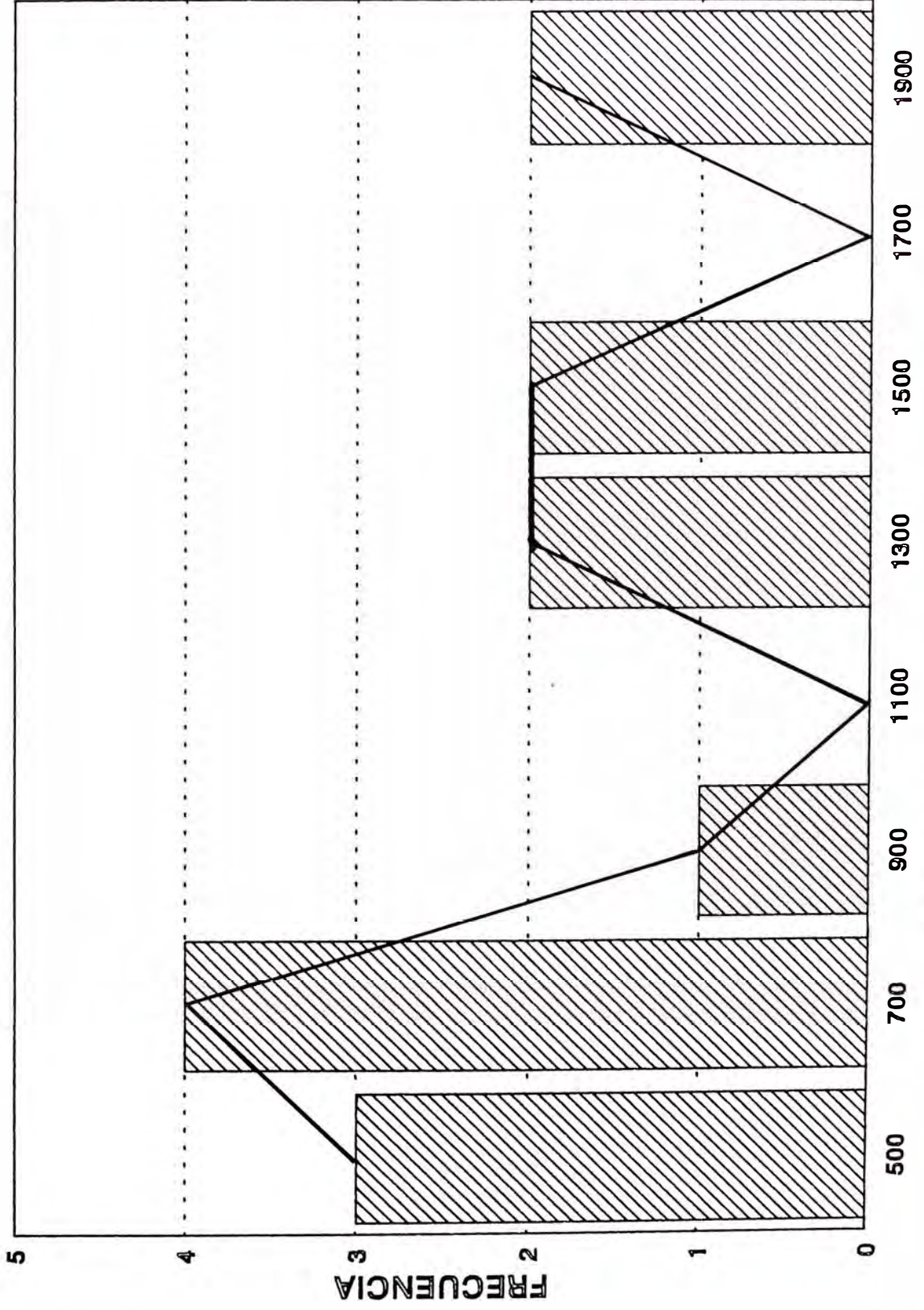


TIEMPO DE ESPESAMIENTO (100 U<sub>c</sub>)  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



TIEMPO DE ESPESAMIENTO (min)

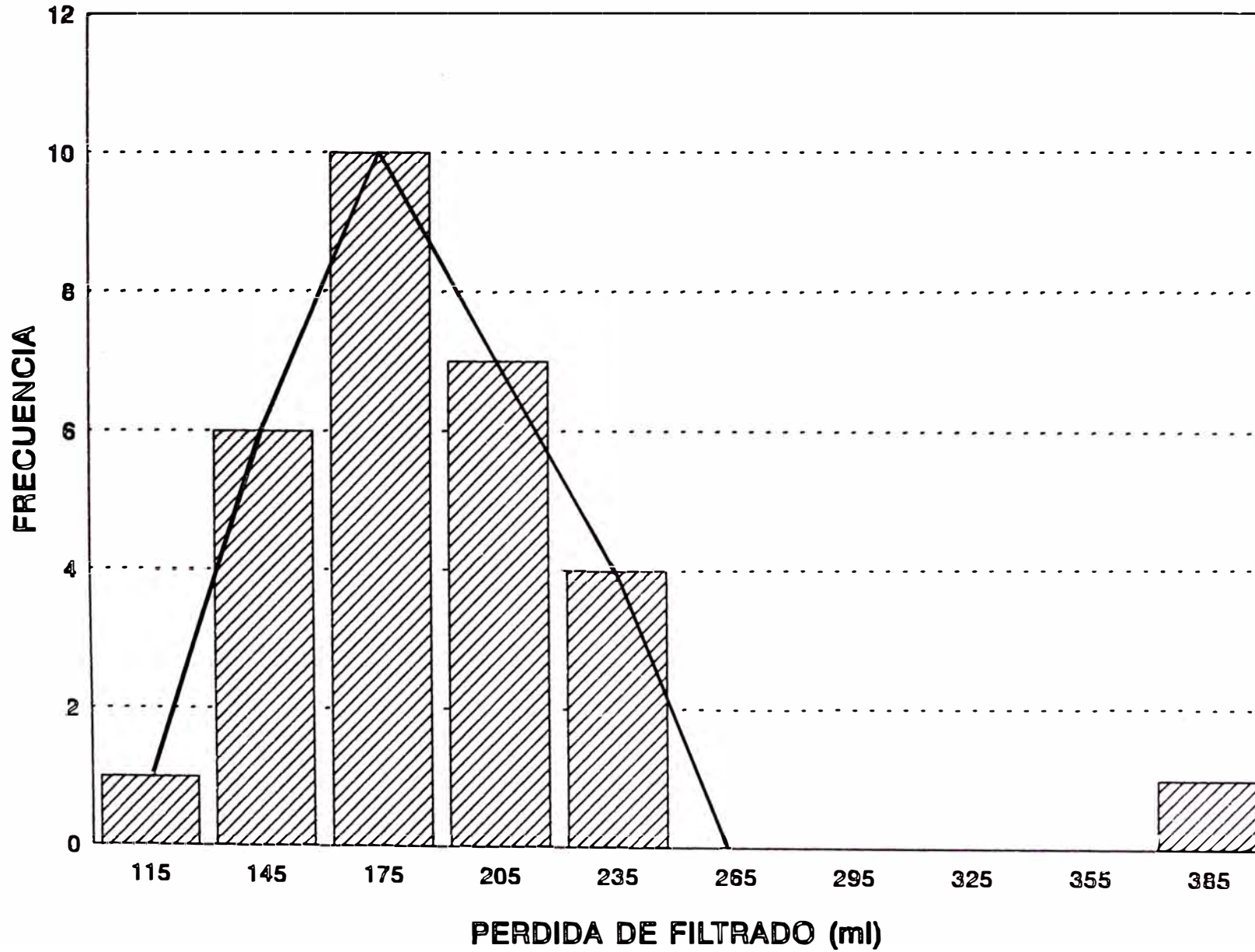
RESISTENCIA A LA COMPRESION (24horas)  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



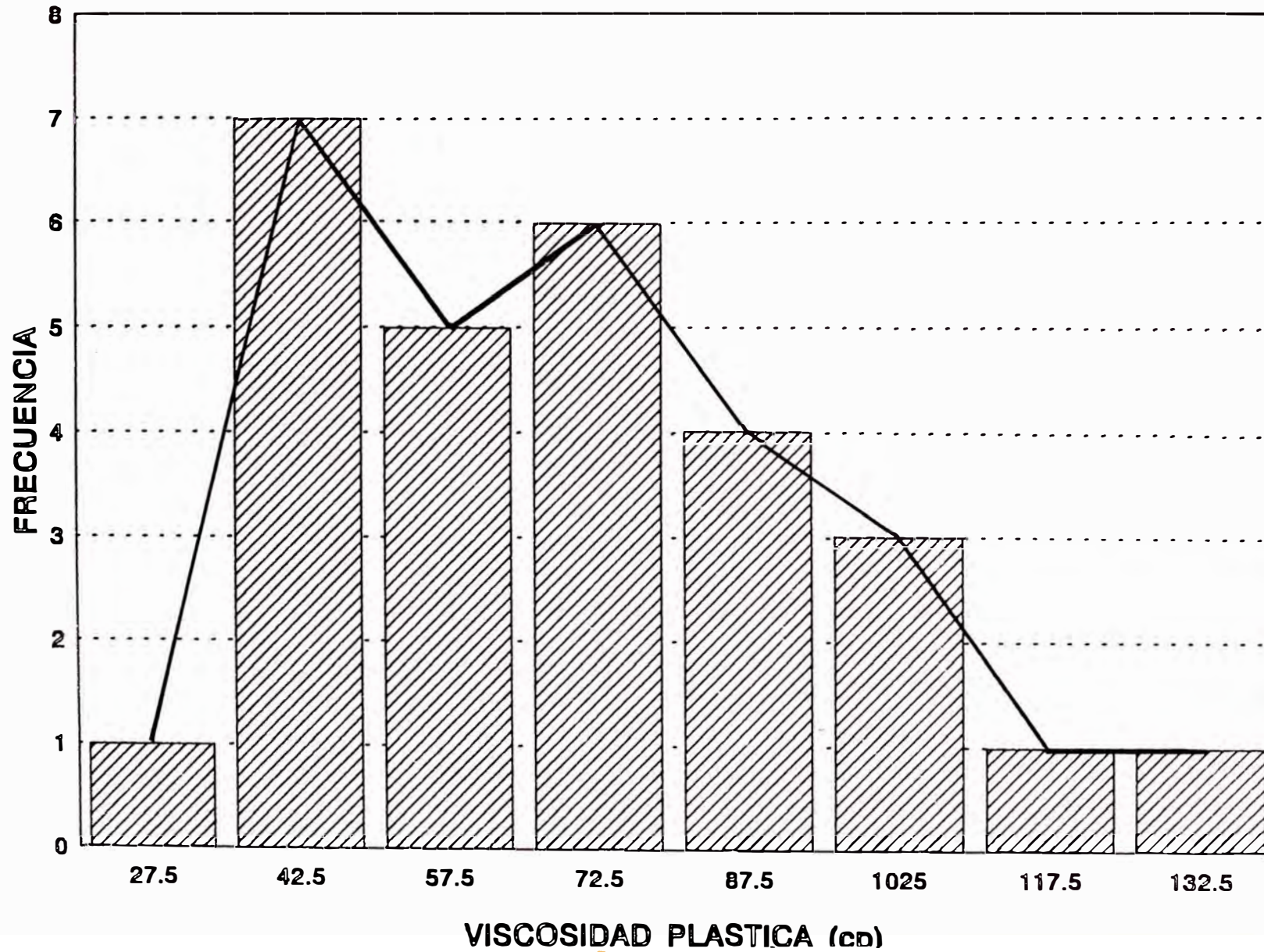
RESISTENCIA A LA COMPRESION (MPa)



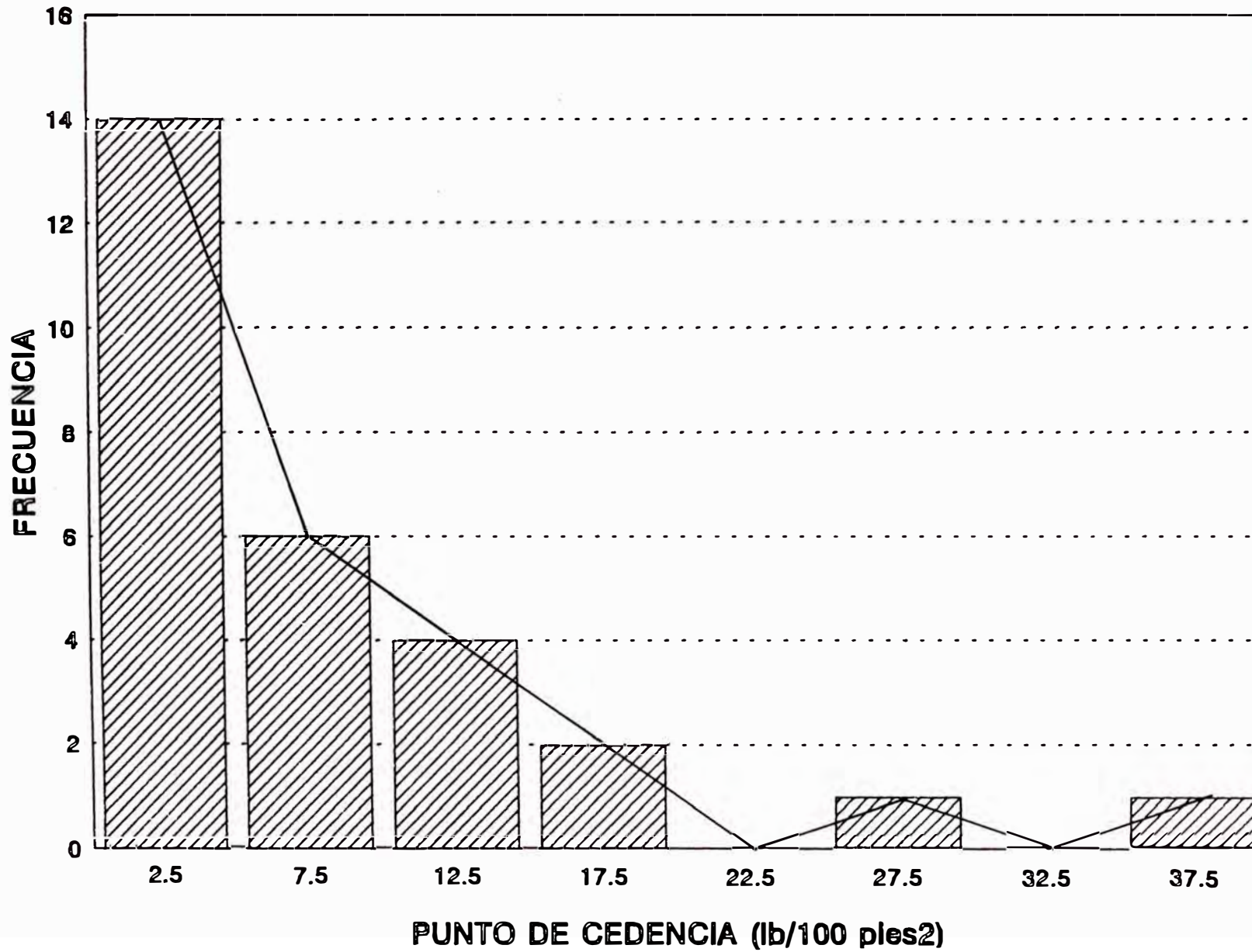
PERDIDA DE FILTRADO  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



VISCOSIDAD PLASTICA  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



PUNTO DE CEDENCIA  
LECHADA N°III EQUIPO N°8



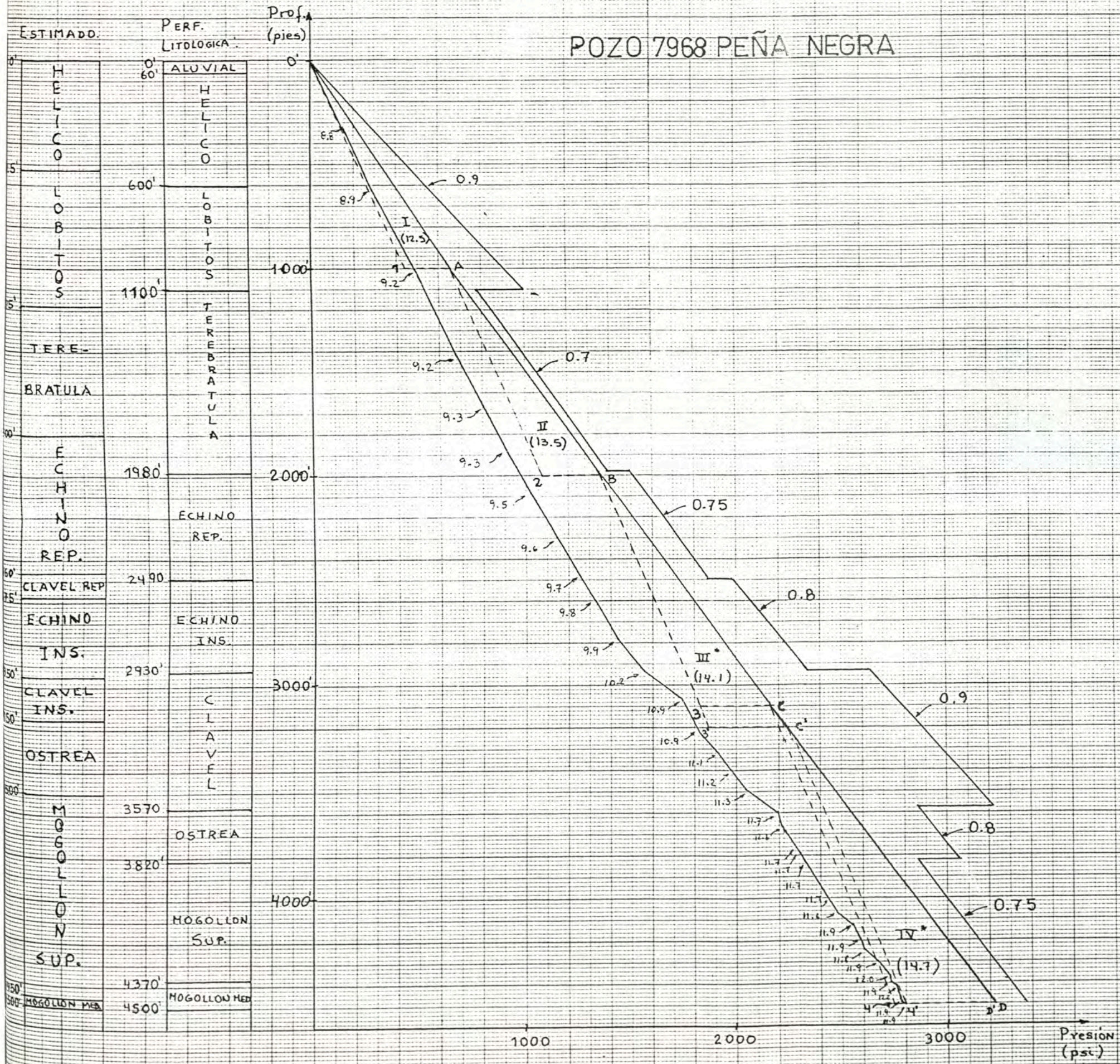


## REFERENCIAS

1. Well Cementing, Erick B. Nelson  
Schumberger Educational Services.
2. Chemical Analysis of Cement.
3. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophometry, Perkin  
– USA 1982.
4. Instrumental Analysis, Allyn and Bacon, Inc, USA, 1978.
5. Hydration And Characterization of Portland Cement, M. Michaux and B.  
Vidick, Dowell Schumberger.
6. The Chemistry of Cement and Concrete, Frederick M. Lea. 3<sup>o</sup> Edition.
7. API Cements, Dowell Schumberger.
8. Seminario Técnico de Cementaciones, BJ Services.
9. Specification for Materials and Testing for Well Cement, API  
Specification 10, Fourth Edition, August 1988. American Petroleum  
Institute.
10. 7<sup>mo</sup> Congreso Latinoamericano de Perforación, Gelificación, Hidratación  
y Caracterización del Cemento Pórtland, F.E. Fragachan y R. Labarca.  
Dowell Schumberger - Venezuela.
11. American National Standard, ANSI/ASTN C115 – C151.
12. Chemistry of Cement, Dowell Schumberger.
13. Preparación de Lechadas de Cemento, Dowell Schumberger.



# POZO 7968 PEÑA NEGRA



MEZCLA	DENSIDAD (lb/gal)	TOPE (Pies)	H (Pies)	Ø AVG. (pulg.)	Cap (ft <sup>2</sup> /ft)	FILTRADO (cc/30')	WOC (hrs)	AGUA LIBRE (%)
I	12.5	0	1000	9 5/8	0.2769	350-400	5-6	< 1
II	13.5	1000	1000	9 1/8	0.2891	300-350	4-5	< 1
III	14.1	2000	1200	9 1/8	0.2891	200-250	3-3 1/2	0
IV	14.7	3200	1220	9 1/8	0.2891	150-200	1-2 1/2	0

Csg: 5 1/2"  
 0 - 200' : N80 : 20 lb/ft.  
 500 - 4500' : N80 : 17 lb/ft.  
 COLCHONES.  
 20 BIS AGUA  
 40 BIS LAVADOR QUIMICO  
 40 BIS ESPACIADOR.  
 PESO DEL ESPACIADOR: 12.2 lb/gl.  
 PESO FINAL DEL LODO: 11.9 lb/gl.