

19

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA



DISEÑO Y EVALUACION DE CEMENTACIONES PRIMARIAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A:

José Luis Gutiérrez Dávila



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	PAGS.
CAPITULO:	
I. INTRODUCCION.	1
II. CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES.	2
III. FABRICACION, QUIMICA Y CLASIFICACION DE CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS.	6
IV. ADITIVOS PARA LA LECHADA DE CEMENTO.	17
V. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CE- MENTO.	44
VI. EQUIPO DE CEMENTACION.	56
VII. CONSIDERACIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO Y DEL - POZO .	76
VIII. METODO DE DISEÑO.	86
IX. EVALUACION DE LA CEMENTACION.	108
X. CONCLUSIONES.	137
APENDICE A.	139
TABLAS DE RECOMENDACIONES PARA DIFERENTES OPERACIONES- DE CEMENTACION.	147
BIBLIOGRAFIA.	153

CAPITULO I

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

Es de gran relevancia el incremento que en los últimos años ha experimentado la Industria Petrolera con relación a las profundidades y temperaturas alcanzadas en su búsqueda y explotación de hidrocarburos; este hecho plantea la necesidad de una planeación adecuada de las operaciones que vayan a efectuarse durante la vida del pozo.

El objetivo principal de la cementación primaria de una tubería de revestimiento es aislar entre sí los horizontes productores, y a su vez aislar estos de otros horizontes, o de intervalos dentro del mismo horizonte que contienen agua. Se desea, además, evitar la producción de gas libre, de casquetes de gas o de yacimientos vecinos de gas no asociado.

Si la cementación de la tubería de revestimiento es defectuosa puede haber producción de fluidos indeseables, a través de los intervalos abiertos en el pozo, provenientes de horizontes o intervalos vecinos; lo anterior y la inestabilidad en los costos de material, equipo superficial y subsuperficial nos conllevan a pensar en la importancia de un buen diseño de cementación para evitar operaciones futuras de recementación y el consecuente aumento en el costo del pozo.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DE LAS FORMACIONES

En la cementación primaria de tuberías de revestimiento de pozos petroleros, se debe tener conocimiento de las siguientes características de las formaciones expuestas antes de realizar las operaciones:

- a) Permeabilidad
- b) Presión de Fluidos
- c) Presencia de fracturas naturales o inducidas cuando se corren las tuberías de perforación o de revestimiento.
- d) Presión de fracturamiento.

Formaciones con alta permeabilidad, baja presión o fracturadas pueden provocar deshidratación en la lechada de cemento, que para condiciones críticas nos obligaría a incrementar la densidad de la lechada, reducir su bombeabilidad, disminuir el área efectiva del espacio anular e incrementar las pérdidas de presión por fricción, aumentando así el riesgo de una pérdida de circulación. Por otro lado si durante la cementación se excede la presión de fractura de la formación, parte o toda la lechada de cemento se perderá. Por lo que es de gran importancia el conocimiento previo de las características antes mencionadas para to

mar medidas tendientes a evitar los efectos aludidos.

Durante la colocación de la lechada de cemento la máxima presión que se alcance deberá ser siempre menor a la presión de fractura de las formaciones expuestas en el pozo, pues de lo contrario, se inducirán pérdidas de fluido de circulación.

La presión de fractura de una formación generalmente se relaciona con su profundidad y se expresa como un gradiente de presión de fracturamiento que es fácil de comparar con el gradiente de diseño de la cementación.

El gradiente de fractura de las formaciones en un campo puede estimarse a partir de:

- a) El gradiente del lodo; cuando se presentan pérdidas de circulación durante la perforación.
- b) Las presiones de ruptura alcanzadas en las cementaciones forzadas.
- c) Las presiones de ruptura registradas en las estimulaciones.

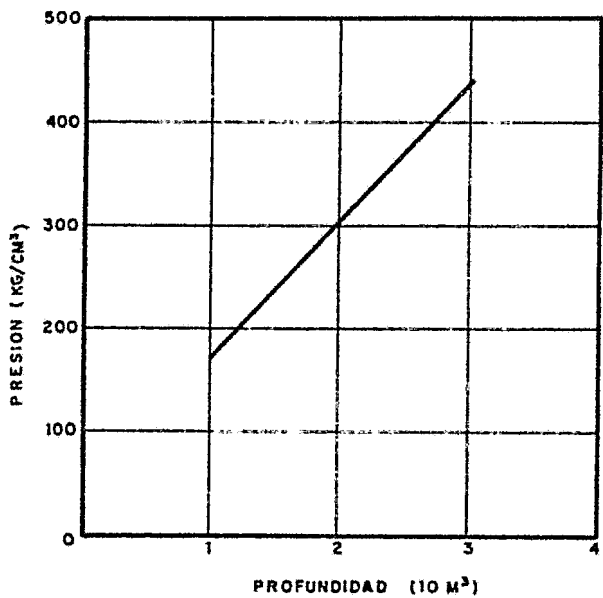
La presión de fractura puede obtenerse también a partir de la siguiente ecuación que fue desarrollada para rocas sedimentarias que se encuentran a profundidades mayores de 1000 metros.

$$P_f = D \frac{\rho}{1 - \nu} + St \text{ ----- (1)}$$

Para rocas comprendidas entre 1,000 y 3,000 mts. de profundidad el módulo de Poisson (ν) varía de 0.18 a 0.27, la densidad (ρ) de 2.0 a 2.6 gr/cm³ y el esfuerzo de tensión (St) de 14 a 70 kg/cm². Obteniendo valores medios de cada uno de estos parámetros: $\nu = 0.225$, $\rho = 2.3$ gr/cm³ y $St = 42$ kg/cm² substituyendo en la ecuación (1) obtenemos:

$$P_f = .1334 D + 42 \text{ ----- (2)}$$

Esta ecuación se representa gráficamente (Fig.1) para una mejor comprensión y visualización de la presión necesaria para inducir fracturas a una profundidad dada, recordando que las presiones de cementación deberán ser inferiores a las presiones de fractura correspondientes.



PRESION DE FRAC-
TURA (KG/CM²) :

P(1000)175.4
P(2000)308.8
P(3000)442.2
P(4000)575.6

FIG.-1 GRAFICA PARA DETERMINAR LA PRESION NECESARIA PARA INDUCIR FRACTURAS VERTICALES EN FORMACIONES QUE YACEN A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1000 M.

CAPITULO III

FABRICACION, QUIMICA Y CLASIFICACION DE CEMENTOS PARA POZOS PETROLEROS

III.1 Fabricación del cemento.

El diagrama de la Fig. 3.1 muestra muy claramente las etapas y pasos que se toman en el proceso de desarrollo de la roca natural - cemento - cemento fraguado. Un depósito de roca calcarea y arcillosa es minado, triturado y enviado a la planta de cemento.

Las materias primas, en adición a esta roca triturada, pueden incluir lutita, bauxita, escoria, arena, mineral de hierro, arcilla, ceniza, etc.

Las materias primas exactas dependen principalmente del depósito y del tipo de cemento que será hecho.

La roca triturada es finamente molida para formar la mezcla primaria. Basado en análisis químicos, la composición de esta es ajustada y mezclada para darle la cantidad adecuada de cal. La cal es entonces calcinada o quemada en un horno rotatorio a temperaturas de 1482.0 a 1538.0°C. Durante su viaje a través del horno, el material es convertido a escoria, el cual varía en tamaño, de polvo a varias pulgadas en diámetro.

En el horno el material es calentado gradualmente, a temperaturas cercanas a 100°C, el agua libre y la añadida se evaporan. Con el tiempo la temperatura alcanza de 482.0 a 538.0°C, y el agua contenida en las arcillas ha sido eliminada. Aproximadamente a 871.0°C el bióxido de carbono es separado del carbonato de calcio. Cerca de los 871.0°C, la principal reacción entre la cal y las arcillas ocurre. Alguno de los materiales forma un líquido cerca de los 1361°C, de ahí aproximadamente el 25% de la escoria está en forma líquida y es en esta forma como la deja el horno.

Después de dejar el horno, la escoria se coloca dentro de enfriadores, donde se enfria con aire y después es almacenada.

Después de un cierto periodo de almacenamiento, la escoria es molida y mezclada con yeso y otros aditivos. El yeso - - ($C_4SO_4 - 2H_2O$) es usado para controlar la velocidad de fraguado y fuerza de la lechada de cemento. Es añadido en cantidades - de 1.5 a 3% por peso de cemento. La escoria molida y mezclada es conocida como cemento. Puede ser almacenada, puesto en sacos o - enviada a granel.



FIG. III.1

La cal hidratada hidráulicamente es obtenida por calcinación de una caliza conteniendo sílice y alúmina bajo condiciones cuidadosamente controladas.

Una cantidad suficiente de escoria de cal y suficientes silicatos de calcio son formados para permitir la hidratación y proveer las propiedades hidráulicas respectivamente.

Los tres tipos básicos de materiales cementantes son: - cementos naturales, cementos pozzolan y cementos portland.

Los cementos naturales son cementos hidráulicos y tienen mucho en común con la cal hidráulica. Cada uno de estos cementos contiene componentes de silicio, aluminio y calcio, solamente materiales primarios son requeridos para cada producto. -- Los cementos naturales son usados principalmente para concreto.

Los cementos pozzolan fueron descubiertos y usados extensivamente por los Romanos. El nombre "pozzolan" se deriva de Pozzuoli, una provincia en Italia cerca de Napoles y del Monte Vesubio. Este material es de origen orgánico y cuando finalmente es unido y mezclado con la cal hidratada provee un material cementante hidráulico.

Los cementos pozzolan son complejos y su clasificación-

es difícil. Estos fueron probablemente los primeros cementos hidráulicos descubiertos. Hoy muchos materiales tales como lutita, escoria de horno de fundición, etc. son substituídos del material original y actualmente pozzolan puede ser definido como cualquier material que reaccionará con cal hidratada en presencia de agua para dar un material cementante.

En 1824 Joseph Aspin, un inventor Inglés, se le otorgó una patente para un material cementante hecho por un proceso dado. El le llamó cemento "Portland", porque el producto, después de la hidratación le recordaba la caliza de la Isla Portland.

La principal diferencia entre los cementos naturales y los cementos Portland estriba en la selección y procesamiento de las materias primas antes que entre al horno para su calcinación.

Los cementos usados actualmente en la cementación en pozos petroleros son del tipo de cemento Portland (por esto solo nos referimos a ellos). Estos cementos están vastamente probados a partir del cemento Portland original. Las materias primas son variadas y rigurosamente controladas. Por el control de las materias primas, variando la fineza y con la adición de ciertos aditivos, los cementos pueden fraguar rápida, lenta o normalmente pero desarrollando una fuerza compresiva rápida, una resistencia a los efectos dañinos de ciertos productos químicos en agua-

(por ejemplo sulfatos) y muchas otras cosas. En adición a estas variables en la fabricación, los aditivos son añadidos a la lechada para conferirle propiedades especiales.

III.2 Química de los cementos.

El cemento PORTLAND contiene cuatro componentes básicos y esenciales además del yeso, sulfatos alcalinos, magnesio, cal-libre (CaO) y cualquier otro aditivo especial. Los cuales son:

N O M B R E	FORMULA	ABREVIACION
Silicato Tricálcico	$3CaOSiO_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2CaOSiO_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3CaOAl_2O_3$	C_3A
Alumino ferrato Tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF

Estos ingredientes son el resultado de la hidratación con agua y se dice que forman cuatro fases cristalinas mayores con las fórmulas químicas ya mencionadas y las designaciones normales que se dan a continuación en la Tabla III.I

TABLA III.1 Composición y propiedades del cemento Portland
clases API.

CLASE	COMPONENTES (PORCENTAJE)				FINEZA WAGNER
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	(cm^2/gm)
A	53	24	8 ⁺	8	1600 a 1800
B	47	32	5 ⁻	12	1600 a 1800
C	58	16	8	8	1800 a 2200
D y E	26	54	2	12	1200 a 1500
G y H	50	30	5	12	1600 a 1800

PROPIEDAD

COMO CONSEGUIRLA

Gran avance de fuerza
compresiva.

Incrementado el contenido
de C_3S y moliéndolo fina-
mente.

Mejor retardamiento.

Controlando el contenido-
de C_3S , C_3A y moliendo -
burdamente.

Baja temperatura de -
hidratación.

Limitando el contenido de
 C_3S y C_3A .

Resistencia al ataque
del sulfato

Limitando el contenido de
 C_3A .

III.3 Clasificación de los cementos.

Existen varios organismos que se dedican a efectuar - - pruebas y clasificaciones de los tipos de cementos usados en la industria petrolera, entre ellos está la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM) y el Instituto Americano del Petróleo (API).

La ASTM provee especificaciones para cinco tipos de cemento Portland, estos tipos son I, II, III, IV y V; ahora bien, *los cementos fabricados para uso en pozos petroleros son sometidos a amplios rangos de presión y temperatura; difieren considerablemente de los tipos de la ASTM fabricados para uso a condiciones atmosféricas.

Por estas razones el API provee especificaciones que cubren ocho clases de cemento para pozos petroleros llamadas A, B, C, D, E, F, G y H.

Las clases A, B, C de la API corresponden a los tipos I, II y III de la ASTM; los tipos IV y V no tienen clase API correspondiente.

La industria petrolera compra cemento fabricado predominante bajo especificaciones de la API ya que estas son revisadas

y actualizadas anualmente de acuerdo a las necesidades de la industria.

Las diferentes clases de cemento API para uso a las -- presiones y temperaturas del pozo se describen a continuación:

Clase A: Destinado para usarse de la superficie a una profundidad de 1830 m. cuando no se necesitan propiedades específicas en el cemento. Disponible solamente en tipo ordinario (similar al tipo I, C-150 de la ASTM).

Clase B: Es usado de la superficie a una profundidad de 1830 m. cuando las condiciones del pozo requieren de una moderada o alta resistencia al sulfato (similar al tipo II, C-150 de la ASTM).

Clase C: Se usa de la superficie a una profundidad de 1830 m. cuando las condiciones del pozo requieren un avance de fuerza compresiva rápida. Disponible en tipo ordinario y en los tipos de moderada y alta resistencia al sulfato.

Clase D: Usado a profundidades de 1830 a 3280,0 m. y a presiones y temperaturas relativamente al--

tas, en los tipos de moderada y alta resistencia al sulfato.

Clase E: Destinado para usarse a profundidades de 3280 a 4270.0 m. a presiones y temperaturas altas, en tipos de moderada y alta resistencia al sulfato.

Clase F: Es usado a profundidades de 3280 a 4880.0 m. a presiones y temperaturas extremadamente altas en el tipo de alta resistencia al sulfato.

Clase G: Se usa como un cemento básico desde la superficie a una profundidad de 2440 m; con aceleradores y retardadores puede utilizarse con un rango amplio de valores de profundidades y temperaturas. Está fabricado para que no se le añadan materiales excepto sulfato de calcio (CaSO_3), calcio o ambos. Disponible en los tipos de moderada y alta resistencia al sulfato.

Clase H: Usado como cemento básico de la superficie a una profundidad de 2440 m. Este cemento puede ser utilizado con aceleradores y retardadores

con un amplio rango de profundidades y temperaturas. Está fabricado para que no se le añadan materiales excepto sulfato de calcio, agua o ambos. Disponible solamente en el tipo moderada resistencia al sulfato.

En la Tabla III.2 se enumeran algunas de las principales características de las clases API de cementos:

TABLA III.2 APLICACIONES DE LAS CLASES API DE CEMENTO

Clasificación API	Mezcla Agua (lts./saco*)	Peso lechada (gr./cm ³)	Prof. Pozo (m) 10 ³	Temp. °C
A (Portland)	23.0	1.87	0 a 1.8	27 a 77
B (Portland)	23.0	1.87	0 a 1.8	27 a 77
C (acción rápida)	27.9	1.77	1.8 a 3.6	27 a 77
D (retardado)	19.0	1.97	1.8 a 4.3	77 a 127
E (retardado)	19.0	1.97	1.8 a 4.3	77 a 144
F (retardado)	19.0	1.94	3 a 4.9	110 a 160
G (básico)**	22.2	1.90	0 a 2.4	27 a 94
H (básico)**	19.0	1.97	0 a 2.4	27 a 94

* Saco de 50 Kg.

** Puede ser acelerada o retardada para la mayoría de las condiciones del pozo.

CAPITULO IV

ADITIVOS PARA LA LECHADA DE CEMENTO

IV.- INTRODUCCION

Los pozos en la industria petrolera actualmente cubren un rango muy amplio de condiciones de presión y temperatura que en cualquier otro tiempo de su historia.

Más de 40 aditivos son usados en la actualidad con varias clases de cemento API para proveer características óptimas en la lechada de cemento para cualquier condición en el pozo.

Dependiendo de como son seleccionados, los aditivos pueden afectar las características de las lechadas de cemento en una gran variedad de formas. Por citar algunos ejemplos:

1.- La densidad de la lechada puede variar de 1.25 a 2.99 gr/cm^3 .

2.- La fuerza de compresión puede variar de 14 a 1408 Kg/cm^2 .

3.- El tiempo de fraguado puede acelerarse o retardarse para producir un cemento que fraguará en unos pocos segundos o -

un fluido que permanezca por espacio de 36 horas sin fraguar.

4.- El filtrado del cemento puede ser reducido hasta --
25 cm³/30 min.

5.- Las propiedades del flujo pueden variar dentro de --
un rango muy amplio.

6.- El fraguado del cemento puede hacerse resistente a--
la corrosión por densificación o por variación en su composición
química.

7.- Agentes granulares, fibrosos y agentes gelatinizan--
tes pueden ser añadidos para el control de la pérdida de la le--
chada de cemento hacia las formaciones.

8.- La elasticidad puede ser impartida a el fraguado --
del cemento por la incorporación de finas fibras en la composi--
ción de la lechada de cemento.

9.- La permeabilidad puede ser controlada en pozos de --
baja temperatura por densificación y a temperaturas de cerca de--
110 °C por densificación y el uso de fluoruro de sílice.

10.- El fraguado del cemento puede ser retardado conside

rablemente por el uso de yeso, cloruro de sodio o ambos.

11.- El calor de la hidratación (el calor liberado durante el proceso de fraguado), puede ser controlado por el uso de arena, ceniza volcánica o bentonita en combinación con agua.

Los aditivos para la lechada de cemento se clasifican de la forma siguiente:

- 1.- Aceleradores.
- 2.- Aditivos para aligerar el peso.
- 3.- Aditivos para incrementar el peso.
- 4.- Retardadores.
- 5.- Agentes control de pérdida de circulación.
- 6.- Agentes control de filtrado
- 7.- Reductores de fricción.
- 8.- Aditivos especiales.

IV.2 Aceleradores.

Las lechadas de cemento que van a ser usadas a profundidades someras en formaciones de baja temperatura requieren de un aceleramiento para reducir el tiempo de fraguado e incrementar el avance de la fuerza compresiva, particularmente a temperaturas de formación abajo de 37°C.

Con el uso de aceleradores, cementos básicos y buenas prácticas mecánicas, así como un tiempo de 4 hrs. una fuerza compresiva de 35 Kg/cm^2 puede ser desarrollada.

A continuación, se describe a los aceleradores más comúnmente usados así como sus características principales.

IV.2.1.- Cloruro de Calcio (CaCl_2).

El principal acelerador usado para cemento Portland es el cloruro de calcio que reduce el tiempo de fraguado e incrementa el avance de la fuerza de el fraguado del cemento. Por esta razón es algunas veces referido como un "acelerador total".

La adición del cloruro de calcio a el agua incrementa la temperatura de la misma. Lo anterior debe ser tomado en consideración cuando se mezcle una lechada, porque puede afectar el tiempo de fraguado de la misma.

La efectividad de el acelerador es reducida cuando la relación de agua en la mezcla de la lechada es incrementada.

Los aditivos, así como los extensores que requieren de una mezcla adicional de agua, causan que el cloruro de calcio sea diluido y se haga menos efectivo. Sin embargo, alguna ace-

lización será siempre realizada.

El cloruro de calcio es usado para desarrollar una fuerza rápida a una concentración del 2% al 4% por peso de cemento seco. Un acelerador adicional no incrementará la fuerza de compresión del fraguado de la lechada.

IV.2.2.- Cloruro de Sodio (Sal).

El cloruro de sodio, comúnmente sal, puede ser usado en las lechadas de cemento como un acelerador o un retardador, dependiendo de la concentración.

En concentración del 10% por peso de agua (BWOW) o menos, la sal actúa como un acelerador. En concentraciones del 15% ó 20%, generalmente tiene un efecto neutro sobre el tiempo de fraguado y el desarrollo de la fuerza de compresión. El retardamiento del tiempo de fraguado ocurre a bajas temperaturas y a concentraciones del 20% de saturación.

El agua de mar contiene entre 20,000 ppm y 30,000 ppm (2% y 3%) de sal. Usado como agua de mezcla podría causar una ligera aceleración en el tiempo de fraguado y en el desarrollo de la fuerza en la mayoría de los sistemas de cemento.

Una concentración del 3% a el 10% de sal por peso de -

agua de mezcla aceleraría a la mayoría de los sistemas de cemento. La concentración óptima para máxima aceleración es de 3% a 5% por peso de agua de mezcla.

En cementos que contienen bentonita, la sal actuaría como un acelerador de la fuerza, sin afectar las propiedades del tiempo de fraguado del sistema.

IV.2.3.- Cemento-Yeso.

El cemento-yeso está compuesto principalmente de una forma semihidratada de sulfato de calcio.

Es usado como un acelerador para cementos Portland a concentraciones en exceso del 100%.

Los tiempos de espera de fraguado pueden ser reducidos considerablemente con la mezcla correcta de cementos Yeso-Portland.

IV.2.4- Silicato de Sodio.

El silicato de sodio es usado principalmente para acelerar el tiempo de fraguado de lechadas de cemento que contienen retardador carboximetil hidroxietil celulosa (CMHEC).

IV.2.5.- Cementos con dispersantes y agua reducida.

Las lechadas de cemento pueden ser aceleradas por densificación. Esto se hace por adición de reductores de fricción y - disminuyendo la cantidad de agua en la mezcla.

Las lechadas más comúnmente densificadas son las de los cementos clase A, C o H de la API con 0.75 a 1.0 % de dispersante mezclado a 2.1 gr/cm^3 a una relación de agua de 15.00 lts/saco (50 Kgs).

Cuando la lechada se utiliza para colocar un tapón obturante, la adición de 6810 a 9080 gr. de arena por saco de cemento mezclado a 2.16 gr/cm^3 con la misma relación de agua producirá un desarrollo (ó avance) de fuerza rápida.

IV.3.- Aditivos para disminuir el peso (de lechada).

Las lechadas de cemento netas, cuando son preparadas a partir de las clases A, B, C o H de la API usando la cantidad recomendada de agua, se tendrá un peso de lechada en exceso de 1.8 gr/cm^3 . Muchas formaciones no soportarían columnas grandes de cemento de esta densidad. Consecuentemente los aditivos son usados para reducir el peso de la lechada.

El peso de las lechadas de cemento puede ser reducido -

por adición de agua, de sólidos que tienen una baja gravedad específica o por la de ambos.

A continuación se enumeran los materiales más comúnmente usados para este propósito, así como sus características principales.

IV.3.1.- Bentonita.

La bentonita-montmorillonita sódica, es una arcilla coloidal que imparte viscosidad y propiedades tixotrópicas a el agua fresca por intumescencia a cerca de 10 veces de su volumen original. La bentonita (o gel) fué uno de los primeros aditivos usados en cementos de pozos petroleros para disminuir el peso de la lechada e incrementar el volumen de la misma.

La bentonita puede ser añadida a cualquier clase de cemento API en concentraciones del 1 al 15% por peso de cemento. Cuando es mezclado seco en el cemento (en cantidades del 8 al 12%), requiere aproximadamente 5.0 litros de agua por cada 2% de bentonita. El efecto de 1% de bentonita prehidratada es el mismo que el de 3.6% seco mezclado.

De 8 al 12% de cemento - gel, los dispersantes son comúnmente usados para reducir la viscosidad y obtener flexibili-

dad en la cantidad de agua que debe ser usada.

La bentonita (o gel) es usada en la elaboración de las siguientes clases de cementos:

- 1.- Cemento-gel mezclado.
- 2.- Bentonita premezclada (Prehidratada)
- 3.- Cemento modificado (compuesto por cemento Portland regular, de 8 al 25% de bentonita y un dispersante lignosulfonato de calcio).
- 4.- Cemento-sal-alta gel (compuesto de cemento Portland, de 12 al 16% bentonita, de 3 a 7% de sal inorgánica-cloruro de sodio y de 0.1 a 1.5% de agente dispersante lignosulfonato de calcio).

Altos porcentajes de bentonita en el cemento reduce la fuerza compresiva y tiempo de fraguado de la mayoría de los cementos regulares y retardados. La bentonita y el agua también disminuyen la resistencia a el ataque químico de las aguas de formación.

IV.2.3.- Tierra Diatomacea.

Una tierra diatomacea especialmente clasificada, porque requiere un alto porcentaje de agua, puede ser usada para la fa-

bricación de cementos de peso ligero.

Esta tierra impartirá las mismas propiedades a las lechadas de cemento que provoca la bentonita, pero es mucho más cara. Su importancia estriba en el factor, cuando es usado en altos porcentajes, no incrementa la viscosidad de la lechada como lo hace la bentonita.

IV.3.3.- Gilsonita.

En una lechada de cemento, la gilsonita actúa principalmente como un aditivo reductor de peso y como agente de control contra la pérdida de circulación. La gilsonita es una asfaltita que se presenta en forma natural y que es inerte en las lechadas de cemento.

Se clasifica de acuerdo al tamaño de partícula en fino-hasta 0.6 de cm. Tiene una densidad en volumen seco de 0.8 gr/cm³, un requerimiento de agua de aproximadamente 266 lts/m³, una gravedad específica de 1.07. Debido a esta gravedad específica, la gilsonita es especialmente útil para reducir la densidad.

También, como la perlita, no absorbe agua bajo presión. El cemento de gilsonita, por lo tanto, tiene un avance de fuerza mucho mayor que cualquier otro fraguado de cemento del mismo-

peso de lechada conteniendo otro aditivo para disminuir el peso o para controlar la pérdida de circulación. La gilsonita no cambia significativamente el tiempo de bombeado de la mayoría de -- las clases API de cemento.

IV.3.4.- Perlita Dilatada.

La perlita es un material volcánico que es minado, triturado, colado y dilatado por calor para formar un producto celular de extremadamente bajo peso por volumen.

Fue originalmente manufacturado para la creación de concretos de peso ligero. Ahora es usado en cemento para pozos petroleros, normalmente con una pequeña cantidad de bentonita (de 2 al 6%) para ayudar a prevenir la segregación de las partículas de perlita de la lechada de cemento.

Las partículas de perlita dilatada contienen poros -- abiertos, poros cerrados y matriz. Abajo en el pozo, los poros -- abiertos se llenan de agua, algunos poros cerrados se trituran o se rompen y se llenan de agua. La densidad final del cemento depende de cuantos poros permanecen cerrados y de cuanta agua es -- inmobilizada en los poros abiertos.

IV.3.5.- Nitrógeno.

El nitrógeno es utilizado adelante del cemento para ayudar a reducir la presión hidrostática del fondo del pozo durante las operaciones de cementación. Una de las dos técnicas siguientes es utilizada: (1) el nitrógeno es introducido en el flujo -- del lodo de perforación adelante de la lechada de cemento o (2) -- con el pozo lleno con lodo y circulando; la circulación es interrumpida y un "bache" de nitrógeno es introducido antes de la cementación.

IV.4.- Aditivos para incrementar el peso.

Para presiones altas sobresalientes frecuentemente encontradas en pozos profundos, lechadas de cemento de densidad alta son requeridas para poder incrementar la densidad de la lechada de cemento, el aditivo debe tener: (1) una gravedad específica en el rango de 4.5 a 5, (2) tener un requerimiento de agua, - (3) no reducir significativamente la fuerza del cemento, (4) tener muy poco efecto sobre el tiempo de bombeado del cemento, (5) exhibir un rango uniforme de tamaño de partícula de bache a bache, (6) ser químicamente compatible con otros aditivos y (7) -- no interferir en la toma de registros geofísicos del pozo.

Los materiales más comunes para incrementar el peso a -

los cementos se ilustran en la Tabla IV.1 De estos la hematita - ha sido la más utilizada debido a que mejor se adapta a los requerimientos físicos y a que alcanza una gravedad específica - efectiva.

Tabla IV.1.-ADITIVOS DE CEMENTO PARA INCREMENTAR EL PESO.

MATERIAL	CANTIDAD USADA (% por peso de cemento)
Hematita	4 a 104
Limonita	5 a 100
Barita	10 a 108
Arena	5 a 25
Sal	5 a 16
Cemento con dispersantes y agua reducida.	.05 a 1.75

IV.5.- Retardadores.

En la perforación actual, temperaturas del fondo del pozo estáticas de 77 a 260°C o más son encontradas cerca de un rango de profundidad de 1830 a 7620 m. Para prevenir que el cemento-frague muy rápidamente, deben ser añadidos retardadores a las lechadas de cemento, para que esta pueda ser colocada con seguridad a solamente 2400 m. Los retardadores deben ser compatibles con los varios aditivos usados en los cementos, así como con el -

cemento mismo.

Los retardadores de cementos disponibles comercialmente son componentes tales como ligninas (sales de ácido lignosulfónico), gomas, almidones, ácidos orgánicos y derivados de celulosa. Algunas veces estos retardadores no son totalmente compatibles con los retardadores añadidos por las compañías de servicio, así que los cementos deben ser probados antes de ser utilizados. Es este problema de compatibilidad el que condujo a el desarrollo de los cementos clase G y H de la API, a los cuales no se les permite contener retardadores químicos en su fabricación. Estos cementos básicos pueden ser usados a 2400 m. y responden bien a los retardadores cuando son usados a profundidades mayores de 9000 m.

Los aditivos con altas relaciones de agua requieren de retardador adicional para alcanzar el tiempo de fraguado deseado. Esto es porque (1) los materiales con áreas de superficies grandes, las cuales generalmente tienen requerimientos de agua grandes absorberán parte del retardador, dejando una menor cantidad para retardar el cemento y (2) agua adicional diluye el retardador y reduce su efectividad.

A continuación se enumeran los productos usados como retardadores así como sus principales características.

IV.5.1.- Cloruro de Sodio.

Como ya se mencionó el cloruro de sodio, puede ser usado como acelerador o como retardador dependiendo de su concentración.

Una concentración de arriba del 20% de cloruro de sodio funciona como retardador. La sal no es un eficiente retardador a altas temperaturas, pero sistemas saturados de sal (37%) puede retardar el desarrollo de la fuerza por periodos largos de tiempo a bajas temperaturas del fondo del pozo.

Agua saturada con sal y mezclado con cemento seco provee bombeabilidad para desplazar cemento clase, A, G o H de la API a profundidades de 3000 a 3600 m. y a temperaturas de 110 a 127°C. El efecto de retardamiento relativo de la sal a varias temperaturas se muestra en la Fig. IV.1.

Para cementaciones a través de secciones de sal, las lechadas son generalmente saturadas con sal, pero la mayoría de las lutitas y arenas bentoníticas que son sensibles a el agua fresca, concentraciones bajas de sal son usualmente adecuadas.

IV.5.2.- Retardadores de Lignina.

Los retardadores de lignina-lignosulfonato de calcio y

lignosulfonato de calcio y sodio son derivados de la madera. Son generalmente usados en un rango de 0.1 a 1.0% por peso de saco - de cemento de 50 Kg.

Los retardadores de lignina han sido usados ampliamente en el retardamiento de cemento de todas las clases API a profundidades de 3600 a 4200 m. y donde las temperaturas de fondo estático están dentro del rango de 127 a 143°C. También han sido utilizados para incrementar la bombeabilidad de los cementos clase-D y E de la API en pozos de altas temperaturas (150°C ó mayores) pero para este propósito no son tan efectivos como los ligno-sulfatos modificados con ácidos orgánicos.

Estos retardadores funcionan por absorción sobre las superficies de las partículas de cemento lo cual disminuye el gasto de hidratación.

IV.5.3.- Carboximetil-Hidroxietil-Celulosa (CMHEC).

Este material es usado para disminuir la pérdida de - - agua de la lechada. También sirve para retardar el tiempo de fraguado de la misma. Es compatible con todos los tipos de cemento-clase API y también se utiliza para retardar sistemas de cemento con sal. Incrementa la viscosidad de la lechada de cemento; esto es una ventaja en la eliminación de lodo mejorado o en la suspen

sión de agentes pesados pero es una desventaja donde el flujo -- turbulento es requerido.

Es por lo general usado en el rango de 0.05 a 0.5 % basado en el peso del cemento. En este rango una cantidad de agua extra no es requerida. Concentraciones mayores de 0.5% requieren de una cantidad de agua extra para reducir el incremento de la viscosidad de la lechada. Usado como retardador encuentra aplicación en el rango de 93 a 121°C y es altamente efectivo.

Puesto que el CMHEC incrementa la viscosidad de la lechada de cemento, estas lechadas pueden ser diseñadas para usarse en flujo tapón.

IV.6.- Aditivos para control de pérdida de circulación.

La pérdida de circulación se define como la pérdida total a fracturas inducidas del fluido de perforación o de la lechada de cemento usado en la perforación o terminación de un pozo.

Lo anterior no debe ser confundido con la disminución del volumen debido a el filtrado o con el volumen requerido para llenar de nuevo el pozo de fluido.

Por lo general existen dos pasos para combatir la pérdidi

da de circulación. El primero es reducir la densidad de la lechada y el segundo es añadir un material obturante; otra técnica es añadir nitrógeno al sistema de lodo.

IV.7.- Aditivos para el control de filtrado.

La pérdida por filtrado de las lechadas de cemento es disminuida con aditivos para: [1] prevenir la deshidratación prematura o pérdida de agua enfrente de zonas porosas, particularmente en la cementación de tuberías de revestimiento, [2] proteger formaciones sensibles y [3] mejorar cementaciones forzadas.- Una lechada neta de cemento clase G o H de la API tiene una pérdida de filtrado de 30 min. API en exceso de $1,000 \text{ cm}^3$.

Las funciones principales de los aditivos para control de filtrado son [1] formar films o micelas las cuales controlan el flujo de agua de la lechada de cemento y previenen la deshidratación rápida y [2] mejorar la distribución del tamaño de las partículas, la cuál determina como el liquido es atrapado en la lechada.

Los dos materiales más utilizados en el control de pérdida por filtrado son los polímeros orgánicos (celulosa) y los reductores de fricción.

El alto peso molecular de los componentes de la celulo-

sa producirá una pérdida de agua baja en todos tipos de composiciones de cementación a concentraciones de 0.5 a 1.5 % por peso de cemento. El requerimiento de agua, sin embargo puede ser ajustado para producir la viscosidad deseada.

Los dispersantes o reductores de fricción, son comúnmente añadidos a las lechadas de cemento para controlar la pérdida por filtrado por dispersión y encajonamiento de las partículas de cemento densificando así la lechada. Esto es especialmente -- efectivo cuando la relación agua-cemento es reducida.

IV.8.- Reductores de fricción o dispersantes de cemento.

Los agentes dispersantes son añadidos a las lechadas de cemento para mejorar sus propiedades de flujo. Las lechadas dispersantes tienen una baja viscosidad y pueden ser bombeadas en flujo turbulento a presiones bajas, minimizando los H.P. requeridos y disminuyendo la oportunidad de pérdida de circulación y -- deshidratación prematura.

Los dispersantes comúnmente añadidos a las lechadas de cemento son polímeros, agentes de pérdida-fluido en cemento gel, y sal (cloruro de sodio). Son usados a temperaturas bajas debido a que retardan el cemento solo ligeramente. Los lignosulfonatos de calcio (mezclas de ácido orgánico) retardan substancialmente-

el cemento y son usados generalmente a altas temperaturas.

IV.8.1.- Polimeros (dispersantes o adelgazadores).

Los polimeros, fabricados en forma de polvo, producen una inusual utilidad en las propiedades de los sistemas en el cemento.

Estos no aceleran o retardan significativamente a la mayoría de las lechadas pero lo que hacen es reducir la viscosidad aparente; encuentran aplicación en un rango de temperaturas de 15 a 150°C.

Los polimeros no causan una separación de agua libre -- excesiva o asentamientos de partículas de cemento de la lechada. Son compatibles con todos los tipos de sistemas de cemento excepto con aquellas que contienen concentraciones altas de sal; son incompatibles con la sal, la cual puede causar que se floculen, y después de 10 a 20 minutos de mezclarlos causan un rápido incremento en viscosidad.

IV.8.2.- Sal (Cloruro de Sodio).

La sal común al añadirse, actúa como un agente pesante, un acelerador y un retardador, dependiendo de su concentración -

como ya se explicó, puede también actuar como un adelgazador -- (dispersante) en muchas composiciones para cementación. Es especialmente efectivo para reducir la viscosidad aparente de las lechadas que contienen bentonita, tierra diatomacea o pozzolan.

IV.9.- Aditivos especiales para cemento.

Los aditivos especiales usados en las lechadas de cemento se enumeran enseguida:

IV.9.1.- Descontaminante de lodo.

Paraformaldehido o una mezcla de paraformaldehido y cromato de sodio son algunas veces utilizados para minimizar los efectos de retardamiento del cemento de varios lodos de perforación químicos en la circunstancia de que una lechada de cemento venga a ser contaminada por intermezcla con el fluido de perforación. Un descontaminante de lodo consistiendo de una mezcla de 60:40 de paraformadehido y cromato de sodio neutraliza ciertos tratamientos químicos de lodo. Es efectivo contra taninos, ligno sulfonato, celulosa, ligninas, almidón, lignosulfonato de ferro-cromo, lignina de cromo y lignito de cromo.

Los descontaminantes de lodo son usados principalmente en trabajos de retaponamiento en pozos abiertos y en tuberías de

revestimiento, para cementaciones forzadas.

IV.9.2.- Fluoruro de Sílice.

La sílice o fluoruro de sílice es utilizada en composiciones de cementación para ayudar a prevenir la pérdida de fuerza.

Las investigaciones han demostrado que cuando las temperaturas exceden los 110°C todos los cementos pierden mucho de su fuerza compresiva; y a temperaturas mayores la pérdida de fuerza es más grande. Esta pérdida de fuerza, la cuál es acompañada por un incremento en permeabilidad, es causada por la formación de una forma de hidrato-alfa de silicato de calcio en el fraguado del cemento. Añadiendo una relación de agua mayor, así como un material como la bentonita acelera la pérdida de fuerza.

El fluoruro de sílice puede ser añadido a todas las clases de cemento API para prevenir la pérdida de fuerza que ocurre con el tiempo y altas temperaturas. La cantidad óptima de sílice para controlar la pérdida de fuerza es de 30 a 40%. El fluoruro de sílice (-200 mesh) tiene un requerimiento de agua del 40% -- (18.0 Kg ó 18.0 lts. de agua por 45 Kg de fluoruro de sílice). -- Donde lechadas pesadas son requeridas (de 2.04 a 2.40 gr/cm³), -- sílice gruesa teniendo un rango de tamaño de partícula de -50 a

150 mesh es usada frecuentemente.

IV.9.3 Trazadores radioactivos.

Los trazadores radioactivos son añadidos a las lechadas de cemento como marcas que pueden ser detectadas por dispositivos de registro. Pueden ser usados para determinar la localización de cimas de cemento y la localización y disposición de cemento forzado.

Los isótopos comúnmente usados abajo del pozo tienen un rango de vida media de 8 a 84 días.

IV.9.4.- Tintes (o Tinturas) para cemento.

Pequeñas cantidades de tinte indicador pueden ser usadas para identificar un cemento de una clasificación específica de la API o un aditivo mezclado en una composición de cemento. - Cuando los tintes son usados en el fondo del pozo, la dilución y la contaminación con lodo puede opacar y confundir los colores - haciéndolos inefectivos.

IV.9.5.- Hidrazina.

La hidrazina es un aditivo usado para tratar la columna

de lodo cerca del cemento para minimizar problemas de corrosión en la porción sin cementar del pozo, 0.454 Kg. de hidrazina - - (1.30 Kg de solución al 35%) es requerida para remover 0.454 Kg. de oxígeno disuelto. La hidrazina es un limpiador compuesto de oxígeno por lo cual debe ser manejada con extremada precaución.- En la determinación de la cantidad de hidrazina a ser usada, el volumen teórico calculado a ser colocado detrás de la tubería de revestimiento ser incrementado en un 20%. La hidrazina es cara, - así que la cantidad debe ser calculada cuidadosamente. Sin embargo, un exceso de ella en el lodo no es detrimento físico.

Cuando el trabajo ha sido concluido, bombas, líneas y recipientes deben ser rigurosamente lavados con agua.

IV.9.6.- Cemento con fibras.

Materiales sintéticos fibrosos son frecuentemente añadidos a los cementos en concentraciones de 1/8 a 1/2 lb/saco para reducir los efectos de rompimiento o destrucción parcial de la perforación de la fuerza de los lastrabarrena u otras fuerzas -- del fondo del pozo.

Los materiales fibrosos transmiten esfuerzos localizados más cercanos a el cemento y así mejoran la resistencia al impacto y al rompimiento.

* Tubería de Revestimiento.

La fibra más utilizada es el nylon. Tiene fibras que -- varían en sus longitudes arriba de 2.54 cm., es elástico e imparte gran fuerza al esfuerzo cortante, al impacto y a la tensión.

IV.9.7.- Aditivos de yeso.

Cerca del 4 al 10% de yeso es añadido al cemento Por--tland para alcanzar: (1) fraguado rápido para combatir la pérdida de circulación, (2) propiedades tixotrópicas y (3) expansión de las propiedades en el fraguado del cemento.

Añadido del 30 al 50% de yeso a cualquier cemento Por--tland producirá un fraguado rápido de 12 a 20 minutos. Esto ha -- sido muy efectivo para sellar zonas de pérdida de circulación en pozos someros donde la fuerza es necesaria para dar estabilidad a las paredes del pozo.

Para formaciones inconsolidadas altamente permeables, - fracturadas o cavernosas, del 5 al 10% de yeso añadido a la lechada de cemento Portland causará que se gelatinice rápidamente cuando está en estado estático. Esta propiedad tixotrópica ayuda a que la lechada pase a través de formaciones permeables. El ye--so es usado principalmente en pozos cuya profundidad es menor de 1800 m.

El yeso añadido a la clase A, G o H de cemento API en--

concentraciones del 3 al 6% reaccionará con el aluminato tricálcico y dilatará el fraguado del cemento. Estas propiedades de dilatación mejora la adhesión del cemento entre la tubería y la formación, efectuando un mejor sello contra la migración anular de gas o fluido.

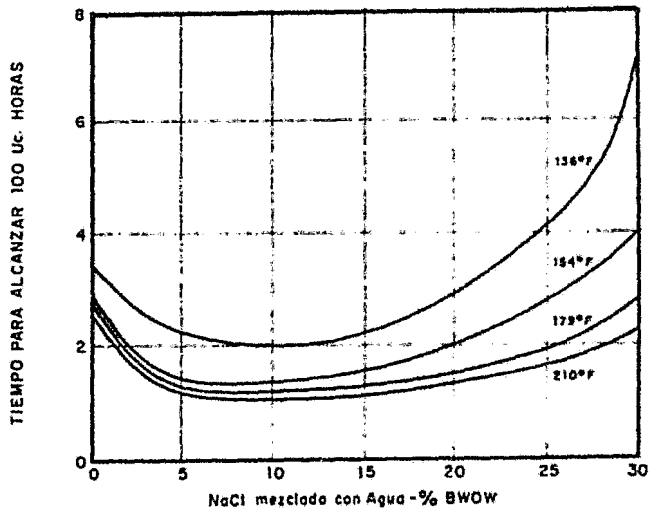


Figura 1

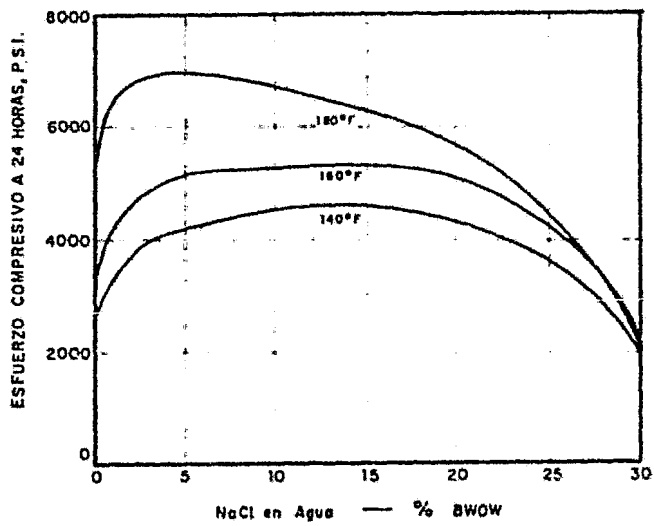


Figura 2

CAPITULO V

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO

Las condiciones del pozo, y los probables problemas durante la perforación, (pérdida, flujos, etc.) tipos de terminación y temperaturas del fondo deben ser considerados en el diseño de una cementación para un pozo petrolero. Los siguientes factores afectan el diseño de la lechada de cemento:

- 1.- Profundidad del pozo.
- 2.- Temperatura del pozo.
- 3.- Presión de la columna de lodo.
- 4.- Viscosidad y contenido de agua de la lechada de cemento.
- 5.- Tiempo de contacto.
- 6.- Fuerza del cemento requerida para soportar la tubería.
- 7.- Calidad del agua de mezcla disponible.
- 8.- Tipo de fluido de perforación y aditivos para el mismo.
- 9.- Densidad de la lechada.
- 10.- Calor de la hidratación.
- 11.- Permeabilidad del cemento fraguado.
- 12.- Control del filtrado.

V.1.- Presión, Temperatura y Tiempo de bombeo.

Dos influencias básicas del comportamiento de la lechada de cemento en el fondo del pozo son la presión y la temperatura. Estos factores afectan la forma en que la lechada será bombeada y como en el pozo desarrollará la fuerza necesaria para soportar la tubería. La temperatura tiene la influencia más pronunciada. Como la temperatura de la formación se incrementa, la lechada de cemento se hidrata, fragua y desarrolla su fuerza más rápidamente. También, el tiempo de fraguado es reducido.

La presión impuesta sobre una lechada de cemento por la carga hidrostática de los fluidos del pozo también reduce la bombeabilidad del cemento. En pozos profundos, la presión hidrostática así como la presión superficial durante la colocación puede exceder 1408 Kg/cm^2 .

Los grados de temperatura varían en diferentes áreas -- geográficas. Estimaciones de las temperaturas estáticas del fondo del pozo pueden ser obtenidas de estudios realizados durante los registros Geofísicos y temperaturas de circulación del fondo del pozo son obtenidas de estudios hechos durante la perforación cuando las condiciones del lodo eran conocidas antes de colocar la tubería de revestimiento. De estos datos la gráfica de temperatura estática del fondo del pozo contra temperatura de circula

ción puede ser obtenida para determinar la bombeabilidad de una lechada de cemento.

El efecto de enfriamiento que ocasiona el desplazamiento de lodo baja la temperatura de circulación del pozo considerablemente durante la cementación de la tubería de revestimiento. Durante la cementación forzada, el efecto de enfriamiento es menor porque es menor el fluido del pozo que precede a la lechada. Así una composición para cementación es más bombeable durante -- una cementación primaria que durante una cementación forzada a la misma profundidad.

El tiempo que toma una lechada de cemento para alcanzar el fondo depende tanto del tamaño de la tubería de revestimiento como del gasto de desplazamiento.

Para determinar el tiempo de bombeo de una lechada se toman como bases las gráficas de gastos de desplazamientos, potencia requerida, volumen de la lechada y tamaño del pozo y de la tubería de revestimiento. Los datos de fuerza están basados en las presiones y temperaturas del pozo e indican el tiempo requerido para que el cemento desarrolle la fuerza suficiente para soportar la tubería.

V.2.- *Viscosidad y contenido de agua de las lechadas de cemento.*

En la cementación primaria la lechada de cemento debe tener una viscosidad o consistencia que alcance la mayor eficiencia de desplazamiento de lodo y permita una buena adherencia entre la formación y la tubería. Para alcanzar esto, la mayoría de las lechadas son mezcladas con cierta cantidad de agua que proveerá un volumen de fraguado igual al volumen de la lechada sin separación de agua libre. El tamaño de la partícula, área superficial y los aditivos influyen en la cantidad de agua de mezcla requerida para alcanzar la viscosidad en particular para una lechada dada. Existen rangos en viscosidad que gobiernan la forma en que una lechada puede ser y permanecer bombeable bajo condiciones de pozo específicas. Estas cantidades de agua están dadas en términos específicos, definidos de la forma siguiente:

Agua máxima: es la cantidad de agua de mezcla para cualquier composición de cemento dado que dará un volumen de fraguado igual al volumen de la lechada sin más que 1.50 % de separación de agua libre. El agua máxima es la cantidad usada para la mayoría de las cementaciones debido a que el rendimiento máximo está diseñado para cada saco de cemento.

Agua normal: es la cantidad de agua de mezcla que alcan

zará una consistencia de 11 Uc (unidades de consistencia) medido en un probador atmosférico de tiempo de fraguado después de 20 - minutos de actividad. El API utiliza unidades de consistencia. debido a que los valores obtenidos no son valores de viscosidad -- verdaderos (poise). El agua normal es algunas veces llamada Agua Óptima, ya que provee una buena lechada bombeable.

Agua mínima: es la cantidad de agua de mezcla que dará una consistencia de 30 Uc después de 20 mins. de actividad. El rendimiento de este tipo de lechada densa puede ser utilizado, - por ejemplo, para controlar la pérdida de circulación.

La relación agua/cemento, volumen de lechada y volumen de fraguado están estrechamente relacionadas con el tamaño de la partícula y el área superficial de un cemento.

Debe enfatizarse que al incrementar el contenido de -- agua se alargará el tiempo de bombeabilidad y se retrasará el -- fraguado del cemento, el agua nunca debe incrementarse a menos -- que el cemento sea mezclado con bentonita o un material similar para parar el exceso de agua; este exceso siempre produce un cemento débil con baja resistencia a la compresión.

V.3. Tiempo de contacto.

El tiempo de contacto específico depende principalmente

del tipo de trabajo, de las condiciones del pozo y del volumen de cemento que va a ser bombeado. Cuando la tubería de revestimiento va a ser cementada a una profundidad de 1800 a 5500 m., - un tiempo de bombeo de 3 a 3 1/2 hr. es generalmente usado en el diseño de la lechada. Este tiempo provee un factor de seguridad adecuada, aún en la cementación de tubería corta (liner) muy profundos y con altas temperaturas. Cuando, las condiciones de colocación de la lechada son críticas, deben hacerse pruebas en el laboratorio con el probador de tiempo de contacto a presión y temperatura; este aparato aplica presión y temperatura a la lechada, una medición continua de la consistencia es reportada en una gráfica y el límite de bombeabilidad es alcanzado cuando la torsión en el batidor de la tasa de lechada alcanza 100 Uc.

Ú.4. Fuerza del cemento para soportar la tubería.

De estudios realizados en laboratorio se ha determinado que una fuerza compresiva de 35 Kg/cm^2 es más que suficiente para soportar la tubería.

La fuerza compresiva es la base para la mayoría de las regulaciones de las esperas del fraguado del cemento (woc).

En la decisión del tiempo de espera de fraguado es importante: (1) conocer que tan fuerte debe estar el cemento antes=

de que la perforación pueda continuar y [2] entender las características del desarrollo de la fuerza de los cementos en uso común.

Las siguientes observaciones de la fuerza del cemento para soportar la tubería están basadas en estudios y experiencias de campo:

1.- Grandes fuerzas del cemento no son siempre requeridas para soportar la tubería de revestimiento durante la perforación el incrementar la densidad de la lechada disminuye el tiempo requerido para desarrollar una adecuada fuerza compresiva.

2.- Con la densificación se incrementa la fuerza y el calor de hidratación del cemento.

3.- Lechadas de cemento con excesiva relación de agua, resultan en fraguados de cementos débiles.

4.- Seleccionando el cemento apropiado y aplicando buenas prácticas de cementación, los tiempos de espera de fraguado del cemento pueden ser reducidos considerablemente.

V.5. Agua de mezcla.

El agua dulce (contenido de sólidos menor a los 500 ppm)

es preferible, pero cualquier agua potable es buena para el cemento. Los componentes inorgánicos generalmente aceleran el fraguado del cemento. Los componentes orgánicos tales como inhibidores de corrosión, bactericidas, agentes contra pérdida de fluido retardan el fraguado del mismo. Muy pocas aguas causan un fraguado instantáneo ("flash setting"); el agua de mar (30,000 a 43,000 ppm de contenido de sólidos) es una de ellas pero el tiempo de fraguado debe ser verificado. Los carbonatos y los bicarbonatos tienen un efecto impredecible sobre el tiempo de fraguado; así, aguas con alto contenido de los componentes mencionados (mayor que 2,000 ppm) deben ser evitados.

V.6. Sensibilidad de los fluidos de perforación y de los aditivos para el fluido de perforación.

Un problema es la eliminación efectiva de los fluidos de perforación durante el desplazamiento de la lechada. La contaminación y dilución por lodo puede dañar los sistemas de cementación, así como también ciertos productos químicos en el lodo y en el enjarre.

Alguna contaminación de este tipo ocurre durante la mayoría de los trabajos, pero probablemente la mayoría de ellos ocurre cuando es colocado un tapón de cemento por circulación en un sistema de lodo que ha sido altamente tratado con productos

químicos. El volumen de cemento en relación al volumen de lodo es pequeño, y el grado de contaminación del cemento nunca es conocido. La debilidad del cemento cuando un tapón es perforado es un signo de contaminación.

El mejor camino para combatir los efectos dañinos de los aditivos para el lodo de perforación es el uso de tapones limpiadores y separadores o lavadores a presión. Los tapones limpiadores ayudan a eliminar la contaminación adentro de la tubería de revestimiento y los lavadores ayudan a limpiar el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación. Los separadores son por lo general de agua, cuando el fluido de perforación es base agua y diesel cuando es base aceite..

V.7. Densidad de la lechada.

El rango de densidades de lechada varía de 1.26 a 2.10-gr./cm³. La adición de pozolón o bentonita es una medida efectiva para reducir la densidad, cualquier material que incremente el contenido de agua reducirá la densidad. Para una medición exacta de la lechada de cemento esta debe ser pesada bajo presión para eliminar el efecto de entrada de aire.

V.8 Pérdida de circulación.

En la selección y uso de materiales para controlar la -

pérdida de circulación, se deben de tomar en cuenta dos factores, el material debe ser de un tamaño el cual pueda ser manejado por el equipo de bombeo y que el tamaño de los poros de la formación expuesta sean más pequeñas que el material para que este pueda ayudar a sellar. Cuando los poros de la formación expuesta son más grandes que el tamaño del material obturante este es materialmente inefectivo y se hace necesario el uso de cementos de fraguado rápido o semisólidos.

V.9.- Calor de Hidratación.

El calor desarrollado por el fraguado de cemento en un anillo de 5.08 cm (2 pg.) incrementará la temperatura de formación de 30° a 40°F. Entre mayor sea la masa de cemento mayor será la evolución del calor desarrollado. El calor de hidratación algunas veces llamado calor de reacción o de solución, está influenciado por la fuerza y composición química del cemento, por los aditivos y por las condiciones del pozo. Cuando la temperatura de formación es muy alta la reacción es más rápida y más rápida la evolución del calor.

V.9.1.- Permeabilidad.

La mayoría de las lechadas de cemento tienen valores muy bajos de permeabilidad, menor que cualquier formación productora.

Sin embargo, si una fuerza retrogresiva a ocurrido debido a una alta temperatura del medio, la permeabilidad será mucho mayor [0.05 - 0.1 md.]. Distúrbios del cemento en el proceso de fraguado por infiltración de gas puede ocasionar comunicación para fluidos de baja viscosidad. (La dolomita y la caliza tienen una medida de 2 a 3 md y las calizas oolíticas generalmente tienen una permeabilidad muy baja al gas).

V.9.2.- Control de filtrado.

El control del filtrado en la lechada de cemento es muy importante en la cementación de tuberías cortas profundas y en cementaciones forzadas. La pérdida de filtrado a través de un medio permeable causará un aumento en la viscosidad de la lechada y una rápida depositación del enjarre de filtrado, restringiendo así el flujo. Los factores que influyen en la pérdida de filtrado de las lechadas de cemento son: tiempo, presión, temperatura y permeabilidad. El control del filtrado de una lechada de cemento es generalmente alcanzado por la adición de polímeros encadenados en un rango de concentración de 0.6 a 1.0% por peso de cemento neto.

Las lechadas de cemento que tienen una pérdida de filtrado en el laboratorio de 50 a 150 ml. en 30 min., son comúnmente utilizados en cementaciones forzadas. En la cementación de tu

berías cortas profundas, la pérdida de filtrado puede ser mayor de 300 ml.

El filtrado que se recibe en menos de 30 min. se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$F_{30} = F_t \frac{5.477}{T_1}$$

F_{30} = Filtrado a los 30 min.

F_t = Filtrado a los t min.

T_1 = Tiempo mins.

CAPITULO VI

EQUIPO DE CEMENTACION

El equipo que se utiliza en las cementaciones primarias se selecciona de acuerdo con las características de las formaciones, condiciones del pozo y técnica de cementación.

Con el propósito de facilitar el estudio del equipo requerido en las operaciones de cementación primaria, éste se clasificó en equipo subsuperficial y equipo superficial. En las secciones correspondientes a esta clasificación no se pretende llevar a cabo una completa descripción del mismo; sino más bien, - identificar sus funciones y empleo durante las operaciones de cementación.

VI.1.- Equipo subsuperficial.

En esta sección se describen las funciones del equipo utilizado dentro del pozo al efectuar una cementación primaria.

VI.1.1.- Zapatas de cementación.

Se instalan en la parte inferior de la tubería de revestimiento y sirven para guiarla y protegerla durante su introducción al pozo. Además, dependiendo de su tipo, permiten o evitan-

el paso de lodo a través de ellas. Se clasifican en guía, flotadora y de control de flujo o diferencial.

La zapata guía permite el paso de los fluidos en ambos sentidos. Se usa en la cementación de tuberías superficiales e intermedias.

La zapata flotadora únicamente permite el paso de los fluidos desde el interior de la tubería al espacio anular. Origina un efecto de flotación que reduce considerablemente el peso de la tubería sobre la torre o mástil de perforación. Su uso requiere, como se verá posteriormente, que la tubería se corra sin sobrepasar una velocidad determinada de acuerdo a las características de formación y condiciones del pozo. De lo contrario, se desarrollan presiones que seguramente dañan a las formaciones. Este tipo de zapata se usa en la cementación de tuberías intermedias, y en caso necesario, para la cementación de tuberías de explotación.

La zapata de control de flujo o diferencial se comporta como zapata guía durante la corrida de la tubería y una vez que se ha llegado a la profundidad deseada, se acciona su mecanismo interno para que actúe como zapata flotadora. Este tipo de zapata evita el desarrollo de altas presiones instantáneas. Se emplea en la cementación de tuberías de explotación y de tuberías-

intermedias, principalmente en formaciones depresionadas, con alta permeabilidad o fracturadas:

Existe además, otro tipo de zapata denominada zapata empacadora y puede ser guía o flotadora. Por su construcción proporciona un sello entre la tubería de revestimiento y el agujero, evitando así que, tanto la lechada de cemento como la presión de circulación, se manifiesten por debajo de ella.

Se opera soltando una canica desde la superficie, la cual asienta en la zapata, impidiendo el paso de fluidos a través de ella y permitiendo levantar la presión dentro de la tubería. El aumento de presión da lugar a que esta zapata empaque en la pared del pozo, accionando simultáneamente un mecanismo que abre una junta de circulación comunicando el interior de la tubería de revestimiento con el espacio anular. Por la comunicación establecida se desplaza la lechada de cemento al espacio anular.

Esta zapata se utiliza en formaciones que presentan problemas de pérdida de circulación o cuando se requiere cementar la tubería de modo que quede situada en la parte superior de la formación productora.

VI.1.2.- Coples de cementación.

Se distinguen dos tipos, los empleados en una cementa-

ción primaria convencional y los utilizados en las cementaciones por etapas.

VI.1.2.1.- Coples para cementación convencional.

Tienen por finalidad retener el o los tapones de desplazamiento. Dependiendo de su función, se clasifican en: cople de retención y cople flotador.

El cople de retención y el cople flotador permiten el paso de los fluidos en igual forma que la zapata quía y flotadora respectivamente. Se emplean en los mismos casos que estas zapatas, pero evitando combinar cople flotador con zapata diferencial o zapata flotadora.

El cople de retención o el cople flotador se coloca un tramo de tubería arriba de la zapata de cementación cuando se utilizan dos tapones de desplazamiento, y dos o más tramos arriba cuando sólo se utiliza un tapón de desplazamiento.

VI.1.2.2.- Coples para cementación por etapas.

Los coples para cementación por etapas están provistos de un mecanismo que permite comunicar el interior de la tubería de revestimiento con el espacio anular. Son diseñados de modo --

que dejan pasar los tapones de desplazamiento utilizados para la colocación de la lechada en las etapas inferiores. Se abren por medio de un dispositivo que, al asentar en el cople, permite elevar la presión, ocasionando que se deslice una camisa y se establezca la comunicación al espacio anular. Una vez que se ha --abierto el cople, puede efectuarse la etapa correspondiente de cementación. El tapón que va colocado entre la lechada de cemento y el fluido desplazante, al llegar al cople, ajusta en una segunda camisa que se desliza al aumentar la presión que actúa sobre el tapón, cerrando la comunicación previamente establecida.

El número requerido de coples de este tipo en una operación, es igual al número de etapas programadas menos una, ya que la primera etapa se realiza analógicamente a una cementación primaria convencional. Cada cople se coloca en la parte inferior del intervalo que se quiera cementar.

VI.1.3.- Raspadores o limpiadores de pared.

Se utilizan para desplazar el enjarre de lodo de las paredes del pozo, procurando así una mejor adherencia del cemento. Se clasifican en dos tipos: el primero trabaja con el movimiento vertical de la tubería, desplazándose entre anillos tope o collarines de retención; al segundo se fija a la tubería, accionándose con el movimiento rotatorio de la misma. Los raspadores común

mente usados consisten de un anillo metálico sobre el que se asegura un haz de alambres, con el propósito de limpiar las paredes del pozo de la película de lodo. Existe otro tipo de raspador -- que en lugar de alambres está provisto de cables de acero dispuestos en la forma indicada en la Fig. 1. Estos raspadores, -- cuando se introducen con la tubería, están expuestos a una acción abrasiva menos intensa que los raspadores de alambre, además presentan la ventaja de adaptarse fácilmente al diámetro -- real del pozo, sin ofrecer restricciones al flujo.

Debe tenerse presente que, aunque al eliminar la película de lodo se mejora la adherencia entre cemento y pared del pozo en el caso de formaciones con alta permeabilidad la eliminación del enjarre puede ocasionar pérdidas de fluido que, en casos extremos, darán lugar a pérdidas de circulación.

La operación de los raspadores o limpiadores de pared -- se limita a cubrir los intervalos de interés, accionándolos durante la última etapa de circulación del desplazamiento del dispersante de la arcilla y la colocación de la lechada de cemento.

La distribución de los raspadores se determina de acuerdo al desplazamiento que se dé a la tubería en el movimiento vertical. Por ejemplo, si el desplazamiento máximo de la tubería es de un tramo, la distribución será:

En el primer tramo, tres raspadores, separados con dos collarines tope colocados a $1/4 L$ y $1/2 L$; del segundo tramo hasta dos tramos arriba de la zona de interés se colocarán dos raspadores, separados con un collarín colocado a $L/2$, siendo L , la longitud de un tramo.

Si el desplazamiento de la tubería durante el movimiento vertical es menor que la longitud de un tramo, la distribución anterior se modifica aumentando un raspador y un collarín por tramo. Los collarines, en el primer tramo, se colocarán a $1/4 L$ y $3/4 L$, y en los demás tramos a $1/3 L$ y $2/3 L$.

VI.1.4.- Centradones.

Tienen por finalidad centrar la tubería en el pozo manteniendo un espacio anular uniforme en toda la longitud del intervalo a cementar; facilitar el desplazamiento del lodo del espacio anular; preveer la canalización del cemento; e igualar la presión hidrostática en el espacio anular, evitando que la tubería se pegue por presión diferencial.

La distribución de los centradones se determina en función del diámetro de la tubería, el diámetro y la desviación del pozo. Se considera que para pozos relativamente rectos, o sea con desviaciones menores de 2° , una separación de 27 m. entre --

centradores es satisfactoria.

La distribución de centradores en pozos desviados se --
 presenta en la Tabla II.1.

Por razones de seguridad, en pozos relativamente rectos,
 la distribución de centradores se modifica, colocando un centra-
 dor por tramo para cubrir 60 m. arriba y abajo de la zona de in-
 terés.

Tabla II.1 SEPARACION ENTRE CENTRADORES PARA POZOS
 DESVIADOS.

Diámetro de la tubería:	5 1/2"	6 5/8"	7"
Diámetro del pozo:	7 7/8" 8 3/4"	8 3/4"	8 3/4" 9 7/8"

Desviación en grados	S e p a r a c i ó n (m)				
2	28.04	31.09	21.93	18.90	33.53
4	23.78	26.82	18.13	15.24	27.74
6	21.64	23.78	15.77	13.11	25.06
8	20.12	21.95	14.17	11.58	22.85
10	18.90	20.73	13.18	10.67	21.35
20	15.85	17.07	10.20	7.92	16.75
30	14.02	15.24	8.83	6.70	13.70
40	12.80	14.32	7.92	5.79	13.11

Existen en el mercado centradores de diseño especial, - provistos de álabes que desvían y aceleran el flujo, propiciando el establecimiento del régimen turbulento. En esta forma; se logra desplazar el lodo que ha quedado depositado en cavidades o - ensanchamientos locales del pozo.

VI.1.5.- Tapones de desplazamiento.

Se emplean para evitar la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación. Durante la cementación se -- utilizan dos tipos de tapones. El primero limpia el interior de la tubería y el segundo separa la lechada de cemento del fluido de perforación.

Los tapones de desplazamiento se colocan en la cabeza - de cementación. El primero está provisto de un diafragma que se rompe al incrementar la presión, permitiendo el paso de los fluidos. Este tapón se emplea adelante del fluido dispersante de arcillas. El segundo tapón es sólido, construido de un material -- perforable, se emplea para separar la lechada de cemento del - - fluido desplazante..

En toda cementación primaria, en que la longitud de la tubería a cementar es mayor de 1000 m., es conveniente utilizar los dos tapones. Si se emplea únicamente el segundo tapón, será-

necesario colocar el cople de retención a una distancia suficiente de la zapata, de modo que todos los residuos desplazados por el tapón queden dentro de la tubería. Estos residuos contaminan la parte inferior de la lechada de cemento, formando una mezcla de lodo y cemento que fragua dentro de la tubería y que, posteriormente, hay que limpiar. Por lo tanto, a mayor distancia requerida entre cople y zapata, mayor tiempo de perforación para limpiar el cemento fraguado dentro de la tubería, lo que significa un mayor costo en la cementación.

El método de cálculo, para determinar la posición del cople de retención cuando sólo se utiliza un tapón de desplazamiento, se ilustra en el ejemplo siguiente:

Determinar la distancia necesaria entre cople y zapata, para cementar una tubería, de 7 5/8", V-150, de 39 lb/ft en agujero de 9 1/2" a 3964 m. de profundidad. Considérese que se emplea sólo el segundo tapón de desplazamiento y que en la pared interna de la tubería existe una película de lodo de 1 mm de espesor.

Datos:

Tubería: 7 5/8", V-150, 39 lb/ft

Diámetro exterior: 7.625 pg.

Diámetro interior: 6.625

Capacidad de la tubería: 44.90 m^3

Longitud de la tubería por tramo: 9.03 m .

Capacidad del espacio anular: 61.42 m^3

Solución:

El volumen de residuos desplazados (Vrd) es:

$$Vrd = 7.97 \times 10^{-5} \text{ di.hmc.L'}$$

$$7.97 \times 10^{-5} \times 6.625 \times 1 \times 3964$$

$$Vrd = 2.09 \text{ m}^3$$

La longitud equivalente de tubería (Le) es:

$$Le = Vrd (\text{m}^3) \times \text{capacidad de la tubería} (\text{m}^3)$$

$$= 2.09 \times 44.90$$

$$Le = 93.841 \text{ m}.$$

Número de tramos requeridos:

$$N_{tr} = \frac{\text{Longitud equivalente de tubería}}{\text{Longitud de tubería por tramo.}}$$

$$= \frac{93.841}{9.03}$$

$$\therefore N_{tr} = 10$$

Como el tapón desplaza 2.09 m^3 de película de lodo que ocupa una longitud de 93.841 m . de tubería, el cople de retención se debe colocar 10 tramos arriba de la zapata. Los 10 tra-

mos representan únicamente el volumen de residuos desplazados; -
sin embargo, conforme la película de lodo es desprendida de la -
pared de la tubería, se mezcla con la parte final del cemento, -
formándose una zona de cemento contaminado que aumenta el volu -
men de los residuos solos. En vista que no es conveniente colo -
car cemento contaminado en el espacio anular, la distancia en --
tre cople y zapata debe incrementarse hasta alcanzar un volumen-
igual al de la zona contaminada.

De este análisis se observa la necesidad de utilizar el
sistema de los dos tapones diafragma y sólido) en la cementación
primaria de la tubería de revestimiento para lograr un despla-
zamiento del cemento sin contaminación.

VI.1.6 Unidades Sellantes.

Como el fraguado del cemento es un proceso exotérmico, -
la tubería de revestimiento sufre una dilatación y posteriormen-
te (una vez que el cemento ha fraguado y se restituyen las condi-
ciones normales de temperatura dentro del pozo) una contracción.
Este fenómeno provoca que falle la adherencia entre el cemento y
la tubería, propiciando la canalización de los fluidos produci--
dos o inyectados. Para evitar el paso de fluidos a través del es-
pacio anular así formado, se emplean dispositivos denominados se-
llantes Fig. VI.2 (b), que se aseguran a la tubería de revesti--

miento por medio de prisioneros ocultos. Las unidades sellantes no presentan ningún obstáculo a la cementación, ya que su espesor es igual al de los coples. Están provistos de capas de hule, que sellan contra las paredes del cemento, evitando el paso de los fluidos. Deben instalarse 5 ó 6 m. arriba y abajo de la formación productora.

VI.2.- Equipo Superficial.

A continuación se describen las funciones del equipo empleado en la superficie al efectuar una cementación primaria.

VI.2.1.- Cabeza de Cementación.

Es un niple de longitud y diámetro variable que va enroscado en la parte superior de la tubería de revestimiento. Está provisto de dispositivos laterales para conectar las líneas que conducen: la lechada de cemento proveniente de la unidad cementadora y el lodo utilizado para el desplazamiento de la lechada de cemento (Ver figura VI.3).

En toda cementación primaria se debe utilizar cabeza de cementación de igual diámetro interior a la de la tubería que se va cementar, con el objeto de asegurar la correcta operación de los tapones de desplazamiento.

VI.2.2.- Unidad Cementadora.

La unidad cementadora está constituida por dos bombas - de alta potencia con su tablero de control y dos tanques o depósitos, en los que se mide el volumen de agua utilizado durante - la cementación. Una de las bombas succiona el agua de los depósitos y alimenta al mezclador, proporcionándole el agua necesaria- para obtener la lechada de cemento. La otra bomba succiona la lechada y la envía al pozo a través de las líneas que unen la uni- dad cementadora con la cabeza de cementación.

VI.2.3.- Mezclador.

En este dispositivo se efectúa la mezcla agua-cemento - (Fig. Núm VI-4). Su forma es semejante a la de un embudo con la- parte ancha hacia arriba en la cual se vierte el cemento. Está - provisto en la base de dos uniones que permiten conectar la lí- nea de alimentación de agua y la línea de descarga de lechada. - La primera línea se une a una de las bombas de la unidad cementa dora y la segunda línea descarga la mezcla de cemento a un depó- sito, del que es succionada por la otra bomba y es enviada al po- zo.

Con el propósito de controlar la densidad de la lechada - ésta se determina periódicamente tomando muestras del depósito -

mencionado o bien, se registra en forma continúa, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que desplaza la lechada al pozo.

VI.2.4.- Bombas del equipo de perforación.

Se consideran como parte del equipo de cementación, debido a que generalmente, en toda cementación primaria se emplean para desplazar la lechada al espacio anular, usando lodo de perforación como fluido desplazante. La velocidad de desplazamiento se determina según la técnica de cementación empleada.

Es conveniente disponer de instalaciones que permitan operar estas bombas, ya sea individualmente, en serie o en paralelo, para así desplazar la lechada de cemento al espacio anular bajo condiciones determinadas en el diseño de la cementación.



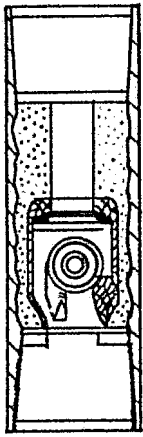
ZAPATA FLOTADORA



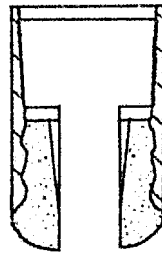
TAPON DE FONDO



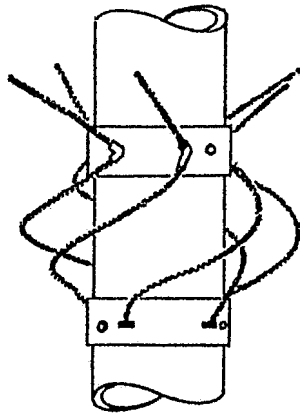
TAPON SUPERFICIAL



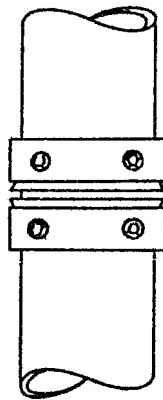
COLLAR FLOTADOR



ZAPATA GUIA

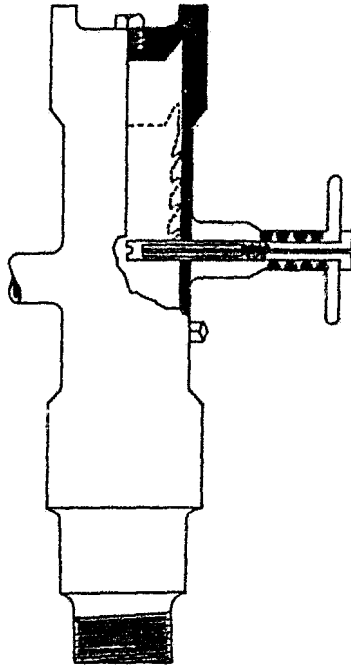


(a)



(b)

FIG. 2.- a) RASPADOR DE PARED PROVISTO DE CABLES PARA REMOVER LA PELICULA DE LODO.
b) UNIDAD SELLANTE.



CABEZA DE CEMENTACION

FIG. 07

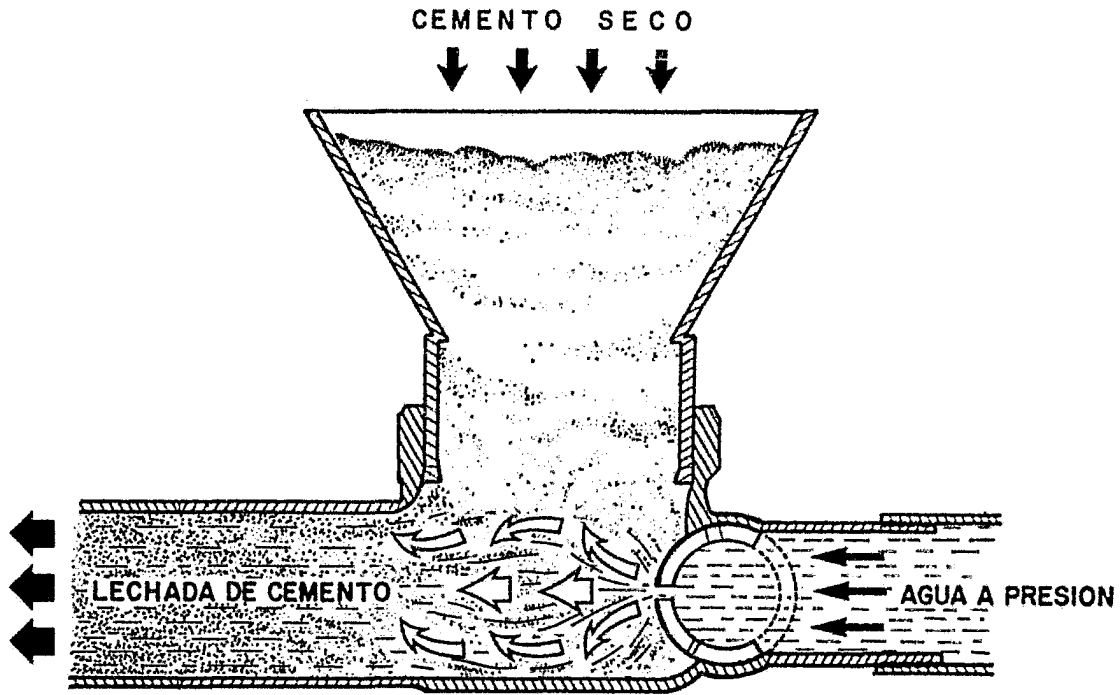


FIG. VI. 4

CAPITULO VII

CONSIDERACIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO Y DEL POZO

VII.1.- Introducción.

Antes de que la sarta de tubería de revestimiento para un pozo pueda seleccionada, la siguiente información debe ser obtenida: (1) la profundidad seleccionada o establecida; (2) tamaño del pozo y diámetro de la tubería de revestimiento en la cual va a ser corrida; (3) las presiones del yacimiento y de la columna de lodo; (4) que tipo de pozo es (por ejemplo un pozo de gas a alta presión o un pozo en una área productora establecida); -- (5) las condiciones de la formación; (6) los objetivos de la perforación.

VII.2.-Algunas consideraciones sobre el diseño de la tubería de revestimiento.

Las sargas de tubería de revestimiento*(T.R.) deben -- ser diseñadas para resistir presiones externas e internas así como cargas de las formaciones abajo del pozo. Para alcanzar estos objetivos la T.R. está frecuentemente compuesta con diferentes pesos y grados, especialmente donde las condiciones del pozo son críticas. El peso de la sarta de tubería de revestimiento debe ser considerado durante su introducción, asentamiento y cementa-

* Ver Tabla VII.1

ción. La fuerza y condición de la formación en el pozo abierto y factores tales como la presión de fractura deben ser también considerados.

Para asegurar un margen adecuado de seguridad, la mayoría de las sargas de tubería de revestimiento son diseñados con un factor de seguridad de 1.5 a 1.8 para esfuerzo a la tensión; de 1 a 1.25 para esfuerzo a la presión externa (colapso); y 1.0 a 1.33 para esfuerzo a la presión interna (reventón). La fuerza de tensión es significativa en todas las sargas excepto en la tubería conductora. El esfuerzo mayor es impuesto en la porción superior de cada sarga o si las sargas están ahusadas en la porción superior de cada sección. Los cálculos para la fuerza de tensión están basados principalmente en la carga por unidad de área de sección transversal para el grado de acero utilizado. La presión de ruptura externa (colapso) debe ser considerada en la elección de todas las sargas excepto para la tubería conductora. La máxima presión externa es ejercida en el fondo de cada sarga o en el caso de sargas alineadas, en el fondo de cada una de las secciones. Los cálculos están basados sobre el peso máximo de la columna de fluido sobre la parte externa de la tubería menos el peso de la columna de fluido sobre la parte interior de la tubería.

El diseño para presión de ruptura interna (reventón) es

probablemente el más importante donde las presiones en las cabezas de los pozos son relativamente altas. Donde no son altas, la tubería resistirá la fuerza de tensión y colapso y será adecuada para resistir las posibles fuerzas internas [reventones].

La sarta de tubería de revestimiento deberá siempre ser diseñada para resistir fallas por reventón, particularmente donde el rango del gradiente es de 0.13 a 0.22 Kg/cm² por metro de profundidad. La fuerza de torsión debe ser considerada solamente si un pozo va a ser perforado en agua o donde la capa superficial es incompetente, como en un pantano; dicha fuerza es considerada para el diseño solamente de las tuberías de revestimiento conductora y superficial. Las otras sargas son generalmente resistentes a las fuerzas de torsión, excepto donde la tierra tiene un salto horizontal y causa un esfuerzo cortante de la sarta de T.-R. [por ejemplo a lo largo de planos de falla].

La tubería de revestimiento para cualquier pozo debe ser cuidadosamente estudiada para asegurarse que está diseñada apropiadamente para los requerimientos del pozo. La mayoría de las tuberías de revestimiento fabricadas tienen programas computarizados o gráficas diseñadas que pueden ser utilizados para el diseño de las sargas de T.R. tomando en cuenta los esfuerzos del pozo, peso del lodo y factores de seguridad.

El comportamiento de las propiedades de la tubería de revestimiento define las propiedades físicas del acero a partir del cual fué fabricado. Los números usados para definir estos tipos representan la fuerza de ruptura mínima del acero en miles de libras por pulgada cuadrada. [H-40, J-55, K-55, C-75, N-80, C-95, P-110].

Grado de tubería de Revestimiento	Fuerza cedente (Kg/cm ²)		Fuerza de tensión
	Mínima	Máxima	Mínima
H-40	2817		4225
J-55	3873	5634	5282
K-55	3873	5634	6690
C-75	5282	6338	6690
N-80	5634	7746	7042
C-95	6690	7746	7394
P-110	7746	9859	8802

VII.3.- Acondicionamiento del pozo e introducción de la T.R.

Si un trabajo de cementación primaria va a ser realizado antes de que la tubería de revestimiento sea introducida, el pozo debe ser circulado para acondicionar y limpiar el pozo a un gasto de bombeo igual o mayor que el gasto de circulación de perfora-

ción. Las propiedades del lodo que tienden a causar trabajos de cementación pobre son: fuerza gel alta, viscosidad alta, densidad alta y excesivo contenido de sólidos. La viscosidad plástica y la fuerza de ruptura del lodo deben ser tan bajas como sea posible.

Es una buena práctica "romper" la circulación de cada 300 a 900 m. durante la introducción de la tubería de revestimiento para remover el enjarre del lodo que ha sido colectado al rededor de los collares, centradores y raspadores. Algunos raspadores tienden a acumular una cantidad anormal de enjarre de lodo cuando la tubería va dentro del pozo y puede causar que la circulación se interrumpa cuando la tubería alcanza el fondo.

La condición del pozo determina la velocidad a la cual la tubería de revestimiento puede ser introducida [bajo condiciones ideales la T.R. puede ser introducida a 305 m/hr en la costa del Golfo a 610 m/hr en un pozo de roca dura].

VII.4.- Procedimientos para asentamiento de T.R.

La T.R. debe ser asentada en el pozo para que en futuras condiciones de operación impuestas sobre la misma no causen una carga excesiva y ocasionen que la tubería falle. Daños al asentar

y cementar la tubería de revestimiento pueden resultar de presiones y temperaturas excesivas de formación y raramente por movimientos tectónicos. La presión y la temperatura de la formación puede ser generalmente calculada con bastante aproximación sobre la base de estimaciones hechas antes de que la tubería de revestimiento fuera colocada.

La temperatura se incrementa como resultado de la producción de fluidos del pozo los cuales reducirán el esfuerzo de tensión impuesto sobre la T.R. durante su asentamiento. Si la temperatura disminuye abajo de la cual prevalecía cuando la tubería de revestimiento fué colocada, esta se contraerá y la carga por tensión se incrementará. Los esfuerzos inducidos por movimientos tectónicos son raros y son difíciles de evaluar.

Las causas más comunes de que la tubería falle son desviaciones de pozo extremas, los cuales causan severos esfuerzos de flexión; corrosión, externa o interna o ambas; desgaste interno de la T.R.; y cambios en las condiciones del pozo que incrementan los esfuerzos sobre la tubería de revestimiento.

La tubería de revestimiento no falla generalmente hasta algún tiempo después que ha sido introducido cuando las presiones y condiciones del pozo han cambiado.

En el diseño de la tubería de revestimiento debe tomarse en cuenta no solamente las fuerzas de colapso, tensión y presión interna sino también esfuerzos de flexión, cargas recíprocas y efectos de cementación forzada.

VII.5.- Pérdida de T. R. abajo del pozo.

La tubería de revestimiento cementada impropriadamente es vulnerable a los choques y vibraciones causadas por perforación prolongada. Costos de reparación altos o la posible pérdida del pozo puede ser el resultado de un trabajo pobre de cementación.

Fallas en las juntas del fondo de sartas de tubería de revestimiento superficial e intermedia son comunes en algunas áreas. Así las fallas no son generalmente reconocidas hasta que el pozo es registrado. De esta forma puede encontrarse con que una o más juntas han sido desprendidas de la sarta y se han caído al fondo del pozo. La sección desprendida de la tubería de revestimiento puede estar recargada lateralmente (y puede ocasionar una zona de pérdida de circulación), restringiendo el paso de la sarta de perforación. Por lo que trabajos de reparación y acondicionamiento son requeridos para corregir la T. R. desprendida y sellar las formaciones expuestas.

Las fallas puede ser eliminadas cementando toda la sar-

ta de T.R. con dos tapones y por apriete firme de las juntas de los coples en el fondo de las sartas de la T.R. superficial e intermedia.

TABLA VII.1 TIPOS Y FUNCIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO

T I P O	TAMANO (O.O Pg)	PROF. COLOCACION (M)	F U N C I O N
Tubería Conductora	16 a 30	12 a 450	<ul style="list-style-type: none"> (1) Contener formaciones no consolidadas. (2) Confinar fluidos de circulación. (3) Ayudar a prevenir flujo de agua y <u>p</u>érdida de circulación.
Tubería Superficial	7 a 16	450 a 1370	<ul style="list-style-type: none"> (1) Ayudar a prevenir contaminación de <u>z</u>onas de agua dulce. (2) Conectar preventores y la cabeza del-pozo. (3) Soportar las sartas más profundas de-tuberías de revestimiento. (4) Confinar zonas poco profundas y <u>pre</u>venir pérdidas.
Tubería Intermedia	7 a 11 3/4	Varía con las - condiciones del pozo.	<ul style="list-style-type: none"> (1) Proteger a la tubería de producción - de corrosión. (2) Ayudar a resistir presiones de forma- ción altas. (3) Ayudar a prevenir desprendimiento y - alargamiento del pozo durante perfora- ciones profundas. (4) Ayudar a prevenir pérdida de circula- ción.

T I P O	TAMANO (Q.Q Pgl	PROF. COLOCACION (M)	F U N C I O N
Tuberla Corta (Liner)	5 a 7	A través de la zona productora	<ul style="list-style-type: none"> (1) Proteger el agujero. (2) Aislar fluidos y prevenir la migración de los mismos. (3) Proteger equipo Sub-superficial. (4) Permitir la producción selectiva de -- aceite y gas. (5) Funciona como la tuberla de revesti- - miento de producción. (6) Limita la necesidad de una sarta de tu berla de revestimiento completa.

CAPITULO VIII

METODO DE DISEÑO

La técnica a utilizar en una cementación primaria, debe seleccionarse en función de las características de las formaciones expuestas en el agujero, las propiedades de la lechada de cemento y el equipo de cementación disponible.

El diseño de la cementación debe permitir obtener:

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

Las técnicas comúnmente empleadas en los trabajos de cementación primaria son: cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo turbulento y cementación primaria convencional bajo un régimen de flujo laminar.

VIII.1.- Procedimiento de cálculo bajo un régimen de -- flujo turbulento.

Paso # 1.- Determinese el índice de comportamiento de -

flujo (n') y el índice de consistencia (K')*, con base en las lecturas obtenidas en el viscosímetro rotacional Fann VG-35 con las fórmulas (1) y (2).

Si se conoce los parámetros plásticos de Bingham, V_p y Y_p se utilizan las fórmulas (3) y (4).

$$n' = 3.32 \log \frac{L 600}{L 300} \dots\dots\dots (1)$$

$$K' = N^* \frac{L 300}{100 \times (511)^{n'}} \dots\dots\dots (2)$$

$$n' = 3.32 \log. \frac{2V_p + Y_p}{V_p + Y_p} \dots\dots\dots (3)$$

$$K' = N^* \frac{V_p + Y_p}{100 \times (511)^{n'}} \dots\dots\dots (4)$$

N^* es la constante del resorte del viscosímetro y que puede ser igual a 1, 2, 3.

Paso # 2.- Determinar la velocidad crítica del cemento en el espacio anular, para obtener flujo turbulento utilizando la fórmula (5).

$$V_c = \left[\frac{135.48 K' (96/de)^{n'}}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n'}} \dots\dots\dots (5)$$

* Véase apéndice A.

V_c = Velocidad del cemento, pies / segundo

ρ = Densidad del cemento en gr / c.c.

d_e = $D_a - D_t$ donde:

D_a = Diámetro del agujero en pulgadas.

D_t = Diámetro exterior de la tubería de revestimiento en pulgadas.

Paso # 3.- Determinese el gasto crítico utilizando la fórmula (6)

$$Q_c = 0.0581 \times V_c \times d_e$$

Q_c = gasto crítico, bls / min

Paso # 4.- Determinar el número de Reynolds [NRe] para cada uno de los fluidos utilizando la fórmula (7) y el factor de fricción utilizando la fórmula (8) para flujo turbulento [$NRe > 2100$] o la fórmula (9) para flujo laminar [$NRe < 2100$].

$$NRe = \frac{15.5 V_c^{(2-n)} \rho}{K^{(96/d_e)^n}} \dots\dots\dots (7)$$

V_c = pies / segundo

ρ = gr / c.c.

$$f = 0.00454 + 0.645[NRe]^{-0.7} \dots\dots\dots (8)$$

$$f = 16/NRe \dots \dots \dots [9]$$

Paso # 5.- Calcule las pérdidas de presión por fricción en el espacio anular utilizando la fórmula [9]; considerando que L para el cemento es la longitud a cementar; la longitud del colchón y para el lodo será igual a la profundidad de la cementación menos la longitud a cementar menos la longitud del colchón.

$$P_{fa} = \frac{0.099 L V_c^2 f \rho}{de}$$

ρ = densidad en gr/c.c.

L = Longitud en metros.

P_{fa} = Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular en lb / pg²

Paso # 6.- Calcular la presión hidrostática para los tres fluidos en el espacio anular, utilizando la fórmula [10].

$$P_{ha} = 1.4 \times L \times \rho \dots \dots \dots [10]$$

P_{ha} = Presión hidrostática anular (lb/pg²)

L = Longitud (m)

ρ = Densidad (gr/c.c.)

Paso # 7.- Calcule la presión de fondo de cementación [PFC] sumando la presión hidrostática de los tres fluidos [Pha] así como la pérdida de presión por fricción en el espacio anular [Pfa] del paso # 5.

$$PFC = Pha + Pfa$$

$$PFC = \text{lb/pg}^2$$

Paso # 8.- Calcular el gradiente de cementación [Gc] utilizando la fórmula (11)

$$G_c = \frac{PFC}{\text{prof. cementación (m)} \times 3.28} \dots\dots\dots [11]$$

$$G_c \text{ en } \frac{\text{lb/pg}^2}{\text{pu}}$$

Se compara el gradiente de cementación calculando con el gradiente de fractura [Gf]. Si $G_c < G_f$ la cementación puede llevarse a cabo y podemos continuar con el siguiente paso. Si $G_c > G_f$ la cementación no puede efectuarse mediante flujo turbulento porque se perdería la circulación, por lo tanto, hay dos alternativas;

a).- Modificar la lechada para mejorar sus propiedades reológicas, o

b).- Calcular para flujo laminar;

para cualquiera de ambas alternativas se repiten los cálculos a partir del paso # 1, para las nuevas condiciones.

Paso # 9.- Calcular el tiempo de contacto de la siguiente forma:

a].- Se calcula el volumen del colchón [Vol.1] de acuerdo con la longitud del colchón considerada, y que será igual a :

$$\text{Vol.1 [Bls]} = L \times 3,28 \times \text{Capacidad espacio anular [Bls/pies]}$$

b].- Calcular el volumen entre la cima teórica del cemento [l₁] y la profundidad del punto más somero de interés [l₂].

$$\text{Vol.2 [Bls]} = [l_2 - l_1] \times 3.28 \times \text{Capacidad espacio anular [Bls/pies]}$$

c].- Dividir la suma de los volúmenes calculados entre el Qc calculado en el paso # 3.

$$T_c = \frac{\text{Vol.1} + \text{Vol.2}}{Q_c} \dots\dots\dots [12]$$

Tc = tiempo de contacto, minutos.

Si Tc es mayor de 7.5 min podemos continuar los cálculos del paso 10. Si Tc es menor de 7.5 min deberá aumentarse la longitud del colchón si no hay peligro de un flujo o bien, aumentar la longitud de cementación si lo permite el gradiente de fractura,

Al efectuar alguna modificación se repiten los cálculos a partir del paso 5 para las nuevas condiciones.

Paso # 10.- Cálculo de presión superficial y la potencia hidráulica.

a].- Calcular la velocidad del lodo dentro de la tubería utilizando Q_c del paso # 3 y la fórmula [13]

$$V_t = \frac{Q_c}{60 \times \text{Cap. T. R. [bl/pie]}} \dots\dots\dots [13]$$

b].- Calcular el número de Reynolds y el factor de fricción para el lodo, utilizando las fórmulas [14], [15], [15'].

$$\text{NRe} = \frac{15.5 \rho V_t^{2-n}}{K^{1/n} [96/dt]^{n-1}} \dots\dots\dots [14]$$

dt = diámetro interior promedio de la tubería en pulgadas.

ρ en gr/c.c.

$$f = 0.00454 + 0.645 \text{NRe}^{-0.7} \dots\dots\dots [15]$$

[NRe > 2100]

$$f = 16/\text{NRe} \dots\dots\dots [15']$$

[NRe < 2100]

c].- Calcular la caída de presión dentro de la tubería de revestimiento con los datos del paso anterior.

y la ecuación [16].

$$P_{ft} = \frac{0.079L_t \rho V_t^2 f}{dt} \dots \dots \dots [16]$$

L_t = Longitud de la tubería de revestimiento en metros.

ρ en gr/c.c.

P_{ft} en lb/pg²

d[,- Obtener la diferencia entre la presión hidrostática en el interior de la tubería de revestimiento y la del espacio anular [P_{ha}]

$$PH = P_{ha} - 1.42 \times \rho_{lodo} \times L$$

PH en lb/pg²

e[,- Obtener la presión superficial [Pw] sumando la P_{fa} , la P_{ft} del paso # 10-c y la PH del paso # 10-d.

$$P_w = P_{fa} + P_{ft} + PH$$

P_w en lb/pg²

Paso # 11.- Calcular la potencia hidráulica necesaria utilizando Q_c calculada en el paso # 3 y P_w calculada en el paso # 10-e y la fórmula [17].

$$\text{HHP} = \frac{Q_c \times P_w}{40,8} \dots\dots\dots [17]$$

HHP en H.P.

Paso # 12, - Calcular la cantidad de cemento utilizando la capacidad del espacio anular [C.E.A.] en bbls/pie, la longitud a cementar [L,C.] en metros y el rendimiento [R] en litros/saco.

$$\text{Cantidad de cemento} = \frac{C.E.A. \times L.C.}{R}$$

Cantidad de cemento en sacos más 10% de exceso.

Paso # 13, - Calculo del tiempo de desplazamiento utilizando Q_c del paso # 3, la longitud de la tubería de revestimiento [L_r] en metros y la capacidad de la tubería de revestimiento en bbls/pies, Lc y C.E.A. del paso # 12 y la fórmula [18]

$$T_d = \frac{L_r \times CTR + L_c \times C.E.A.}{Q_c} \dots\dots\dots [18]$$

Td en minutos.

Ejemplo.-

Diseño de la cementación de una tubería de revestimiento corta (liner) de 5".

Datos del pozo:

Profundidad total 15744 pies (4800 m).

Diámetro del agujero 6 1/2".

Diámetro de la T. R. corta 5" de 18bs/pies (n-80).

Longitud a cementar 2742 pies (836 m).

Temperatura estática 264°F (129°C).

Gradiente de fractura 0.614 lb/Kg²/pie (0.142 $\frac{\text{kg/cm}^2}{\text{m}}$)

Datos: Cemento "G".

Aditivos, tipo y % : 35 % 55 A-1, 1.0 % CFR-2, 1% HR-12
y 0.4 % Hallad 22.

Densidad 1.89 gr/cc. V_p 26 c.p. γ_p 2 (lb/100 pies²).

L_{600} 57.26 L_{300} 29.735.

Datos: Lodo "L.S.E."

Densidad 1.18 gr/cc. V_p 27 cp. γ_p 5 (lb/100 pies²).

L_{600} 58.67 L_{300} 31.82

Datos: Bache espaciador "C-52"

$$L_{600} 72 \quad L_{300} 49$$

Densidad 1.18 gr/cc V_p 23 cp f_p 26 (lb/100 pies²)

Paso # 1.-

Cemento:

$$n' = 3.32 \log \frac{57.260}{29.735}$$

$$n' = 0.945$$

$$k' = 1^* \times \frac{29.735}{100 \times (511)^{0.945}}$$

$$k' = 0.00082$$

$$*N = 1$$

Lodo:

$$n' = 3.32 \log \frac{58.67}{31.82}$$

$$n' = 0.882$$

$$k' = 1 \times \frac{31.82}{100 \times (511)^{0.882}}$$

$$k' = 0.0013$$

Espaciador:

$$n' = 3.32 \log \frac{72}{49}$$

$$n' = 0.554$$

$$K' = 1 \times \frac{49}{100 \times (511)^{0.554}}$$

$$K' = 0.01547$$

Paso # 2.-

Cemento:

$$V_c = \left[\frac{135.48 \times 0.00082 \times (96/1.5)^{0.945}}{1.89} \right]^{\frac{1}{2-0.945}}$$

$$V_c = 2.83 \text{ pies/seg.} \quad 0.863 \text{ m/seg.}$$

Paso # 3.-

$$Q_c = 0.0581 \times 2.82 \times (6.5^2 - 5^2)$$

$$Q_c = 2.83 \frac{\text{bbs}}{\text{min.}}$$

*

Paso # 4.-

Cemento:

$$NRe = \frac{15.5 \times 2.82 \times (2-0.945) \times 1.89}{0.00082 \times \left(\frac{96}{1.5}\right)^{0.945}}$$

$$NRe = 2102$$

$$F = 0.00454 + 0.645 [2102]^{-0.70}$$

$$F = 0.0075$$

Lodo:

$$NRe = \frac{15.5 \times 2.82^{[2-0.882]} \times 1.18}{0.0013 \times \left(\frac{96}{1.5}\right)^{0.882}}$$

$$NRe = 1144$$

$$F = \frac{16}{1144}$$

$$F = 0.01398$$

Espaciador:

$$NRe = \frac{15.5 \times 2.82^{[2-0.554]} \times 1.18}{0.01547 \times \left(\frac{96}{1.5}\right)^{0.554}}$$

$$NRe = 528$$

$$F = \frac{16}{528}$$

$$F = 0.03030$$

Paso # 5.-

Cemento:

$$PFa = \frac{0.099 \times 836 \times 1.89 \times (2.83)^2 \times 0.0075}{1.5}$$

$$PFa = 6.26 \text{ lb/pg}^2 \quad 0.441 \text{ Kg/cm}^2$$

Lodo:

$$PFa = \frac{0.099 \times 3634 \times 1.18 \times (2.83)^2 \times 0.01398}{1.5}$$

$$PFa = 31.68 \text{ lb/pg}^2 \quad 2.23 \text{ Kg/cm}^2$$

Espaciador:

$$PFa = \frac{0.099 \times 330 \times 1.18 \times (2.83)^2 \times 0.03030}{1.5}$$

$$PFa = 6.23 \text{ lb/pg}^2 \quad 0.44 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned} \Sigma PFa &= 6.26 + 31.68 + 6.23 \\ &= 44.17 \text{ lb/pg}^2 \quad 3.11 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Paso # 6.-

Cemento:

$$\begin{aligned} Pha &= 1.4 \times 836 \times 1.89 \\ &= 2212 \text{ lb/pg}^2 \quad 155.77 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Lodo:

$$\begin{aligned} P_{ha} &= 1.4 \times 3634 \times 1.18 \\ &= 6003 \text{ lb/pg}^2 \quad (422.74 \text{ Kg/cm}^2). \end{aligned}$$

Espaciador:

$$\begin{aligned} P_{ha} &= 1.4 \times 330 \times 1.18 \\ &= 545.16 \text{ lb/pg}^2 \quad (38.39 \text{ Kg/cm}^2). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_{ha} &= 2212 + 6003 + 545.16 \\ &= 8760.16 \text{ lb/pg}^2 \quad (616.91 \text{ Kg/cm}^2) \end{aligned}$$

Pozo # 7.-

$$\begin{aligned} PFC &= 44.17 + 8760.16 \\ &= 8804.33 \text{ lb/pg}^2 \quad (620.02 \text{ Kg/cm}^2) \end{aligned}$$

Pozo # 8.-

$$G_c = \frac{8804.33}{4800 \times 3.28}$$

$$G_c = 0.559 \frac{\text{lb/Kg}^2}{\text{pie}} \quad (0.129 \text{ Kg/cm}^2)$$

$G_c < G_f$ la cementación puede llevarse a cabo bajo -
régimen de flujo turbulento.

Paso # 9.-

$$\begin{aligned} \text{Vol. 1} &= 330 \times 3.28 \times 0.0168 \\ &= 18.18 \text{ bbls.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vol. 2} &= (4800 - 3964) \times 3.28 \times 0.0168 \\ &= 46.06 \text{ bbls.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{18.18 + 46.06}{2.82} \\ &= 22.46 \text{ min.} \end{aligned}$$

$$T_c \quad 7.5 \text{ min.}$$

Paso # 10.-

Como existe una combinación de tuberías deberán calcularse las velocidades para los diferentes diámetros.

T.P. 5"

a)

$$Vt = \frac{2.82}{60 \times 0.0177}$$

$$= 2.65 \text{ pies/seg.}$$

b)

$$\text{NRe} = \frac{15.5 \times 1.18 \times (2.65)^{2-0.882}}{0.0013 \left(\frac{96}{276} \right)^{0.882}}$$

$$= 2689$$

$$F = 0.00454 + 0.645 (2689)^{-0.70}$$

$$F = 0.0071$$

c)

$$PFT = \frac{0.099 \times 836 \times 1.18 \times (2.65)^2 \times 0.0071}{4.276}$$

$$= 1.138 \text{ lb/pg}^2$$

T.P. 3 1/2"

a)

$$Vt = \frac{2.82}{60 \times 0.00742}$$

$$= 6.33 \text{ pies/seg.}$$

b)

$$NRe = \frac{19.5 \times 1.18' \times (6.33)^{2-0.882}}{0.882}$$

$$0.0013 \times \frac{95}{2764}$$

$$= 4845$$

$$F = 0.00454 + 0.645 (4845)^{-0.70}$$

$$= 0.0062$$

c)

$$PFT = \frac{0.099 \times 3964 \times 1.18 \times (6.33)^2 \times 0.0062}{2.764}$$

$$= 41.62 \text{ lb/pg}^2 \quad (2.93 \text{ Kg/cm}^2)$$

$$P_T = 1.138 + 41.620$$

$$= 42.75 \text{ lb/pg}^2.$$

d)

$$P_H = 8760.16 - 1.42 \times 1.18 \times 4800$$

$$= 717.28 \text{ lb/pg}^2 \quad (50.51 \text{ Kg/cm}^2)$$

$$e) P_w = 44.17 + 42.75 + 717.28$$

$$= 804.20 \text{ lb/pg}^2 \quad (56.63 \text{ Kg/cm}^2)$$

Paso # 11.-

$$H.H.P. = \frac{2.82' \times 804.20}{40.8}$$

$$= 55.58 \text{ H. P.}$$

Paso # 12.-

$$\text{Cant. Cemento} = \frac{521.52 \times 0.0168 \times 386}{51.66}$$

$$= 141.78 \text{ sacos} + 10\% \text{ exceso.}$$

$$= 155.95 = 156 \text{ sacos} = 7.8 \text{ tons.}$$

* sacos de 50 Kg.

Paso # 13.-

$$T_d = \frac{(836 \times 3.28 \times 0.0177) + (3964 \times 3.28 \times 0.00742) + (836 \times 3.28 \times 0.0168)}{2.82}$$

$$= 67.75 \text{ min.} = 1 \text{ hr. } 07 \text{ min.}$$

NOTA:-

*Las Unidades se manejaron en sistema métrico decimal -
y en sistema ingles debido a la facilidad de utilizarla en las -
ecuaciones antes descritas. Así como la versatilidad de los da--
tos de campo.*

CALCULO DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA, AGUA REQUERIDA Y RENDIMIENTO
POR SACO.

COMPOSICION	lb	gal.	Agua Requerida. (gal/saco).
Cemento "G"	110.0	4.20 ¹	5.85
35% SSA- 1	32.9	1.50 ²	1.50
75% CFR- 1*	-----	-----	-----
Agua	61.26	7.35	-----
	<u>204.16</u>	<u>13.05</u>	<u>7.35</u>

Cemento:

1) Volumen absoluto del cemento = $0.0382 \text{ gal/lb} \times 110 \text{ lb} = 4.20 \text{ gal}$

2) 55A01 (Fluoruro de Silice)

Volumen absoluto de S.S.A. - 1 = 0.0456 gal/lb

$32.9 \text{ lb} \times 0.0456 \text{ gal/lb} = 1.50 \text{ gal}$.

3) Agua (lbs).

$7.35 \text{ gal} \times 8.3356 \frac{\text{lbs}}{\text{gal}} = 61.26 \text{ lbs}$

4) Densidad de la lechada.

$\rho = \frac{204.16 \text{ lbs}}{13.05 \text{ gal}} = 15.64 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} = 1.88 \text{ gr/cm}^3$.

5) Rendimiento de la lechada

$Re = \frac{13.05 \text{ gal/saco}}{7.48 \text{ gal/pies}^3} = 1.74 \text{ pies/saco} = 49.30 \frac{\text{Hs}}{\text{saco}}$.

6) Relación Agua/cemento.

$R \text{ a/c} = \frac{61.26 \text{ lb/saco}}{110.00 \text{ lb/saco}} = 0.55$

Ejemplo. ¿Para 500 gr. de cemento que cantidad de agua se requiere?

$$500 \times 0.55 = 275 \text{ cm}^3. \text{ agua.}$$

Cuando el CFR-1, es usado en cantidades mayores que el 5% los cálculos puede omitidos sin un error significativo.

El SS4-1 es una arena sílica que ayuda al cemento a -- mantener su resistencia y evita que llegue a ser permeable. Es -- efectivo para evitar la retrogradación y disminución de la per-- meabilidad en cementos de densidad normal, cementos densifica-- dos y algunos cementos ligeros. Es compatible con todo tipo -- de cemento.

Su efecto en las propiedades de cemento es la de in-- crementar la resistencia final del mismo.

El CFR-1, es un dispersante y reductor de fricción^{p'} - se utiliza en las lechadas de cemento; la utilidad de este aditivo estriba en que produce buenas propiedades de flujo para lechadas pesadas sin causar separación de agua libre. También es un - excelente retardador.

Este producto se disuelve fácilmente y se puede agre--

directamente en el agua que se va a usar para mezcla.

Su efecto en las propiedades de cemento es el de reducir la viscosidad, el agua de mezcla e incrementar el tiempo de bombeabilidad del mismo

CAPITULO IX

EVALUACION DE LA CEMENTACION

IX.1.- Introducción.

La tecnología de la industria petrolera, en la terminación de pozos es tan avanzada que se requiere de una mayor atención en los trabajos de cementación en tuberías de revestimiento para obtener un mejor sello hidráulico entre y frente a los intervalos productores.

Existen un gran número de condiciones que se deben tomar en cuenta: en la perforación a grandes profundidades se tendrá alta presión y temperatura, la aplicación de grandes volúmenes en las estimulaciones y fracturas, la recuperación en todos sus tipos y sistema requieren un buen aislamiento.

Como resultado de estas necesidades se ha hecho necesario que la evaluación de la calidad de la cementación sea lo suficientemente precisa para evitar pérdidas en la producción y trabajos de reparación posteriores, lo que ha traído como consecuencia, el mejoramiento del diseño del equipo y la técnica de interpretación de la información que proporcionan los registros de cementación.

Durante muchos años la única herramienta con que se contaba para tener idea de que se hizo el cemento bombeado en el espacio anular, fué el registro de temperatura, herramienta que unicamente nos daba información sobre la cima del cemento, no así de la calidad, adherencia, etc., del mismo con la tubería y la formación.

Posteriormente se desarrollo el registro Sónico de Cementación [C.B.L.], el que nos proporciona no solamente la cima del cemento, sino el grado de adherencia entre la tubería y el cemento, sin embargo no se puede tener información sobre la adherencia entre el cemento y la formación.

Encaminados a lograr lo anterior se desarrollaron nuevas técnicas que dieron lugar al Registro de Densidad Variable [V.D.L.] y la combinación de los registros [CBL/VPL] proporciona una idea o resultados más claros de las condiciones del cemento con respecto a la tubería y la formación, por lo tanto nos permite una mejor evaluación de la calidad de la cementación.

IX.2.-Principio de Medida.

El registro Sónico de cementación se basa en la atenuación de la amplitud del primer arribo de una onda acústica, por

efecto de la adherencia entre la tubería de revestimiento y el cemento.

La amplitud de la primera onda que llega al receptor varía según las condiciones de cementación de la tubería; es máxima en presencia de tubería libre y es mínima cuando la tubería está perfectamente cementada, experimentos de laboratorio han demostrado que la atenuación, de una onda acústica que viaja a través de una tubería de revestimiento cementada, es proporcional al porcentaje de circunferencia con buena adherencia del cemento.

Simultáneamente se registra el tren de ondas completo o registro de Densidad Variable (VDL).

La figura # 1 nos presenta cualitativamente el tren completo de ondas que llega hasta el receptor ubicado a cinco pies del transmisor.

El grado de oscuridad de la onda registrada aumenta con la amplitud de la onda positiva; la parte negativa es registrada en tono claro.

La figura # 2 nos muestra la correspondencia entre el VDL y el tren de ondas. Se usa el receptor lejano a cinco pies para poder segregarse o discriminar mejor entre ondas de la tube-

ría y de la formación.

Generalmente la velocidad del sonido en la formación es menor que en la tubería, y al usar un mayor espaciamento se permite una mejor separación entre ambos trenes de ondas.

IX.3.- Espaciamento para los Registros CBL/VDL.

Una disminución de la atenuación a valores menores que el 70 - 80% de la máxima atenuación puede indicar problemas de cementación.

La respuesta de la herramienta depende del espaciamento transmisor - receptor.

La figura # 3 muestra una comparación de la respuesta de la amplitud del registro CBL (en milivoltios), con la atenuación sónica (en db/pie), para diferentes espaciamentos transmisor - receptor, en una TR de 7 en diferentes condiciones de cementación.

Una conclusión rápida que podemos observar es que un espaciamento corto (tres pies), entre transmisor y receptor, tiene mayor resolución que uno largo (seis pies).

Esto es especialmente evidente en la zona de media y alta atenuación, denominada Zona de Mayor Importancia, en la figura # 3, ya que la misma corresponde a condiciones críticas de cementación.

Es así que para un espaciamiento de seis pies, se obtiene en dicha zona una variación de solamente 5 mv., mientras que con uno de tres pies, dicha variación llega a 17 mv.. Observamos también en la figura # 3 que si tomamos un milivoltio (mv) como límite práctico para la lectura, será extremadamente difícil distinguir valores de atenuación mayores de 6.4 db/pie; al usar un espaciamiento de 6 pies. Otras de las desventajas de los espaciamientos largos es su pobre resolución vertical, que enmascara fallas de cementación de poco espesor.

De lo anterior vemos que se obtiene un mayor rango dinámico y linealidad con espaciamientos más pequeños.

Por lo tanto el espaciamiento ideal para el Registro CBL es de 3 pies; por el contrario para el Registro VDL, un espaciamiento corto no es deseable, ya que para obtener una imagen clara de la llegada de ondas compresionales a través de la formación, en secciones cementadas y con buena adherencia, la señal -

proveniente de la formación debe ser más fuerte que la porción de onda originada, en la tubería que llega al receptor al mismo tiempo que la señal de formación.

La solución es usar un espaciamiento largo, pues el sonido viaja más despacio a través de la tubería y de esta forma la señal que viene de la tubería habrá desaparecido antes de la llegada de la señal de formación; registrándose así esta última sin interferencias.

En formaciones duras, las diferencias entre los tiempos de llegada de las señales provenientes de la tubería y de la formación son pequeñas. Sin embargo la atenuación sónica en la formación es normalmente baja, del orden de 4 db/pie, comparada con la atenuación en la tubería cementada, por lo que aumentando el espaciamiento, se acentúa el contraste de las señales que llegan de la formación, respecto a las de la tubería.

Cuanto más largo sea el espaciamiento para el registro VDL, mejor se reconocerán las lledas acústicas de la formación. Un espaciamiento de 5 pies ha dado resultados excelentes en la práctica.

Porque el espaciamiento requerido por los registros --

CBL/VDL son diferentes, lo que nos permite registrarlos simultáneamente usando 3 pies para el CBL y 5 pies para el VDL, respectivamente. Esta combinación ha dado buenos resultados en la práctica.

DESCRIPCION DE LA HERRAMIENTA

La Figura No. 4 nos muestra un esquema básico de la sonda empleada para este registro combinado; la cual consta de un transmisor y dos receptores separados 3 pies (CBL) y 5 pies (VDL) respectivamente del transmisor.

Este registro lo podemos obtener mediante el equipo Sónico Stándar (BHC), se dispone de dos tipos de diámetros de sonda para este registro: Una de 3 3/8" y otra de 1 11/16". Se usan centradores especiales para mantener el equipo en el centro de la tubería sobre todo en pozos desviados.

De la Figura anterior podemos observar que hay cuatro - caminos posibles para el sonido que viaja entre el transmisor y - el receptor:

- a). - A lo largo de la tubería,
- b). - A lo largo del cemento detrás de la tubería,
- c) A través de la formación y
- d) - A través del lodo.

Como el sonido no se propaga bien a través del cemento - la señal recibida del mismo será muy débil o despreciable.

I N T E R P R E T A C I O N

La combinación del CBL/VDL permite hacer un estudio más - completo de las condiciones de cementación. La interpretación con - siste en el análisis de tren completo de ondas, representado en - el registro VDL; y en la medición de la amplitud de la primera on - da, registrada con el CBL. La información dada por los registros - es la siguiente:

- a) Registro Sónico de Cementación (3' CBL),
- b) Amplitud de la primera onda que llega a través de la - tubería (cuantitativa).

- c) Tiempo de tránsito de la primera onda detectada,
- d) Registro de densidad variable (5' VDL),
- e) Amplitud de la primera onda que llega a través de la tubería [cualitativa].
- f) Amplitud relativa de las ondas que llegan posteriormente incluyendo ondas compresionales de la formación, ondas Rayleigh y ondas que viajan a través del lodo.
- g) Tiempo de tránsito de la primera onda detectada y de aquellas que llegan posteriormente.

El parámetro básico para evaluar la calidad de cementación y la existencia de una aislación efectiva entre las zonas, es el índice de adherencia [Bond Index], el cual lo podemos definir como la relación entre la atenuación en la zona de interés y la misma en la zona bien cementada, ambas expresadas en dB/pie .

La atenuación se determina a partir del gráfico M-1 Figura No. 5 usando como parámetros la amplitud leída en el registro-CBL y el diámetro de la tubería de revestimiento.

Un Índice de Adherencia igual a Uno indica óptima adherencia, mientras que índices menores nos dan indicio de adherencias imperfectas. La ventaja obtenida mediante el uso del Índice-

de Adherencia consiste en que éste depende de la relación entre las atenuaciones y no de sus valores absolutos. Se reducen así los posibles errores provenientes de parámetros o condiciones ambientales no conocidas.

Si no se dispone de una sección bien cementada para la normalización del registro, se determina la máxima atenuación -- por medio del gráfico M-1 (Figura No. 5), tomando la resistencia a la compresión del cemento utilizado y el espesor de pared de la tubería.

La resistencia a la compresión puede estimarse usando el tiempo de fraguado y el tipo de cemento.

El valor mínimo del Índice de Adherencia necesario para obtener un buen sello hidráulico varía según las condiciones locales; en la práctica un valor de 0.8 ha dado buenos resultados.

Sin embargo, el valor del Índice de Adherencia no es suficiente para garantizar una cementación efectiva entre diferentes zonas.

La longitud del intervalo también debe ser considerada. La experiencia de campo ha demostrado que el intervalo mínimo con

adherencia necesaria para un sello hidráulico efectivo, depende del diámetro de la tubería de revestimiento.

El registro VDL es un importante complemento para la interpretación del registro CBL por lo siguiente:

En tubería libre, cuando haya máxima amplitud en el registro CBL, tendremos fuertes señales de tubería en el VDL.

Por el contrario si existe una buena adherencia del cemento tendremos baja amplitud, en el registro CBL, confirmada en el registro VDL por una señal de tubería débil y una fuerte señal de formación.

Cuando la tubería ha estado sucia o engrasada al cementar o más frecuentemente al aplicársele presión, se puede formar entre la tubería y el cemento un micro-anillo que por sus dimensiones no afecta el aislamiento, pero altera la lectura de amplitud.

El registro VDL ayuda en este caso, a diferenciar entre una cementación diferente o la existencia de un micro-anillo. Esta diferenciación es importante, ya que en el primer caso habrá que realizar una cementación forzada, que en el segundo no será necesaria.

Si el fluido del pozo contiene gas, el registro CBL indicará una baja amplitud que puede ser interpretada erróneamente como buena adherencia. Si esto ocurre, se confirmará con el registro VDL, donde todo el tren de ondas estará atenuado.

En el caso de formaciones muy compactas, cuyo tiempo de tránsito sea menor que el de la tubería el CBL, detectará dichos arribos dando lugar a una interpretación errónea. El registro VDL será útil en este caso para detectar esta anomalía.

En la Tabla IX. Tenemos una guía rápida que nos sirve de guía rápida para la interpretación del CBL/VDL.

Normalmente con el registro CBL/VDL se incluyen en combinación un registro de Rayos Gamma, un Localizador de Coples (CCL) y el tiempo de propagación (TT) que tarda la primera onda desde el transmisor al receptor de 3 pies. El Rayo Gamma se utiliza para correlacionar con los registros del pozo en agujero abierto y el localizador de Coples como referencia de profundidad para los disparos. El Tiempo TT es un control de la centralización de la sonda. La amplitud de el CBL disminuye notablemente cuando la sonda no está centrada en el pozo porque la energía que parte radialmente del transmisor no efectúa transferencia constructiva al llegar al receptor, debido a que no existe simetría radial. Si la sonda por cualquier razón se acerca a la

pared del pozo durante el registro, disminuye tanto la amplitud como el tiempo que tarda la primera onda en llevar al receptor. - Un buen control de calidad consiste en la verificación de disminuciones en la amplitud que no correlacionan con disminuciones en el tiempo de propagación.

En general cuando la señal está muy atenuada en zonas bien cementadas, no se puede distinguir la primera onda para calcular el tiempo (TT) y se detecta el siguiente pico positivo del tren de ondas (saltos de ciclos).

El espaciamiento óptimo requerido para registrar el CBL y el VDL son diferentes. El CBL requiere un espaciamiento corto y el VDL un espaciamiento largo, un sistema de dos receptores (3 pies para el CBL y 5 pies para el VDL), salvan esta limitación - las nuevas técnicas de los registros que han mejorado la producción simultánea de este registro combinado, en una sola película de regular calidad, con la cual facilita una interpretación confiable.

El sello hidráulico efectivo, está en función del Índice de Adherencia, del intervalo cementado y del diámetro de la Tubería de revestimiento.

Para un Índice de Adherencia de 0.8, el mínimo interva-

lo requerido de adherencia para un buen sello hidráulico, tiene que ser determinado, empíricamente, para diámetro de TR.

El registro VDL es un importante complemento para la interpretación del registro CBL por lo siguiente:

- 1) Cuando tenemos fuertes señales provenientes de la tubería, se confirma en el CBL por la tubería libre -- (máxima amplitud).
- 2) Un buen control de calidad se confirma con señales débiles de la tubería y señales fuertes de la formación, están presentes.
- 3) El VDL es de mucha ayuda para distinguir entre un micro-anillo, el sello hidráulico puede ser considerado en el CBL indicando una deficiente cementación.
- 4) Muchas de las señales de formación pueden ser distinguidas de las de la tubería, esto permite una interpretación más correcta del CBL.
- 5) Si el lodo contiene gas, el VDL puede indicarnos lecturas poco confiables (el tren completo de ondas estará atenuado) en vista de que el CBL nos dará una baja amplitud, que puede ser interpretada como buena adherencia.

6). El VDL cuando hay buena Adherencia nos refleja señales débiles en la tubería y señales fuertes de la -- formación, en cuanto al CBL nos dará lecturas de baja amplitud.

ESQUEMA DEL EQUIPO USADO EN EL REGISTRO DEL
PERFIL COMBINADO CBL-VDL

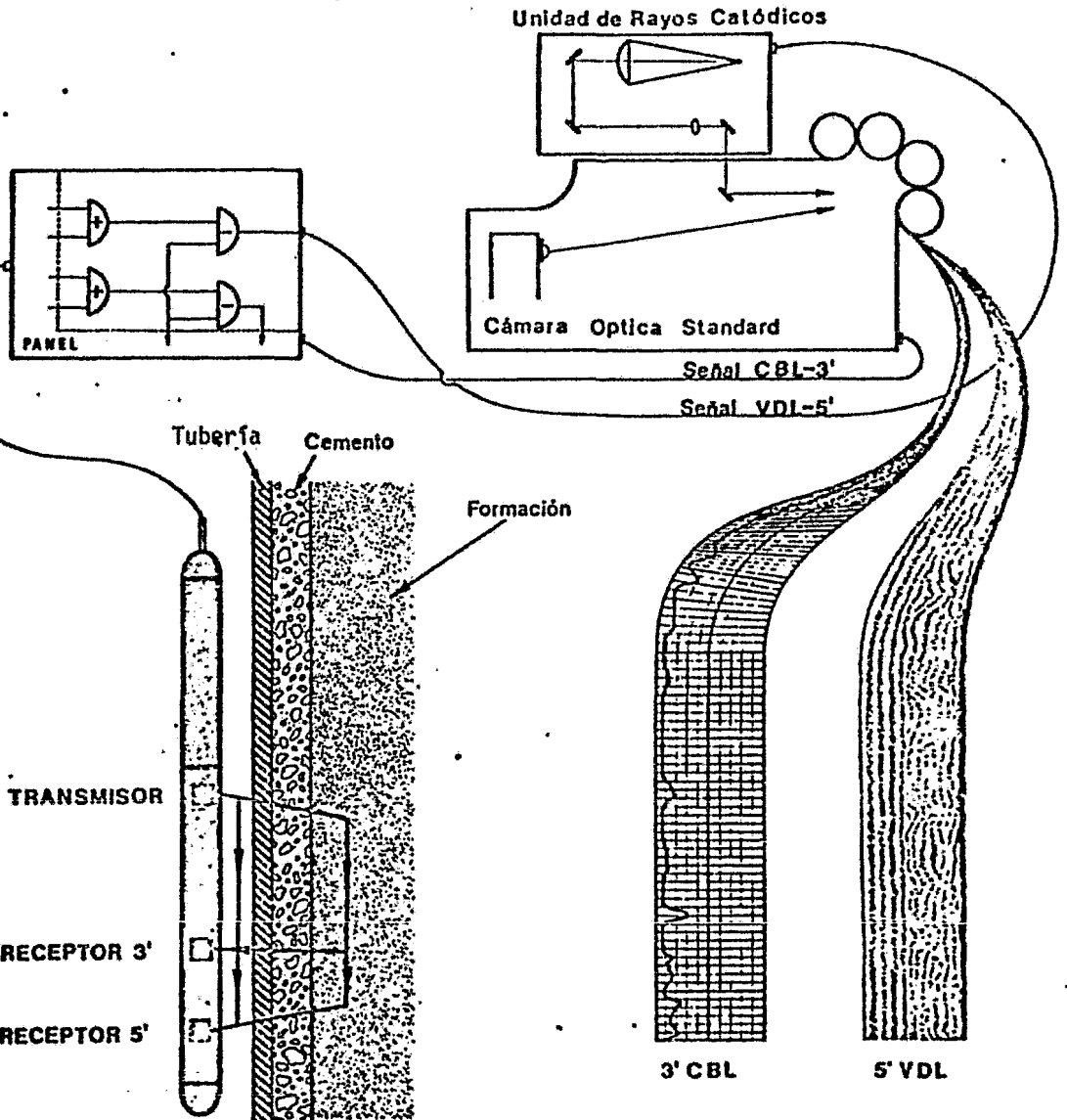


FIGURA No. 1

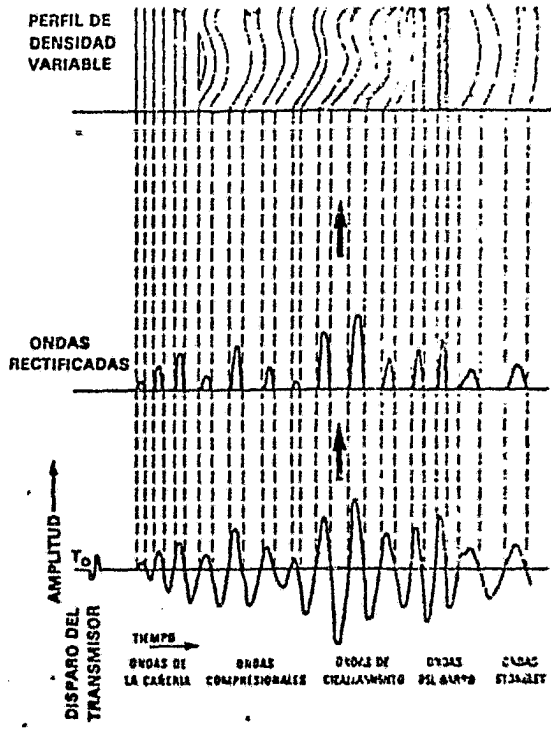


Figura No. 1

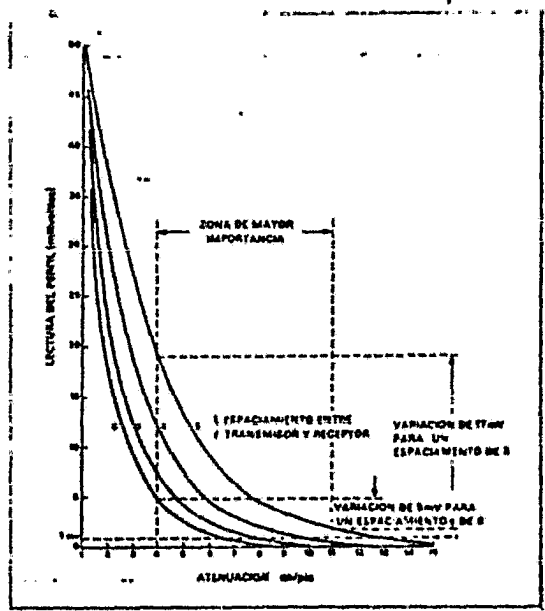
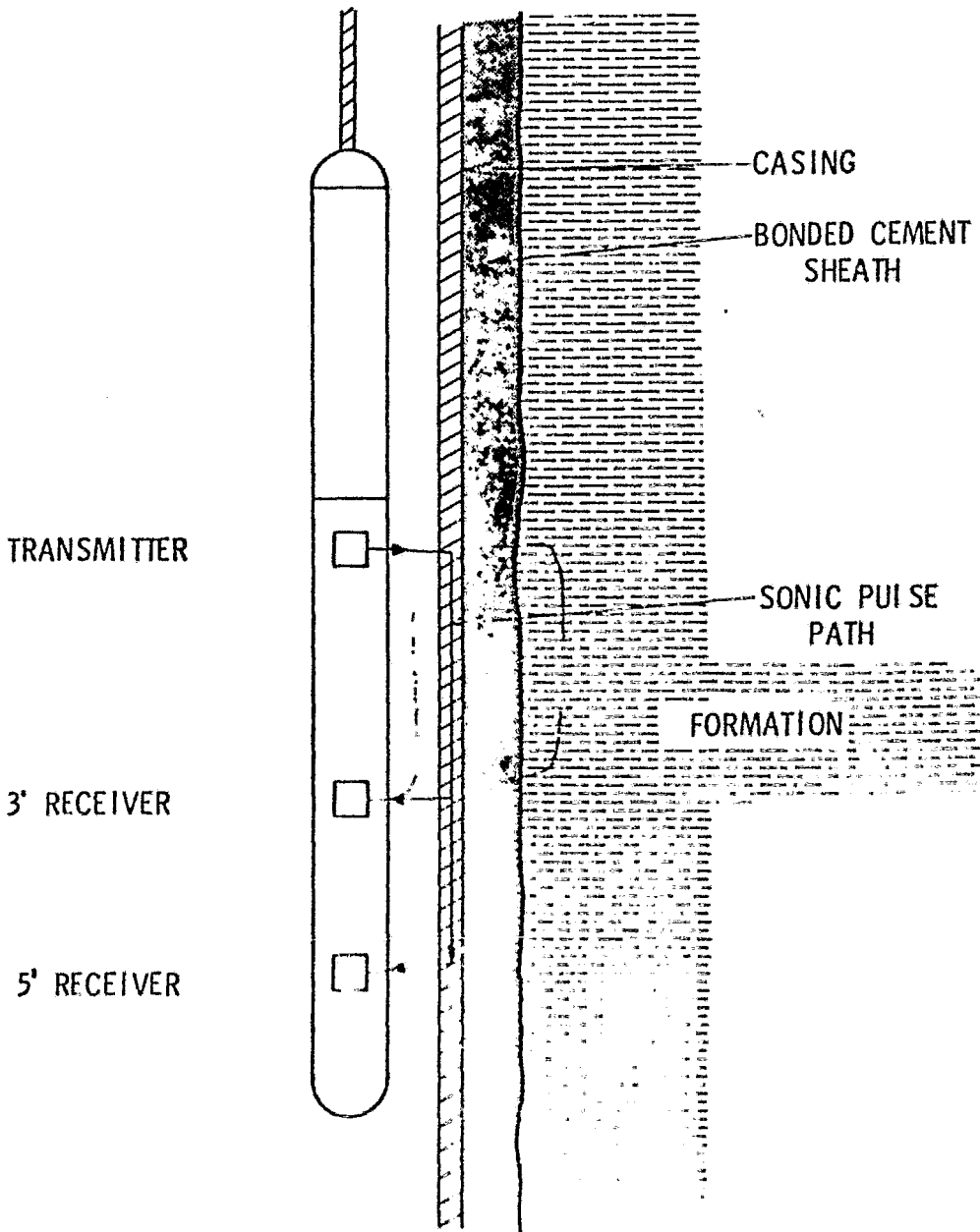


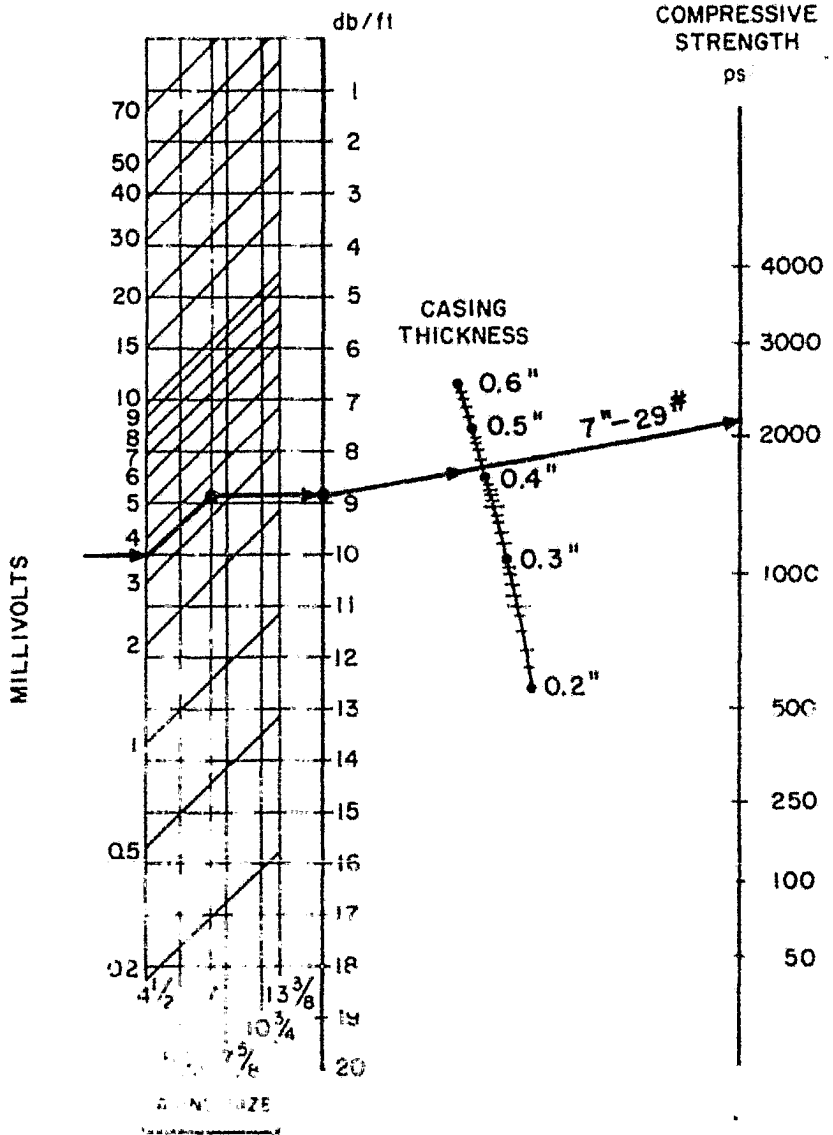
Fig. 2

Schematic of equipment used for recording CBL-VDL combination.



CBL INTERPRETATION CHART

CENTERED TOOL ONLY
3-FOOT SPACING



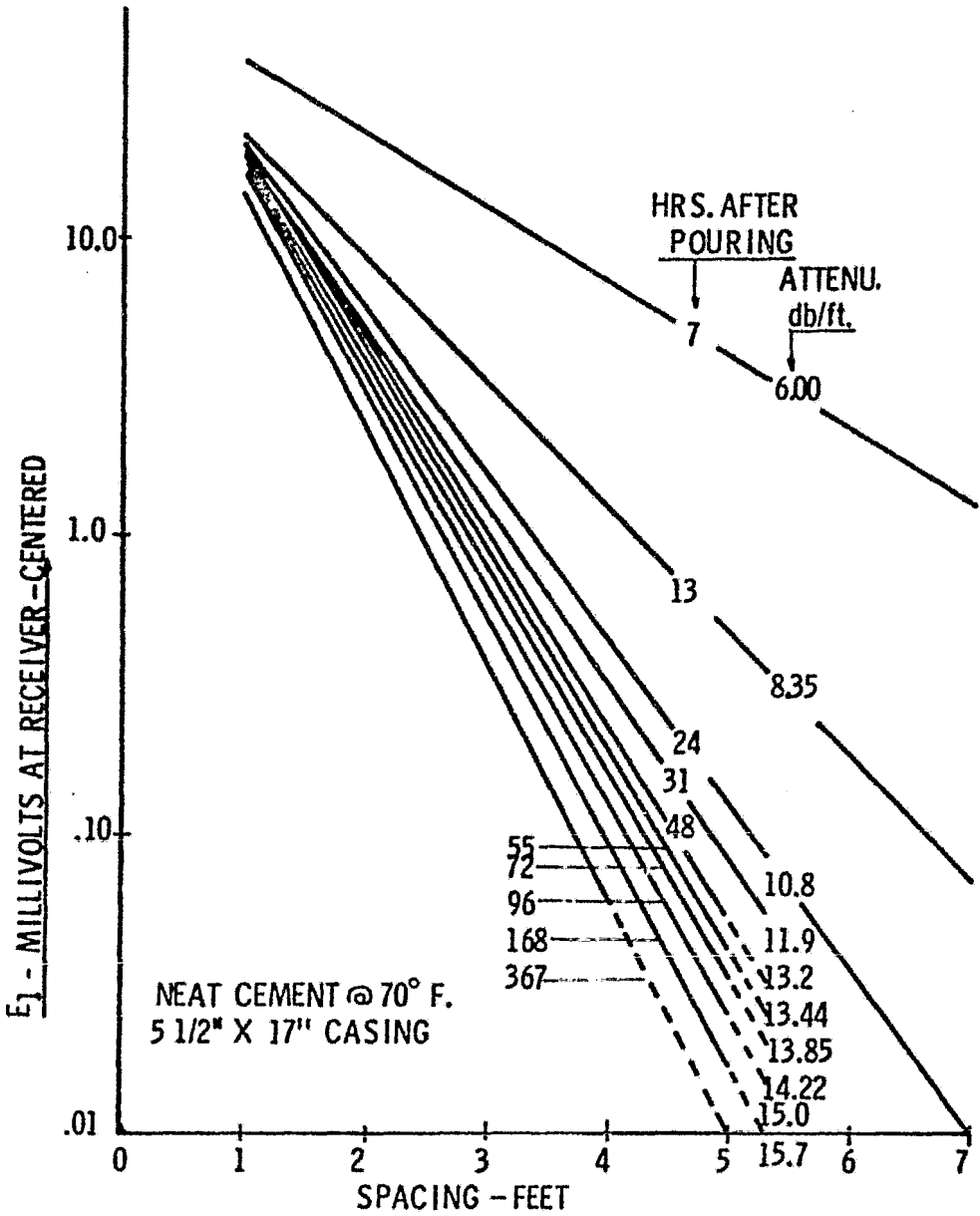


Fig.4- Signal (E_1) Amplitude vs Transmitter-Receiver Spacings for Typical. Neat Cement at Various Times After Pouring.

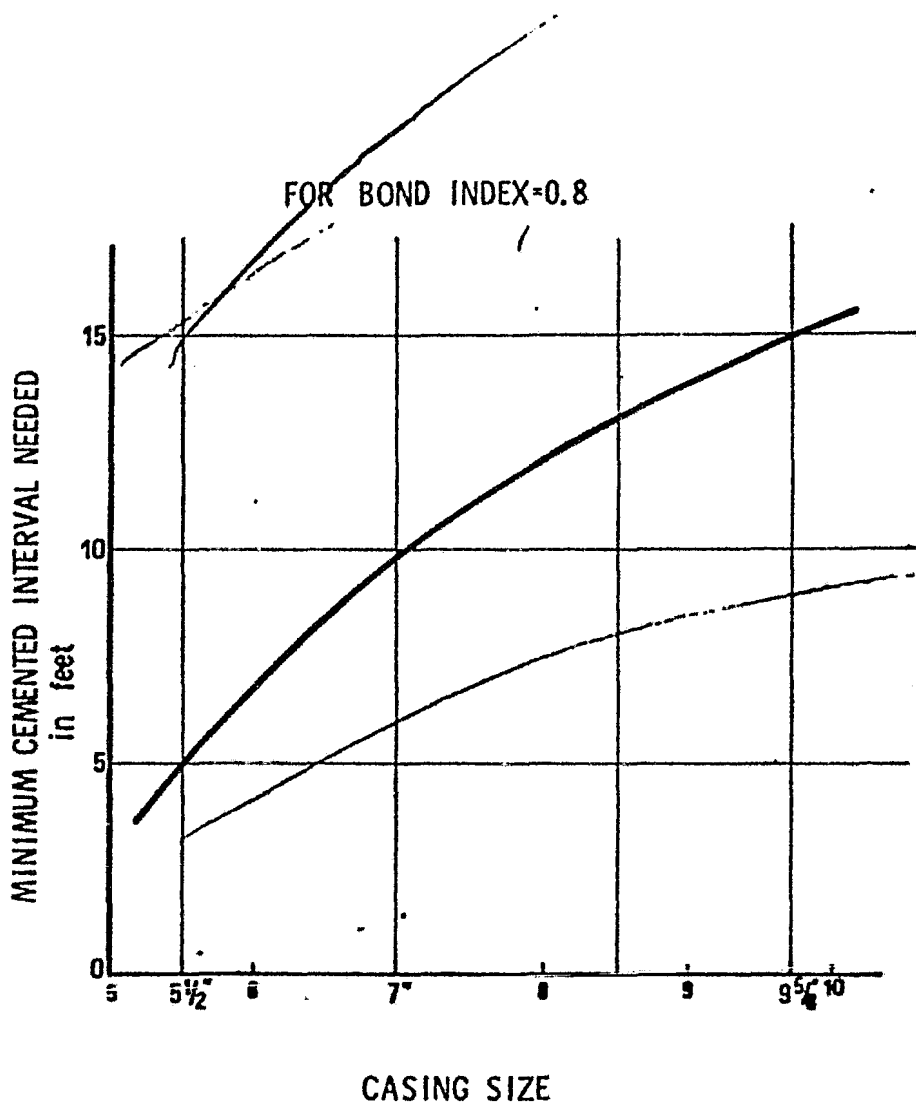
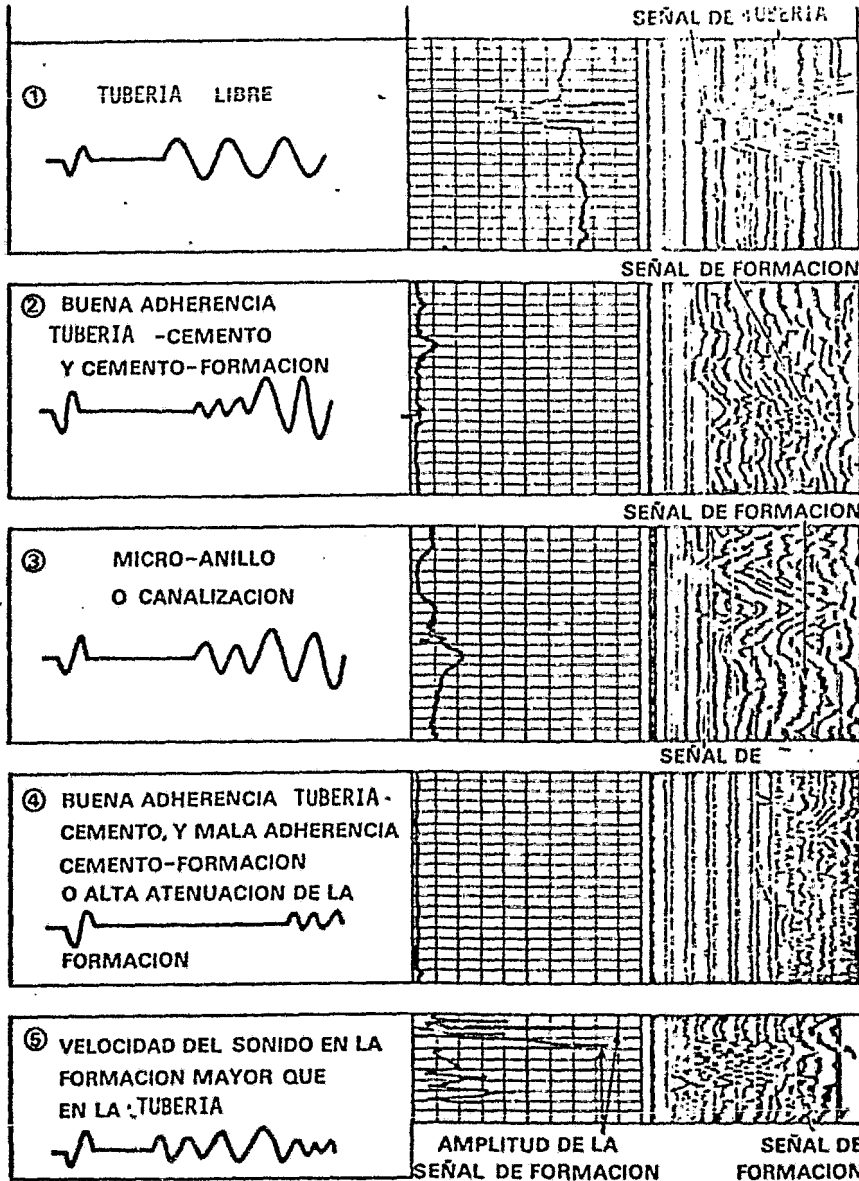


Fig. 4 Length of cemented interval required for zone isolation (for Bond Index= 0.8)

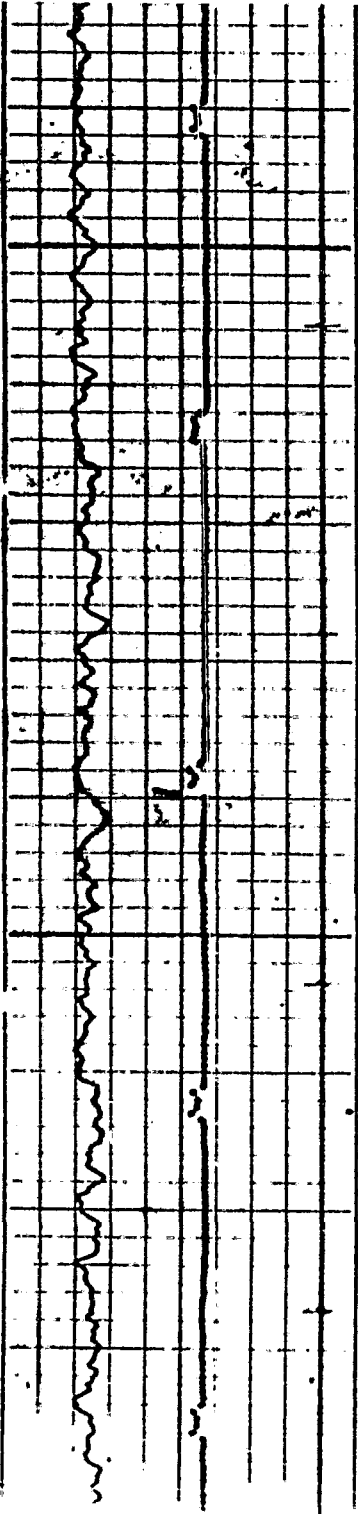
TABLA IX.1



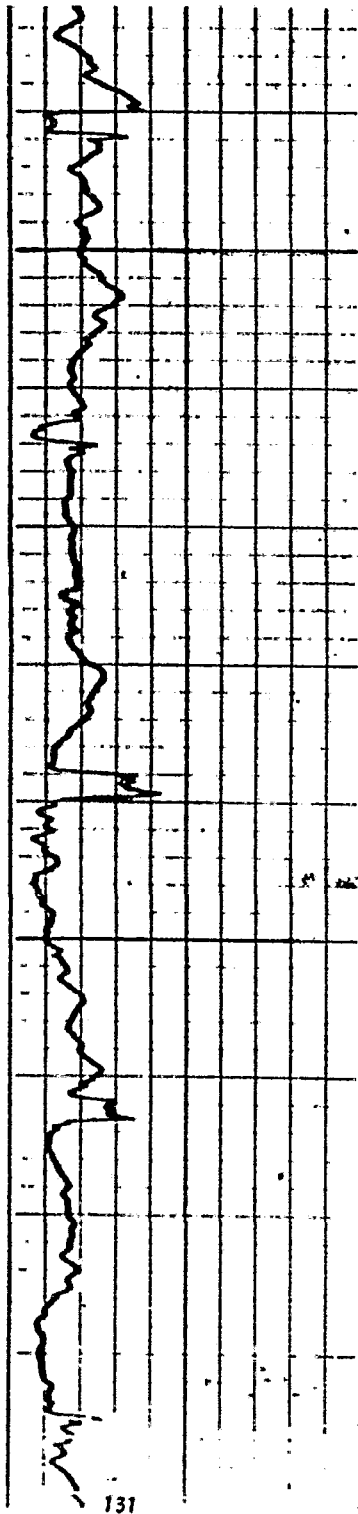
	Señales de Tuberia	Señales de Formación	Observación
TUBERIA LIBRE	Fuertes, t constante	Inexistentes	Esquema Chevron frente a cuplas <i>frontales</i>
TUBERIA LIBRE REPOSTADA	Fuertes, t constante	Débiles	Esquema Chevron t variable en arribos posteriores
BUENA ADHERENCIA A LA TUBERIA Y FORMACION	Débiles o inexistentes	Fuertes si la atenuación de la formación no es alta	t variable según la formación
BUENA ADHERENCIA A LA TUBERIA, MALA A LA FORMACION	Débiles o inexistentes	Débiles o inexistentes	Puede corresponder también a alta atenuación de la formación
MICROANILLO	Moderadas, t constante	Moderadas, t variable según la formación	Puede corresponder también a canalizaciones

EJEMPLOS DE REGISTRO.

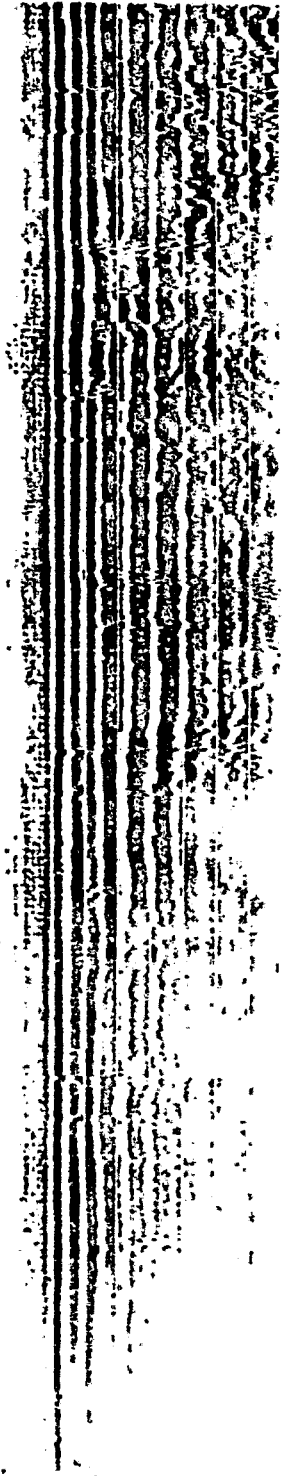
CBL/VD2



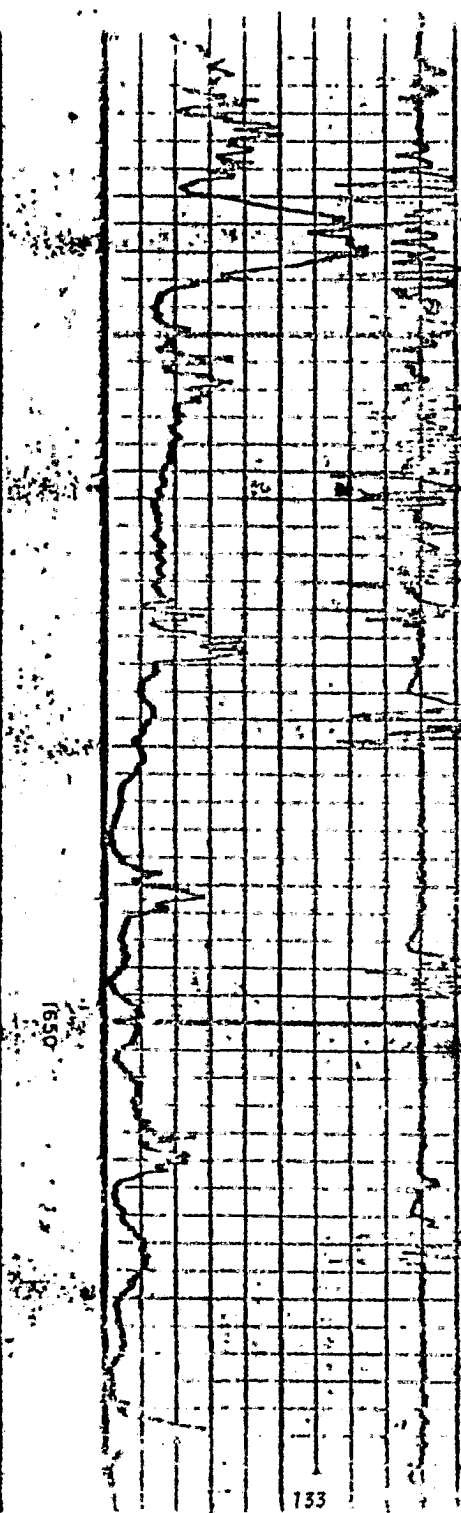
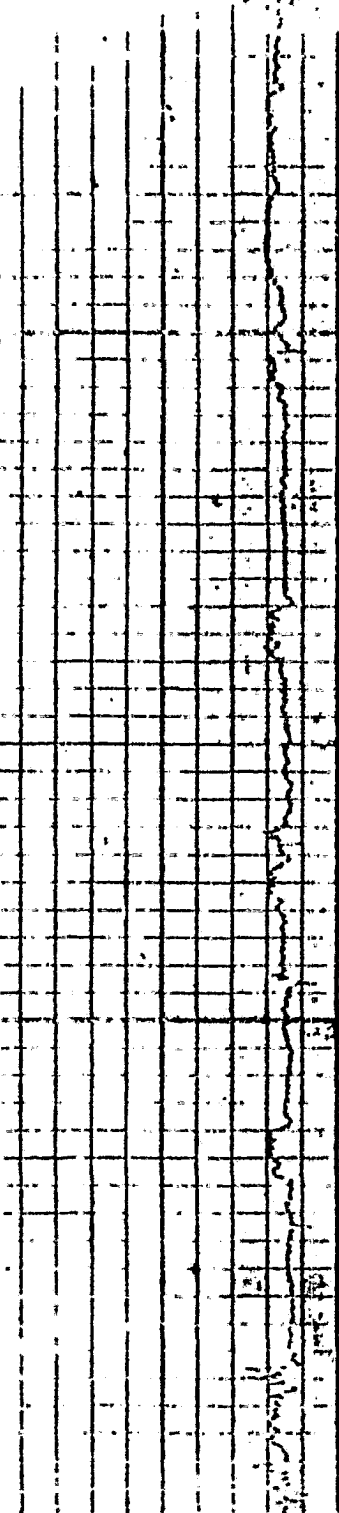
1200



131







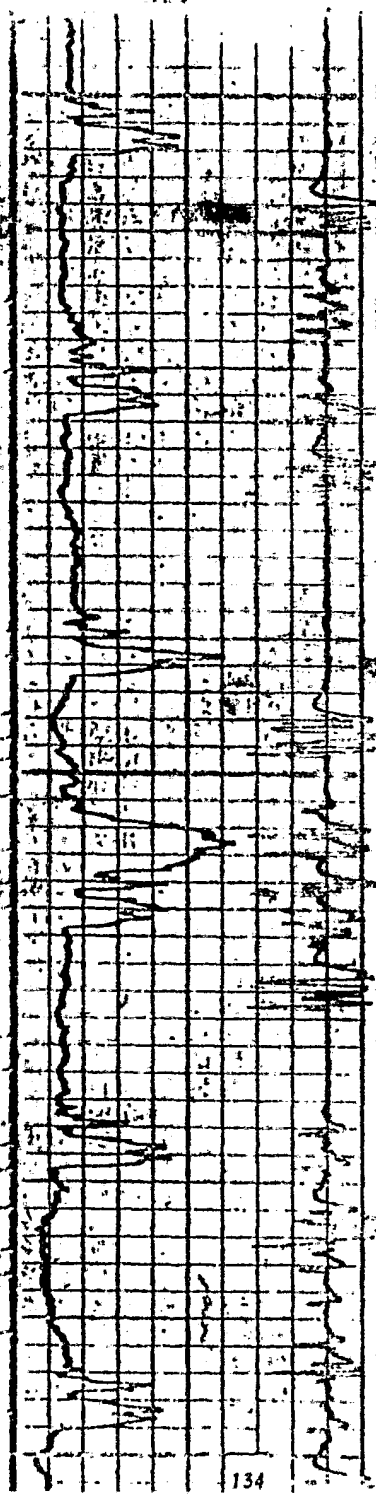
1650
133

1650
133

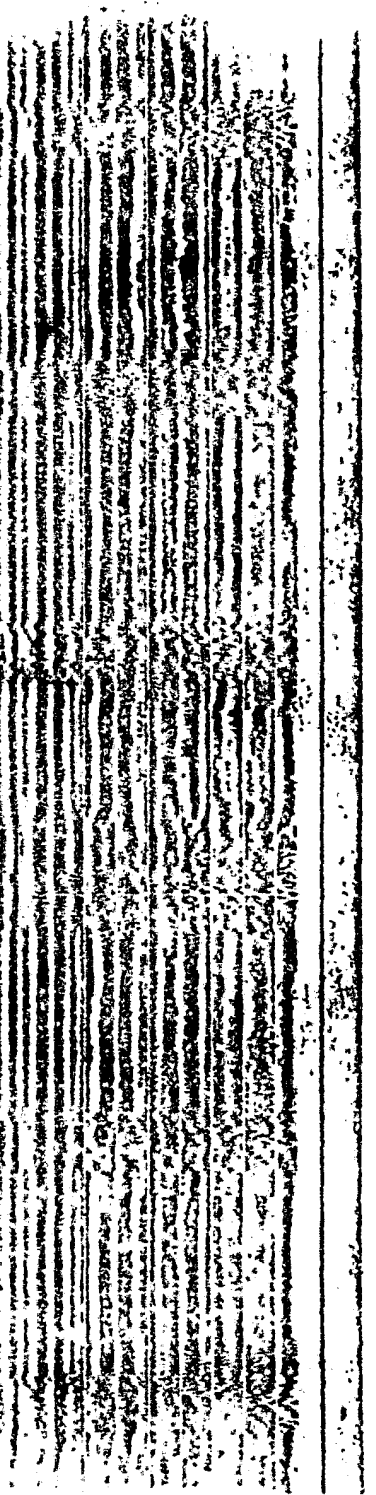


10551

16091

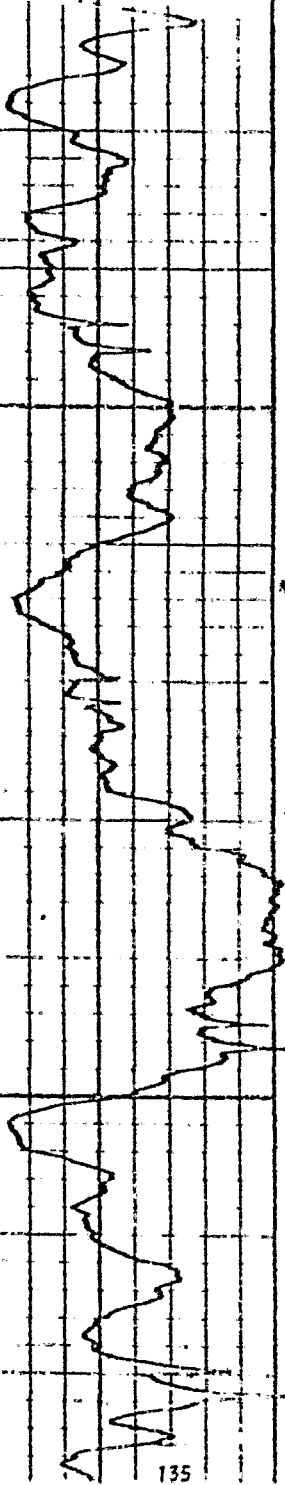


134

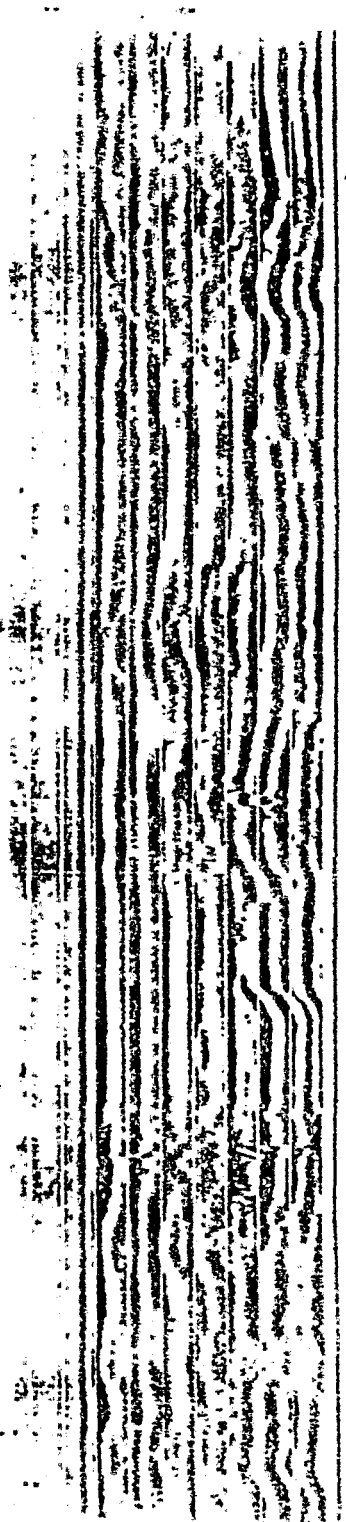


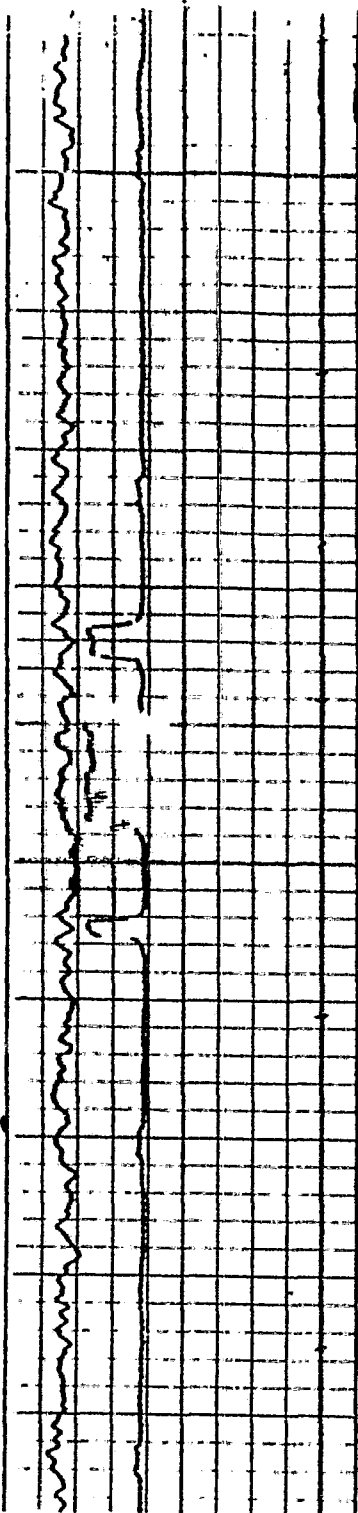


2250

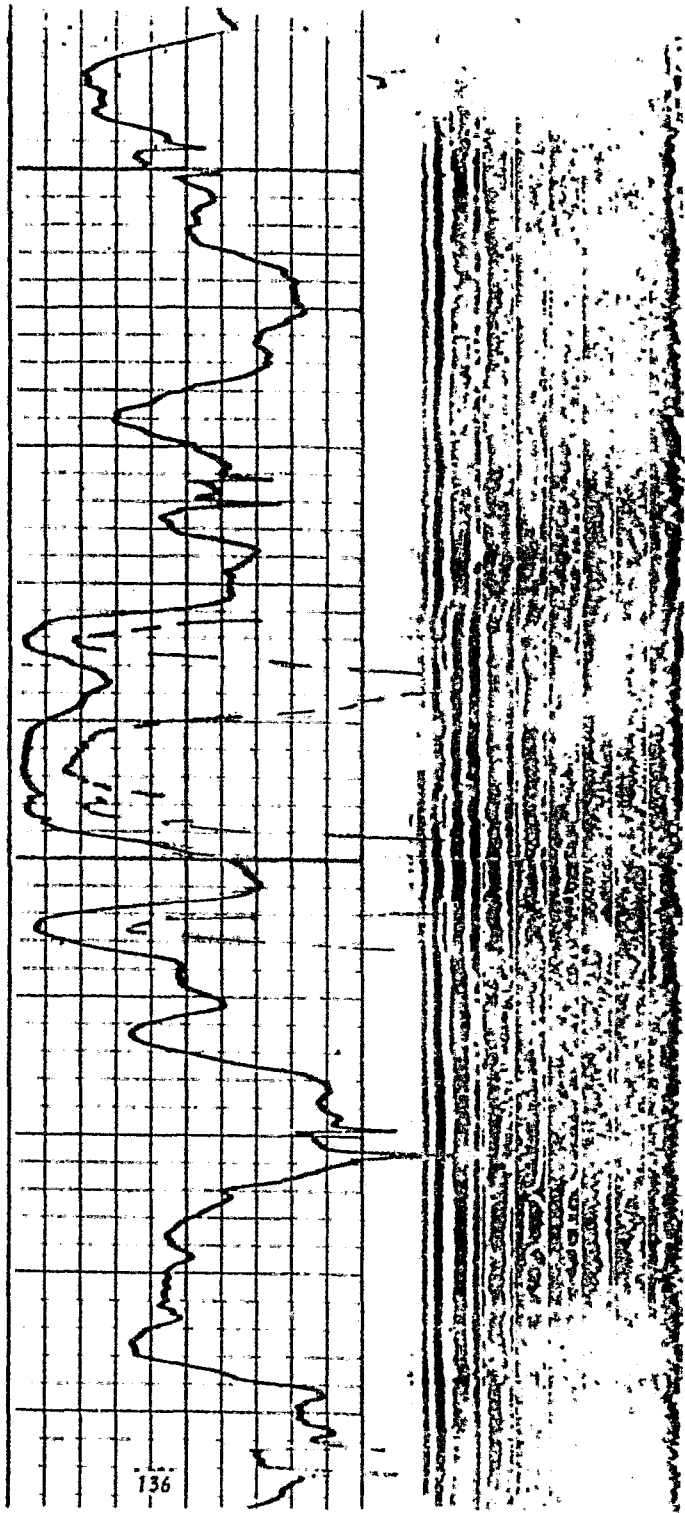


135





1100



CAPITULO X

CONCLUSIONES

Deberán correrse pruebas de laboratorio para obtener -- una lechada de cemento óptima de acuerdo a las condiciones: del -- pozo.

Se analizarán las características químicas de la formación para elegir el tipo de cemento adecuado.

La T.R. deberá de ser introducida a una velocidad adecuada, para evitar el efecto de "piston" que puede ocasionar perdida de circulación.

Deberá de acondicionarse el lodo de perforación antes de efectuar la cementación.

En base a las H.P. calculados se determinará el equipo necesario para efectuar la cementación.

Se tendrá especial cuidado con el cálculo del gradiente de fractura (Gf) el gradiente de cementación (Gc) para evitar perdidas de circulación.

El cálculo del volumen de cemento requerido para la ce-
mentación se hará en base a un registro de calibración para eva-
luar el estado real del pozo.

Se tratará de efectuar la cementación en régimen de --
flujo turbulento siempre y cuando las condiciones del pozo así--
lo permitan.

Es importante evaluar la cementación con el registro -
CBL-VDL para determinar la adherencia tubería - cemento, y ce-
men- to - formación.

La cementación en la terminación de un pozo es de una-
importancia muy significativa para evitar la migración del flul-
dos indeseables.

Deberán de evitarse hasta donde sea posible trabajos--
de re-cementación para no incrementar los ya de por si altos de-
perforación.

•

APENDICE A

Las propiedades de flujo de la lechada de cemento durante una cementación primaria son importantes debido a su efecto sobre:

La eficiencia con la cual el cemento se desplaza en la columna anular de lodo.

La caída de presión por fricción en el espacio anular que se suma a la presión hidrostática ejercida sobre la formación.

La potencia hidráulica requerida para colocar el cemento en un período de tiempo determinado.

Las lechadas de cemento son fluidos No Newtonianos, -- es decir, no existe una relación directa entre la pérdida de presión y la velocidad de corte a una presión y temperaturas constantes.

Los dos modelos matemáticos comúnmente utilizados en la descripción del comportamiento de los fluidos de perforación y de las lechadas de cemento son el modelo plástico de Bingham y el modelo de ley de potencia.

MODELO PLASTICO DE BINGHAM

Este es el modelo más ampliamente utilizado en la industria petrolera debido a su pronta identificación con los flujos de perforación. Este modelo asume que las lechadas de cemento y los fluidos de perforación tienen un comportamiento igual al de plástico de Bingham ideal y que todos los cálculos reológicos pueden ser hechos a partir de una relación lineal de flujo entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. Esta relación de flujo llamada "viscosidad aparente" (V_a) puede ser obtenida con un viscosímetro rotacional Fann VG. El instrumento Fann está diseñado en una gran variedad de modelos tanto para campo como para laboratorio y para operar a seis velocidades de rotación (600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM). Para este instrumento, el esfuerzo de corte (en lbs/pm^2) puede ser expresado de la siguiente forma:

$$S_s = \frac{\text{esfuerzo de corte} = \text{Lectura disco Fann} \times N^* \times 1.066}{100}$$

* N es el factor de extensión de rango del resorte de rotación Fann; generalmente su valor es igual a 1.0

(El valor de 1.066 puede variar, dependiendo de la combinación del rotor y la bobina.)

El esfuerzo de corte es una función de la velocidad -- de rotación y de las dimensiones del rotor y de la bobina. Para el instrumento estandar.

$$S_r = \text{velocidad de corte} = 1.703 \times \text{RPM.}$$

Los dos términos utilizados en la descripción de un -- fluido en un modelo plástico de Bingham son la viscosidad plástica (V_p) y el punto de cedencia (γ_p). La viscosidad plástica está expresada como la pendiente de la extrapolación de la línea recta; el punto de cedencia es la intercepción de ésta línea recta sobre el eje del esfuerzo de corte**. En medidor Fann VG está diseñado para calcular fácilmente la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

La ecuación básica que describe el modelo plástico de -- Bingham es:

$$S_s = \gamma_p + 2.088555 \times 10^{-5} (V_p) (S_r)$$

Donde:

$$S_s = \text{esfuerzo de corte en } \text{lb}_f/\text{pie}^2$$

$$V_p = \text{viscosidad plástica en centipoise.}$$

S_r = velocidad de corte en seg^{-1} .

** Ver gráfica esfuerzo de corte/velocidad de corte.

MODELO DE LEY DE POTENCIA

El modelo de Ley de Potencia fué popularizado por Metzner y Redd. Está basado sobre la suposición de que la lechada de cemento exhibe una proporcionalidad entre el logaritmo de la pérdida de presión y el logaritmo de la velocidad de flujo, con un esfuerzo inicial en la región de flujo laminar.

Las ecuaciones del modelo de Ley de Potencia son más complejas pero también más exactas que las del modelo plástico de Bingham.

Conociendo las características de la curva del esfuerzo cortante contra la velocidad de corte, es posible calcular, la viscosidad aparente de la lechada de cemento al esfuerzo de corte observado. Es esta viscosidad la que es utilizada en las ecuaciones hidráulicas, más bien, que la viscosidad plástica en el modelo plástico de Bingham.

El medidor Fann VG es utilizado para obtener datos para el modelo de Ley de Potencia. La ecuación para el modelo de

Ley de Potencia es:

$$S_s = K' (S_r)^{n'}$$

Donde:

K' = Índice de consistencia del fluido en $\text{lb}_f \cdot \text{seg}^{n'} / \text{pie}^2$.

n' = Índice de comportamiento de flujo, adimensional.

Mientras que el modelo plástico de Bingham utiliza solamente las lecturas 600 y 300 para describir la curva de esfuerzo de corte/velocidad de corte, el modelo de Ley de Potencia puede utilizar ambas lecturas ó, para mayor exactitud, las lecturas 600, 300, 200 y 100.

Los dos parámetros utilizados para definir el modelo de Ley de Potencia de un fluido son por lo general denotados por los símbolos K' y n' . Donde n' es la pendiente de la curva log (esfuerzo de corte) contra log (velocidad de corte) ó índice de comportamiento de flujo y K' es la intercepción de esta línea -- a la unidad de la velocidad de corte y esta referida como índice de consistencia. Si se conocen estos dos índices es posible calcular el número de Reynolds y la velocidad crítica a la cual la desviación del régimen de flujo laminar comienza.

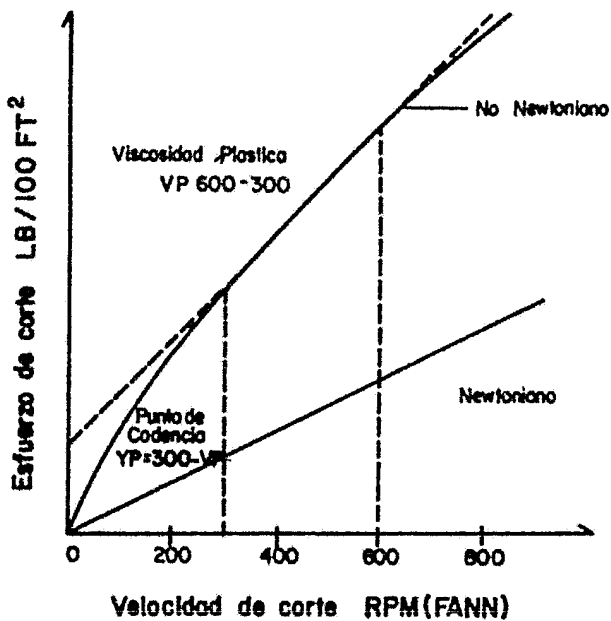
Para un fluido de la Ley de Potencia, la viscosidad -- aparente a cualquier velocidad de corte específico está dada por:

$$V_a = 47880 K' S_r^{n'-1}$$

Donde las unidades son c.p., lb-seg^{n'} y seg⁻¹ respectivamente.

Si $n' = 1$, entonces $V_a = 47880 k'$, una constante, y -- por lo tanto el fluido es Newtoniano.

Para un desplazamiento de lodo efectivo por la lechada de cemento es preferible que la lechada sea Newtoniana tanto como sea posible (n' cercana a 0).



Curvas de fluidos newtonianos y no newtonianos

TABLAS DE RECOMENDACIONES PARA
DIFERENTES OPERACIONES DE CE--
MENTACION.

TIEMPO DE ESPESAMIENTO CEMENTO TIPO V

Profundidad	Cédula	Aditivos	Tiempo Esp.	Filtrado	R E O L O G I A					
					600	300	VP	YP	n'	K'
T.R. 23 3/8", 10 3/4" 9 5/8", = 1.50 1220 - 1830	Cédula 4	Bentonita 12 % HR - 12 0.3 %	4:30	288	27	18	9	9	0.585	0.0050
3660 - 4270 TRs Cortas o Corridas	Cédula 29	SSA-1 RC-302	3:35	300	108	58	50	8	0.896	0.00232
4270 - 4880 TRs 5", 4 1/2" 7" 75/8" Cortas	Cédula 30	SSA-1 35%, CFR-2 0.6% hallab 22A 0.5% HR-L2	3:50	95	82	43	39	4	0.834	0.00271
4270 - 4880 TRs 4 1/2", 5" baja densidad = 1.55 gr/cc	Cédula 30	H T L D hallab 22 0.7% HR-12 1 % NFP 0.3%	3:10	56	42	22	20	2	0.932	0.00070
4880 - 5490 TRs 4 1/4" 5" Cortas	Cédula 31	SSA-1 35 % hallab 22 0.6% CFR-2 0.7% HR-12 1.3% TB-41 0.2%	3:00	88	82	46	36	10	0.834	0.00027
		SSA-1 35 % RC-302 2 %	3:00	330	94	52	42	10	0.854	0.00275

TIEMPO DE ESPESAMIENTO PARA TAPONES

Rango de Profundidad	Cemento Tipo	Aditivos	Tiempo Esp.	Filtrado	R E O L O G I A					
					600	300	VP	YP	n'	K'
3660 - 4270 T X C	G. Cédula No. 19	HR - 12 0.5%	3:00	-	-	-	-	-	-	-
	Cédula 19	SSA-1 35% HR-12 0.8%	4:00(+)	-	-	-	-	-	-	-
3660 - 4270 Squezze	Cédula 19	HR - 12 0.8% CFR-2=0.5% hallab 9 0.5%	4:00	100	-	-	-	-	-	-
Para recementar B.L.	Cédula 19	SSA-35% RC-302 0.75% agregar CFR-2 6 hallab 9 como anterior diseño	3:12	-	-	-	-	-	-	-
4270 - 4880 T X C (abandono)	Cédula 20	SSA-35%, HR-12 0.1% para 4300 HR-12 0.8%	3:30	-	-	-	-	-	-	-
4270 - 4880 T X C c/inyección	Cédula 20	SSA-35%, HR-12 0.1 % CFR-2 0.5%	3:50	-	-	-	-	-	-	-
4270 - 4880 Squezze	Cédula 20	SSA-1 35% CFR-2 = 0.5% hallab 22=0.5%, 6 (ha-- llab 9=1%) HR-12 1%	4:00	65	-	-	-	-	-	-
4880 - 5490 T X C	Cédula 21	SSA-1 35% KCL=5% RC-302 2%	3:30	-	113	60	53	7	0.913	0.00215
		SSA-135% RC-302 2%	3:30	-	-	-	-	-	-	-

TIEMPO DE ESPESAMIENTO LECHADAS ESPECIALES

Rango de profundidad	Cemento Tipo	A d i t i v o s	Tiempo Esp.	Filtrado	R E O L O G I A					
					600	300	VP	YP	n'	K'
Alta Densidad 4270 - 4880 TR 4 1/2"	Cédula 30 Cemento G	SSA-35% CFR-2 1% Hy-dens-3 28.2% (20#15) hallab 22 0.3% HR-12 1%	3:45 NOTAS:	25 Agua = 25.5 Hrs/saco	106	67	49	8	0.895	0.0023
					Rend.	49.83 Hrs/saco,		= 2.05	q/cc	
Alta Densidad Arena 4270 - 4880	Cédula 30 Cemento G	SSA-1 35% CFR-2 1% Arena 20-40 22.7% hallab 22 0.3%, HR-12 1% agua, 25.47 Hrs/saco Reud.	4:00	40 5L.631 Hrs/saco	126	68	58	10	0.889	0.0028
								= 2.02	gr/c.c.	
Baja Densidad 3660 - 4270 TR Corta 7", 7 1/2", 5"	Cédula 29 Cemento G	H T L D hallab 22 0.8% NFP 0.3% HR-12 0.8%	3:05	291	68	35	33	2	0.957	0.00095
Baja Densidad 4270 - 4880 = 1.55 qr/cc	Cédula 30 Cemento G	H T L D hallab 24 1% HR-12 1% NFP 0.3%	5:00	146	18	10	8	2	0.848	0.00054
Baja Densidad 4226 - 4500 = 1.55 qr/cc	Cemento G Cédula 29	A-2, D-5 5%, D-19 0.7% D-31 1%, D-6=0.3%, R-11 0.7%	3:45	85	23	12	11	1	0.937	0.0003

TIEMPO DE ESPEZAMIENTO PARA TAPONES POR CIRCULACION

Rango de Profundidad	Cemento Tipo	A d i t i v o s	Tiempo Esp.	Filtrado	R E O L O G I A					
					600	300	VP	YP	n'	K'
310 - 610 Squeeze TR corrida y T X C	G. Cédula 2/13	C2C/2 1%	2:55	303	120	80	40	8	0.585	0.0222
610 - 1220 T.R. Corrida 6 complemento Squeeze y T X C	G. Cédula 3 y 14	Cemento solo	3:00	380	134	86	48	38	0.640	0.01694
		con CFR-2 0.2%	3:05	406	105	70	35	35	0.585	0.01943
		con C2C/2 1%	2:10	406	54	70	-	-	-	-
50 - 310 T.R. Corrida Squeeze y T X C	Cédula 1 G. Cédula 2	CaCl ₂ 2%	2:40	-	96	65	31	34	0.562	0.0208
0 - 310 T.R. Corrida Squeeze y T X C	Cemento G. Cédula No.1	CaC/2 3% CaC/2 4%	2:00	-	-	-	-	-	-	-
1220 - 1830 Squeeze y T X C	Cemento G. Cédula 15	CFR - 2 0.2% 0.15%	3:00	-	-	-	-	-	-	-
1830 - 2440 T.R. Corrida y Com plemento	Cemento G Cédula 16	HR - 12 0.2% Arena 33% CFR-2 0.2%	3:00	-	-	-	-	-	-	-
		HR - 12 0.2%	3:30	375	84	48	36	12	0.807	0.00334
2440 - 3050 1o. T X C 2o. Squeeze 3o. TR 9 5/8" y 10 3/4	Cemento G. Cédula 17	HR-12 0.3% T X C Arena 20 - 40 33.7%	3:00	-	-	-	-	-	-	-
		CFR - 2 0.5%, HR-12 0.3%	3:30	-	-	-	-	-	-	-
		HR - 12 0.3%	3:30	-	-	-	-	-	-	-
3050 - 3650 T X C con pérdida	Cemento G. Cédula 18	Arena 10% CFR 0.5% HR - 12 0.4%	4:00	-	-	-	-	-	-	-
Squeeze	Cédula 28	CFR - 2 0.5% HR-12 0.4%	4:00	-	-	-	-	-	-	-

TIEMPO DE ESPESAMIENTO PARA TR. CORTAS DE 5", 7" y 4 1/2"

Rango de profundidad	Cemento Tipo	A d i t i v o s	Tiempo Esp.	Filtrado	R E O L O G I A					
					600	300	VP	YP	n'	K'
4880 - 5490	G Ced. 3l	SSA-1 35%, RC-301 2%	4:00	322	59	32	28	3	0.928	0.0010
		SSA-1 35%, CFR-2 0.6% HR-12 2.2 % hallab 22 0.5%	3:00	50	77	40	37	3	0.944	0.00288
		SSA-1 35%, hallab 9 0.5 % RC-302 2.22%	4:00	278	148	80	68	12	0.887	0.0032
4290 - 4880	G, Ced. 30	SSA-1 35%, CFR-2 0.4% hallab 22 0.4%, HR-12 1%	4:25	79	54	28	26	2	0.862	0.0082
	"G" Ced. 30	SSA-1 35%, CFR-2 0.4% CFR-2 0.4%, hallab 22 0.4% HR-12 0.8%	4:25	79	54	28	26	2	0.862	0.0082
		Con hallab 24 0.5% NFP-1 0.3%	3:40	17	62	34	28	6	0.862	0.00164
		SSA-35%, RC-301 1.5%	4:10	350	60	31	29	2	0.932	0.0009
3660 - 4270	4 1/2" 5" "G" Ced. 29 7" y 5/8"	SSA-1 35% hallab 9 0.5% CFR-2 0.5% HR-12 0.5%	4:20	165	102	52	49	4	0.944	0.0016
		SSA-1 35% CFR-2 0.5% HR-12 0.6 %	3:45	300	60	32	28	4	0.896	0.00128
		SSA-1 35% RC-302 0.5% temp. 220°C	3:45	298	60	32	28	4	0.876	0.00128
		CFR-2 0.3%, HR-12 0.5% hallab 9 0.4% SSA-1 35%	4:00	25	80	42	38	4	0.929	0.00123
		CFR-2 0.5% RC-302 0.4% SSA-1 35%	4:00	269	78	41	36	6	0.893	0.0017
3050 - 3660	7 5/8" G" Ced. 28	temp 110°C SSA-1 35%, CFR-2 0.4% hallab 9 0.4%, HR-12 0.5%	4:32	30	70	38	32	6	0.882	0.00167
		Temp 110°C=CFR-2 0.3% hallab 9 0.4%, HR-12 0.5%	4:00	25	84	44	40	4	0.932	0.00140

BIBLIOGRAFIA

- *Cementing*; Dwight K. Smith. Monografía SPE.
- *Cementing Handbook*; George O. Suman, Jr. y Richard C. Ellis, -
World oil, EPC, 1977.
- *Diseño de cementaciones primarias*; IMP.
- *Production Operation* (vol. 2); Thomas O. Allen y Alan P. Roberts.
- *Manual de servicios y aditivos para cementación*; Compañía Halli-
burton.
- *Manual de servicios y aditivos para cementación*; Compañía Do- -
weel.
- *Interpretación de registros geofísicos* (vol. 2); Schlumberger.
- *Interpretación de registros geofísicos*; Ing. Orlando Gómez Ri-
vero.