

19  
22j



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LAS TECNICAS  
DE CEMENTACIONES PRIMARIAS

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL  
T I T U L O D E  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A N  
Ignacio Mora Espinosa  
Pedro Aranda Carbajal

MEXICO

1982.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

I N D I C E .

	Pág.
I N T R O D U C C I O N .....	1
I.- COMO AFECTAN LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS .....	3
EN LA VELOCIDAD DE PERFORACION	
II.- DESCRIPCION DE LAS ARCILLAS .....	21
III.- PROBLEMAS DE CORROSION .....	27
IV.- DIFICULTADES QUE SE PRESENTAN EN LAS .....	32
CEMENTACIONES	
a) Características de las formaciones .....	32
b) Propiedades de la lechada .....	34
V.- EQUIPO DE CEMENTACION Y ACONDICIONAMIENTO .....	40
DEL POZO	
a) Equipo subsuperficial .....	40
b) Equipo superficial .....	40
VI.- METODOS DE DISEÑO .....	70
a) Técnica de cementación primaria bajo .....	70
un régimen de flujo turbulento	
b) Técnica de cementación primaria bajo .....	83
régimen de flujo laminar	
c) Técnica de cementación primaria por .....	85
etapas	
d) Movimientos combinados que mejoran .....	86
la cementación	
C O N C L U S I O N E S .....	91
B I B L I O G R A F I A .....	92

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

Es de suma importancia tener en cuenta todas las propiedades y características del fluido de control, ya que éstas tienen un papel muy importante en la perforación, que es la etapa durante la cual se daña las formaciones y por ende éstos repercuten al cementar las tuberías, ya que la cementación primaria de las tuberías de revestimiento en pozos petroleros es una operación cuya importancia es indiscutible, toda vez que constituye un medio indispensable para el control del pozo. Esta operación se efectúa en varias ocasiones y con la iniciación de la perforación, puesto que es necesario cementar una tubería para colocar las instalaciones superficiales del pozo. Durante la perforación, se cementan tuberías intermedias para aislar horizontes que han provocado problemas. En la terminación del pozo, la cementación se orienta fundamentalmente al control de la producción o inyección de fluidos en formaciones de interés. Por otra parte, intervienen en los cálculos las propiedades reológicas de la lechada, siendo necesario conocer su comportamiento, cuando se dosifican en forma variable aditivos de diferentes tipos. La intervención simultánea de los aditivos puede ocasionar efectos que conduzcan la lechada a un comportamiento indeseado, ya sea, entre otras cosas aumentando el tiempo de fraguado a valores imprácticos o reduciendo excesivamente su viscosidad. Se infiere que un diseño incluya todas estas consideraciones hace necesario disponer de -

computadoras electrónicas para efectuar varias iteraciones de -  
cálculo variando las condiciones de la futura operación en un --  
tiempo razonable.

I.- COMO AFECTAN LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS EN LA VELOCIDAD DE PERFORACION.

a) Densidad.- La densidad del lodo es uno de los factores que -- influyen en el avance de la perforación, dado que la práctica ha demostrado que a condiciones iguales, si se disminuye la densidad del lodo de 1.24 a 1.15 gr/cc se notará una reducción del -- 50 % en el tiempo de perforación. (fig. 1)

Los diferentes resultados que se han obtenido en la práctica y -- en el laboratorio con respecto al avance de perforación, han tenido como consecuencia el tratar de encontrar las causas que originan este fenómeno y la primera conclusión a la que se llegó -- fué: la presión hidrostática que existe en los pozos de perforación por causa del peso de la columna de lodo, afecta a las propiedades físicas de la roca que se está perforando, lo cual se -- verifica con el hecho de que a fluidos tales como agua o gas se obtendría un mayor avance, que cuando se emplea un fluido de control más denso.

Además se efectuaron pruebas de campo bajo condiciones reales óp timas, manteniéndose fijos los parámetros y haciendo solo variar la densidad del lodo contra el avance de perforación y se llegó -- al siguiente resultado:

Cuando la presión de la columna de lodo es mayor que la presión -- de formación, disminuye la velocidad de perforación, esta dismi -- nución se debe principalmente a la presión diferencial que existe entre la columna de lodo y la presión de formación.

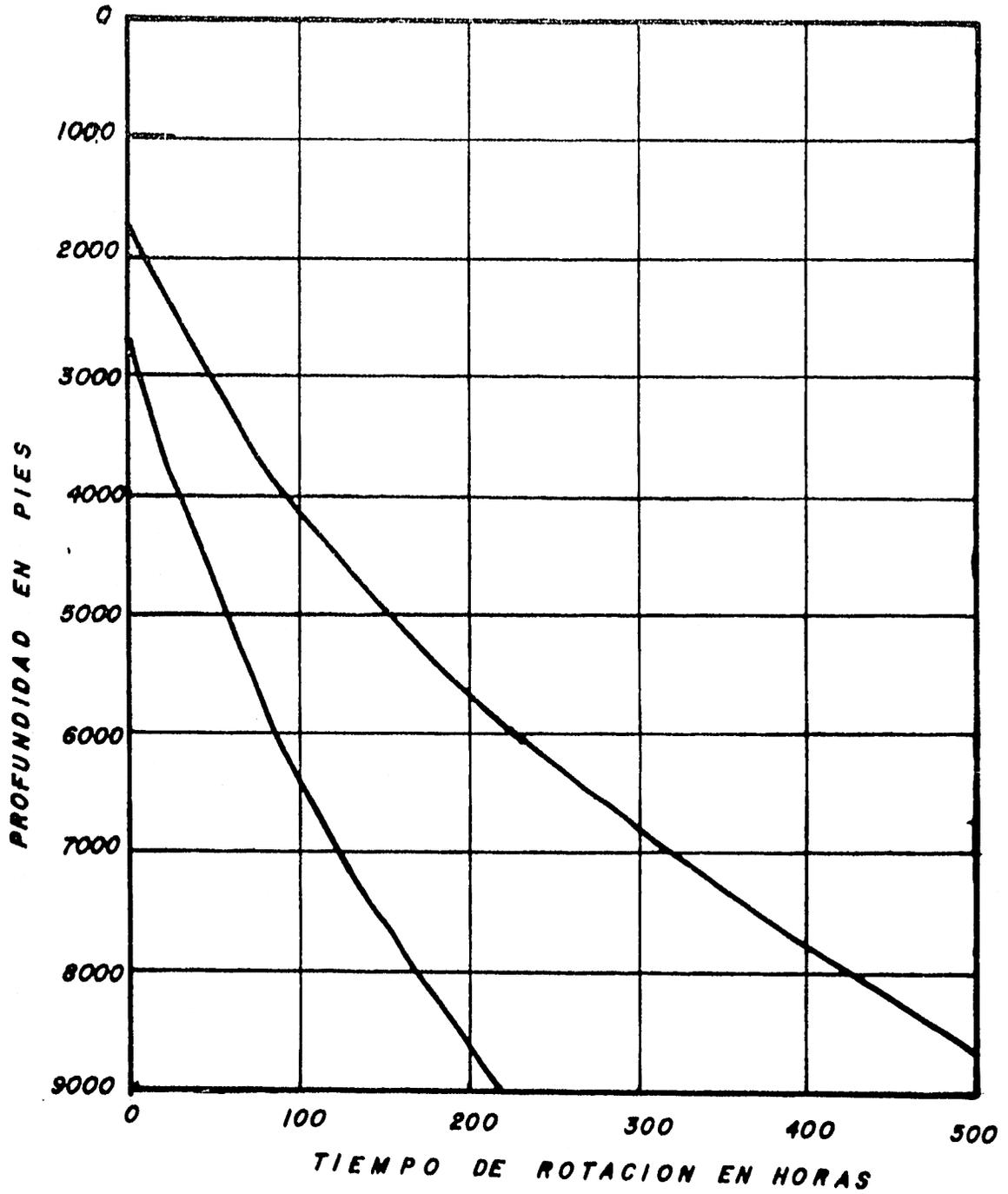


FIG. 1.- EFECTO DE LA REDUCCION DEL PESO DEL LODO EN UN TIEMPO DE PERFORACION

Esta presión diferencial trae como consecuencia un menor avance en la perforación.

La velocidad de perforación se reduce más en formaciones suaves que en formaciones duras. En variaciones de presión de 1 a 350  $\text{kg/cm}^2$ , la reducción de la velocidad de perforación para una formación dura (caliza) será un 20 %, mientras que para una formación suave (lutita) será de un 78 %.

El control de la densidad de los lodos es esencial para el desempeño de algunas funciones básicas, tales como: evitar flujo de hidrocarburos y fluidos al pozo, evitar derrumbes, etc. Es necesario el valor de la densidad para poder efectuar cálculos hidráulicos, cálculos del contenido de diferentes clases de sólidos en el lodo, de consumo de materiales para aumentar o disminuir ésta, etc.

La densidad de un lodo depende de la cantidad y densidad de los sólidos en suspensión. Las densidades comúnmente empleadas en perforaciones pocas profundas varían de 1.08 a 1.38  $\text{gr/cc}$  pero existen casos de presiones anormales en las que se hace necesario el empleo de lodos más densos, lo que se consigue añadiendo un material densificante, que generalmente es barita ( $\text{BaSO}_4$ ), Aunque existen diferentes materiales para el mismo objetivo, como son los diferentes óxidos de hierro (hematita y limonita), pero tienen la desventaja de destruir parte de las propiedades coloidales de los lodos reduciendo el enjarre.

La densidad es la masa de una sustancia dividida entre su volumen.

Lo que se ha discutido en estos párrafos es cierto para formaciones impermeables y sólo relativamente para formaciones permeables. No hay ningún procedimiento que nos permita en el campo, una evaluación de la relación presión hidrostática contra velocidad de perforación. Sin embargo existe un método empírico para estimar esta relación. La ecuación empírica es la siguiente:

$$R = \frac{K N^x W^y}{D^z} \dots\dots\dots(1)$$

Maurer mostró que los exponentes x, y, z son funciones de la limpieza del agujero; por lo tanto, los exponentes que aparecen en cada una de las ecuaciones de perforación de los campos de explotación reflejarán el grado de limpieza del agujero en el tiempo de prueba.

En estos campos de prueba y a presión diferencial relativamente baja, muestra que la relación de perforación puede ser adquirida con la siguientes ecuación:

$$R = \frac{K N^{0.6} (W - W_0)}{D} \dots\dots\dots(2)$$

- Donde: R = Ritmo de perforación ( pies/horas )  
N = Velocidad rotaria de la barrena ( RPM )  
K = Constante de perforabilidad  
W = Peso sobre la barrena  
W<sub>0</sub> = Peso sobre la barrena después de iniciado el cráter  
0.6 = común para arcillas

La constante de perforabilidad depende de las propiedades de la roca, del lodo, de las condiciones de presión y del diseño de la barrena. Pequeños cambios en las propiedades del flujo del lodo no alteran el valor de K.

Cuando la formación tiene una alta permeabilidad el movimiento del fluido de perforación en los poros es relativamente libre. Como se sabe existe más presión por el lodo, que en la formación, todas las presiones diferenciales entre ambos medios ocurrirá a través del enjarre depositado. Para que un diente de la barrena toque el fondo del agujero, primero tendrá que traspasar la capa de partículas de enjarre, debido a la presión que se encuentra en su medio.

El recorte formado por el diente será retenido (succionado) por el enjarre.

La fuerza que sujeta al recorte se expresa como:

$$F = ( P_1 - P_f ) A \dots\dots\dots(3)$$

Donde:  $P_1$  = Presión de la columna del lodo

$P_f$  = Presión de la formación

A = Area del recorte

Esta fuerza que retiene al recorte sólo dejará de actuar sobre él mismo hasta que el lodo penetre por debajo de él y la presión sea transmitida a la parte inferior. Cuando se está levantando un recorte, después de que la barrena ha formado una fractura a su alrededor, se crea un vacío completo debajo del recorte, a --

menos que pueda suministrar líquido para llenar la fractura.

Si se reduce la presión diferencial (  $P_1 - P_f$  ) de tal manera - que la presión del lodo sea igual a la  $P_f$ , la fuerza de succión - tenderá a cero. En conclusión, mientras menos sea la densidad - del lodo, el efecto de presión diferencial tenderá a nulificarse.

b) Viscosidad de los lodos.- En un sistema de fluidos a base de dispersión, la adición de agua disminuye la viscosidad, el contenido de sólidos aumenta la pérdida de filtrado del lodo. Un aumento de viscosidad produce disminución en el avance de perforación.

La viscosidad es la medida de la resistencia interna de los fluidos y los gases al flujo. Si tenemos dos superficies paralelas - en el seno de un líquido, separadas a una distancia por el mismo  $d$ , y, a una de ellas de áreas  $A$ , se le aplica la fuerza tangencial -  $F$  para producir una velocidad relativa  $v$  de una superficie respecto a otra, tenemos que la magnitud de esa fuerza es directamente proporcional al área considerada y a la velocidad relativa de la superficie, e inversamente proporcional a la distancia entre éstas. Esto es:

$$F = \frac{A v}{d}$$

En donde el coeficiente de proporcionalidad es la viscosidad. -- La unidad de la viscosidad en el sistema " cgs " es el poise y - se define como la viscosidad de un líquido hipotético tal que -- una fuerza tangencial de una dina hace que dos superficies para-

lajas en el seno de líquido de  $1 \text{ cm}^2$  de área y 1 cm de distancia una de otra, se muevan a una velocidad de 1 cm/s.

En la práctica se emplea más la centésima parte del poise o centipoise. Determinando el valor del esfuerzo cortante a diferentes velocidades de corte, se puede conocer las propiedades reológicas de los fluidos de perforación y de cualquier otro líquido.

De acuerdo con la variación del valor de esfuerzo cortante al variar la velocidad de corte, se han establecido cuatro tipos modelos ideales de fluidos que son:

- 1.- Newtonianos
- 2.- Seudoplásticos
- 3.- Dilatantes
- 4.- Líquidos plásticos de Bingham

Los tres últimos tipos se conocen también con el nombre de No -- Newtonianos, y son aquellos cuya viscosidad no es constante en una determinada presión y temperatura, pero depende del flujo ya que en la región de flujo laminar la viscosidad permanece constante y se le denomina viscosidad plástica. El valor de esta viscosidad disminuye nuevamente en la región de transición de flujo laminar a turbulento. En la región de flujo turbulento estos líquidos plásticos se comportan en forma similar a los Newtonianos, es decir, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de corte. Ejemplo de estos líquidos son las suspensiones coloidales, lechadas de cemento y fluidos de perforación.

Los líquidos Newtonianos o de "viscosidad aparente " son llamados así porque obedecen al concepto de la ley de la viscosidad de Newton. La viscosidad aparente de un líquido plástico es la que se determina a una velocidad de corte, o sea que la viscosidad aparente está dada por la pendiente de la recta que parte del origen a un punto determinado por los valores de esfuerzo cortante y velocidad de corte. Este dato no es muy útil para el control de los fluidos de perforación.

La viscosidad de los lodos depende de la cantidad y clase de sólidos en suspensión, uno de los factores que le afectan es la concentración.

Ejemplo de líquidos de viscosidad aparente tenemos: agua, glicerina, aceite para motor, kerosena y líquidos cuya viscosidad es similar en algunas temperaturas y presiones.

En la figura (2) se presenta gráficamente la relación de ambas viscosidades, esfuerzo cortante v.s. ritmo de corte, y ambos se aplican solamente para ritmos lentos de flujo donde no existe flujo turbulento.

Los líquidos pseudoplásticos, dilatantes y líquidos plásticos de Bingham al igual que la mayor parte de los fluidos de perforación son suspensiones coloidales y/o emulsiones que se comportan como fluidos plásticos o No-Newtonianos y se asemejan al modelo propuesto por Bingham, por lo que a los fluidos de perforación se les denomina también líquidos plásticos de Bingham.

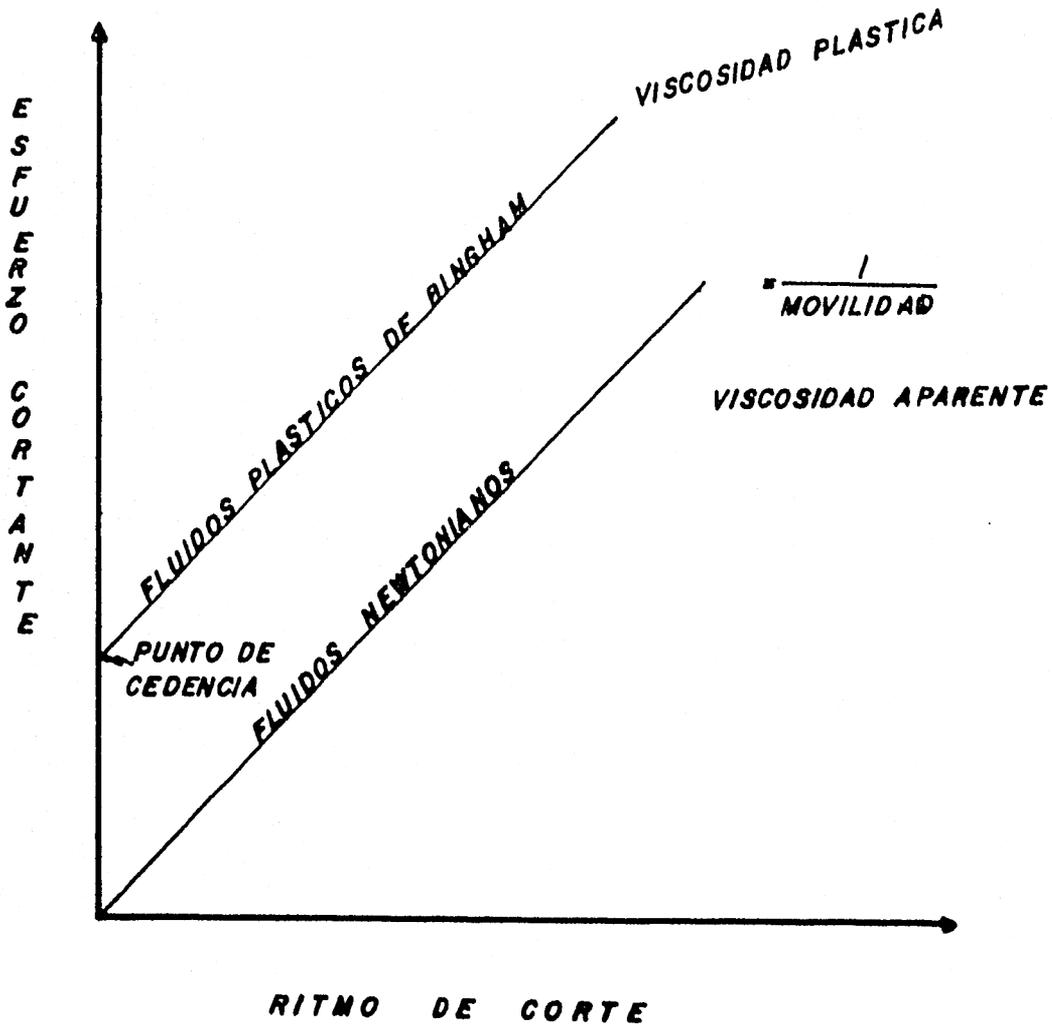


FIG. 2.- CARACTERISTICAS DE LAS VISCOSIDADES PLASTICA Y APARENTE.

El comportamiento de estos líquidos bajo diferentes valores de esfuerzo cortante se caracterizan por dos parámetros: viscosidad plástica y el punto de cedencia. (Fig. 3)

Se requiere un valor determinado del esfuerzo cortante para obtener una velocidad de corte apreciable. Este valor mínimo del esfuerzo cortante lo denominamos punto de cedencia. Al aumentar todavía más el esfuerzo cortante, se reduce la viscosidad del líquido en la región donde el régimen es de tapón y en región de transición de flujo tapón a laminar. En la región de flujo laminar la viscosidad permanece constante y se le denomina viscosidad plástica.

El punto de cedencia o valor inicial del esfuerzo cortante, se debe a una propiedad de estructuración por cargas químicas de las partículas coloidales en suspensión, originando que los líquidos plásticos en reposos adquieran una consistencia gelatinosa, la cual desaparece por agitación. A esta propiedad se le denomina Tixotropía y es un proceso reversible e isotérmico.

El valor de la viscosidad plástica de un líquido de Bingham de los siguientes factores:

- a) Temperatura del líquido
- b) Viscosidad del medio dispersante (fase líquida)
- c) Concentración de sólidos
- d) Forma de los sólidos

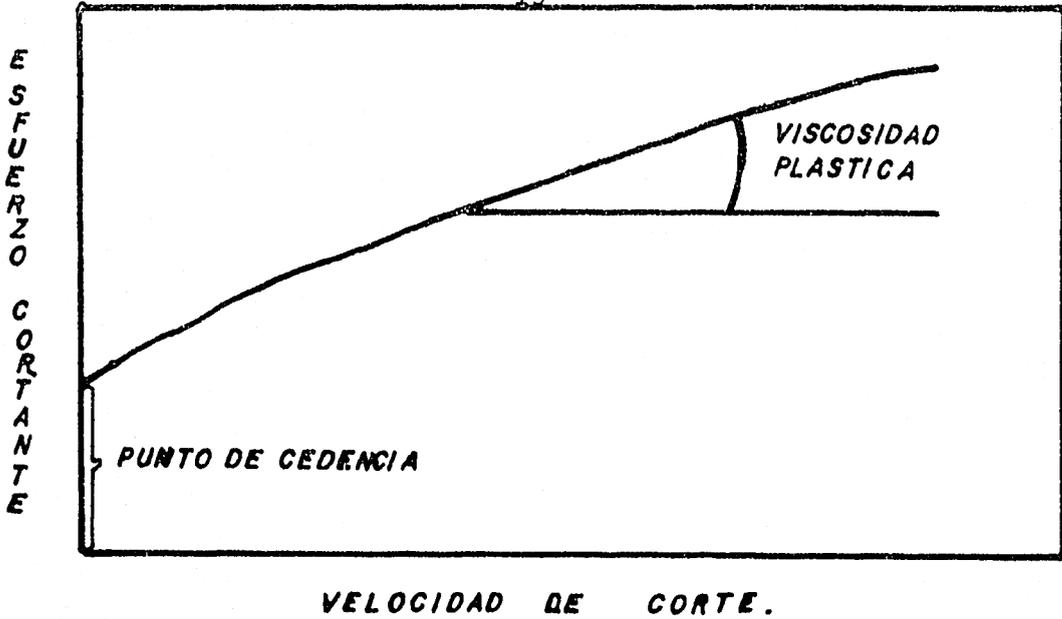


FIG. 3.- COMPORTAMIENTO DE LOS LIQUIDOS PLASTICOS DE BINGHAM, BAJO DIFERENTES VALORES DE ESFUERZO CORTANTE.

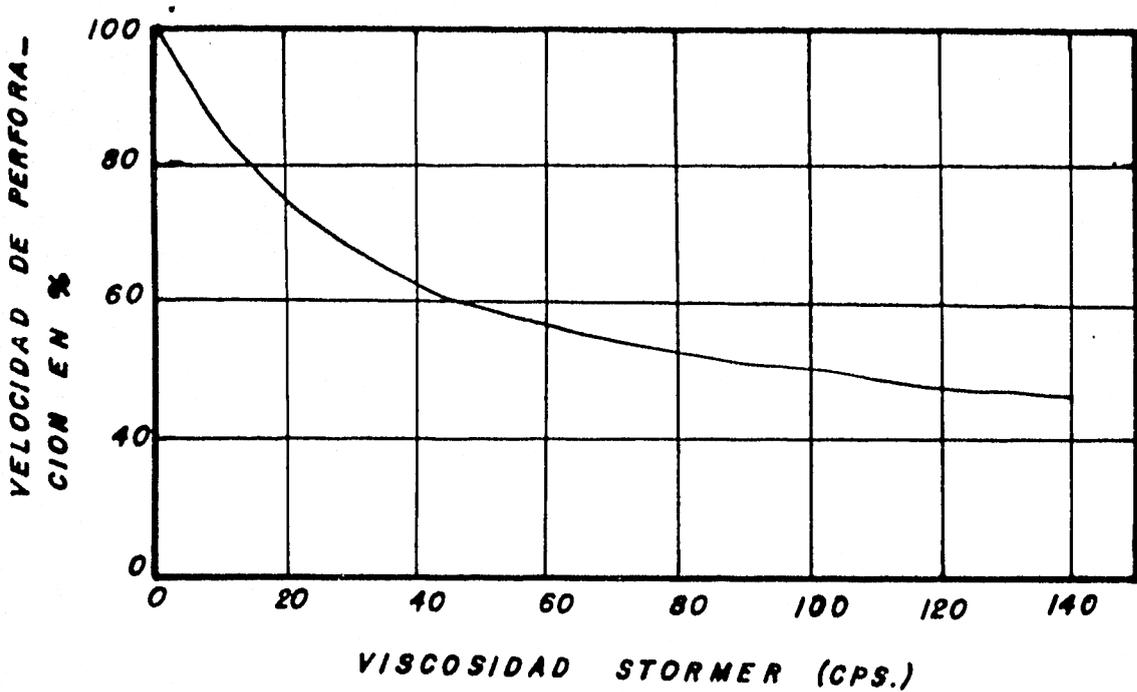


FIG. 4.- CURVA PROMEDIO DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD EN LA VELOCIDAD DE PERFORACION.

Como son muchos los factores que intervienen en la viscosidad -- plástica, no siempre se puede correlacionar ésta con el contenido de sólidos en un fluido de perforación, y para el control de los lodos en los pozos, se establecen normalmente límites o rangos de viscosidad plástica. Estos rangos deben determinarse por cada región y para cada densidad, tipo de fluido de perforación, tratamiento químico, etc.

Algunos fluidos de perforación disminuyen su viscosidad plástica cuando se tratan con dispersantes.

La viscosidad de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura. Un aumento de presión produce un aumento en la viscosidad, - aunque este efecto es más notable a presiones considerablemente altas.

La viscosidad de los fluidos de perforación afecta la velocidad de perforación. En una misma formación y mantenimiento todas las variables iguales, la velocidad de perforación disminuye a medida que se aumenta la viscosidad.

En la figura (4) se muestra una curva promedio del efecto de la viscosidad en la velocidad de perforación; de acuerdo con esta - curva la mayor reducción en la velocidad de perforación se obtiene en el rango de viscosidad de 0 a 15 centipoise.

Este efecto de la viscosidad sobre la velocidad de perforación - se debe posiblemente a una o varias de las siguientes causas:

a) Al aumentar la viscosidad del fluido de perforación disminuye

la eficiencia hidráulica de las bombas de lodo.

b) Un aumento de viscosidad incrementa las pérdidas por fricción en el circuito de lodo, lo cual significa por lo general una reducción del lodo circulado y menor eficiencia del lodo para eliminar los recortes y evitar que la barrena los remuela.

c) Los fluidos de perforación con muy alta viscosidad proporcionan un colchón viscoso que disminuye la fuerza de impacto de los dientes de la barrena sobre la formación.

A continuación tenemos la siguiente ecuación muy útil para el estudio reológico de los líquidos.

$$M = \frac{F/A}{V/d}$$

La viscosidad de los lodos depende de la cantidad y clase de sólidos en suspensión, los factores que la afectan son la concentración.

La viscosidad está en razón directa de la cantidad de arcilla -- presente, siendo esta relación afectada por:

a) Fuerza de repulsión.- Al ionizarse la bentonita se produce -- una carga negativa que causa una repulsión mutua y tiende a reducir la fricción y evitar la floculación. Este efecto aislado tendería a producir viscosidades más bajas en una bentonita sódica -- que en una cálcica de igual concentración.

b) Fuerza de atracción.- Las partículas de arcilla son hojas planas y delgadas, teóricamente puede tener un largo y un grueso -- ilimitados, sin embargo estas hojas han sido rotas en secciones--

de pequeño tamaño. En las superficies de éstas, frecuentemente - hay valencias residuales que originalmente sirvieron para mantener juntas las hojas más grandes, pero fueron dejadas sin satisfacer desde el punto de vista químico. Son satisfechas en parte por la absorción de agua en la superficie, pero queda siempre un remanente relativamente grande que atrae a otra partícula en posición tal que formará una continuación de la primera, saturará completamente las valencias residuales de ambas cuando la suspensión queda en reposo un corto tiempo, las partículas tienden a arreglarse en un conglomerado definido y a resistir cualquier fuerza que trate de destruir ese agrupamiento. Este último efecto se debe a la gelatinización, y se le llama Tixotropía, palabra derivada del griego que significa " cambio por agitación ".

Las cualidades tixotrópicas de una arcilla dependen de las fuerzas relativas de atracción y repulsión que existen entre las partículas. Si las fuerzas de atracción debidas a las valencias residuales son mayores que las fuerzas de repulsión, el lodo tendría una alta velocidad de gelatinización y una fuerte gelatinosidad. Por otra parte si las fuerzas de repulsión son grandes y las fuerzas de atracción son débiles el lodo presentará una velocidad baja de gelatinización y por lo tanto baja gelatinosidad.

La adición de pequeñas cantidades de sales de calcio solubles reduce el grado de disociación de la arcilla sin afectar las fuerzas de atracción. Se deduce de esta manera el tiempo de gelatinización y la gelatinosidad.

Una suspensión que no presentare plasticidad tendría una velocidad de escurrimiento proporcional a la presión; pero una suspensión que puede gelatinizarse al estar en reposo, presenta propiedades plásticas, es decir, la masa empezará a fluir después que se le aplique cierta presión exterior. La fuerza necesaria para desformar el sistema de manera que pueda fluir se le llama " resistencia a la gelatina " .

c) Reopexia.- Es el fenómeno relacionado con la tixotropia y consiste en un aumento en la velocidad de gelatinización provocada por una acción mecánica por ejemplo, el hecho de hacer girar el recipiente que contiene al fluido alrededor de un eje o de golpear dicho recipiente. Este fenómeno puede variar la velocidad de gelatinización en forma notable, basta señalar el caso de que una suspensión de bentonita al 1.5 % fragua en 25 minutos de reposo y puede gelatinizar después de 1 minuto si se golpea el recipiente.

Dentro de la tubería de perforación, la rotación y el flujo laminar del lodo favorecen este fenómeno; la suspensión necesita entonces mayor presión en las bombas para fluir constituyendo un grave inconveniente, pero haciendo que el flujo dentro de la tubería sea turbulento puede evitarse este fenómeno.

d) Floculación.- Este es el proceso mediante el cual las partículas se atraen entre sí y forman agregados permanentes.

La floculación puede evitarse de varias maneras:

1.- Reduciendo el potencial de las partículas en la suspensión - lo que puede conseguirse agregando un electrolito de cationes - polivalentes como:  $\text{Ca}^{++}$  ,  $\text{Mg}^{++}$  ,  $\text{Al}^{++}$  .

2.- Agregando un electrolito en exceso; una fuerte concentración de cloruro de sodio que produce una demasía de iones sodio en la solución, disminuyendo la disociación de la arcilla debido al -- efecto de ión común.

3.- Elevando la temperatura, ya que de esta manera se produce un incremento reversible en la viscosidad. Este punto es de suma importancia para el control de los lodos a grandes profundidades.

c) Filtrado o pérdida de agua y enjarre.- La pérdida del filtrado consiste en determinar la cantidad de líquido (fase continua del lodo) que se extrae de una muestra de lodo, mediante un filtro prensa de área especificada, a una presión de  $100 \text{ Lb/pul}^2$  -- durante un intervalo de 30 minutos. En esta prueba se debe especificar la temperatura del lodo. El espesor de los sólidos que - quedan retenidos por el papel filtro especial empleado en la - - prueba se le denomina enjarre y se reporta en milímetros.

El objeto de esta prueba es conocer los componentes sólidos y -- químicos del lodo para formar una película delgada y de baja permeabilidad. El valor del filtrado y el espesor del enjarre, de - penden de la concentración y naturaleza de los sólidos en el lodo, especialmente los de dimensiones coloidales, de la concentración y características de los líquidos emulsionados, de la pre - sencia de ciertos reactivos (generalmente orgánicos) que no son-

completamente solubles.

Los valores adecuados del filtrado y el enjarre varían en diferentes áreas y generalmente se rigen por las características de las formaciones perforadas y productoras. La mayoría de los reductores de filtrado aumentan la viscosidad de los lodos y en general al disminuir el filtrado se reduce la velocidad de perforación. En general, se puede decir que un filtrado alto provoca derrumbes y aumenta la invasión de las formaciones productoras.

Por otra parte un enjarre grueso restringe el paso de las herramientas de perforación, dificulta las corridas de tuberías de revestimiento puede crear un efecto de succión al sacar la tubería de perforación, además canalización del cemento.

Aunque existen filtros prensa para determinar el filtrado a elevadas temperaturas y presiones, la pérdida de agua obtenida a la temperatura ambiente puede corregirse en forma aproximada sabiendo que el filtrado es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad del líquido filtrado.

$$V_1 = V_2 \sqrt{M_2/M_1}$$

Donde:  $V_1$  = Filtrado a la temperatura  $T_1$

$V_2$  = Filtrado a la temperatura  $T_2$

$M_1$  = Viscosidad a la fase líquida a  $T_1$

$M_2$  = Viscosidad a la fase líquida a  $T_2$

$T_1$  y  $T_2$  temperaturas en cuestión

Los valores obtenidos en esta fórmula son correctos si no se alteran las propiedades coloidales del fluido de perforación, o sea que la viscosidad del filtrado sea la única variable.

d) Propiedades coloidales.- Las cualidades que tienen los fluidos de perforación de formar un buen enjarre en las paredes del pozo que impermeabiliza las formaciones porosa y lubrica la tubería de perforación depende de sus propiedades coloidales.

Estas a su vez, son función de la calidad de la arcilla empleada y de las sales que el agua pueda tener.

No existe una unidad para medir el valor coloidal de un lodo; pero existen métodos en los cuales se mide el valor relativo haciendo posible preveer su comportamiento y el control de dicha propiedad.

Las propiedades coloidales de un lodo dependen del contenido de éstos, teniendo en cuenta que los coloides son partículas cuyas dimensiones varían de 0.002 mm a una micra. Sin embargo el contenido de coloides debe ser regularizado, pues puede alcanzar valores altos que impedirán el depósito de los cortes en la presa de asentamiento.

e) Contenido de arena.- Resulta perjudicial éste en la perforación de pozos petroleros, sobre todo si se encuentra en cantidades considerables, ya que puede ocasionar enjarres muy gruesos, empaques en la barrena, deteriora las partes del equipo en contacto con el lodo (bombas, tubo vertical, tubería, etc.), y además se pueden tener grandes pérdidas de agua.

## II.- DESCRIPCION DE LAS ARCILLAS

El suelo se puede definir como " todo agregado de partículas materiales u orgánicas no consolidadas o no cementadas ", es el -- producto del ataque a que la corteza terrestre está sometida -- constantemente, sobre todo por el aire y las aguas por la forma-- en que actúan estos mecanismos de ataque los podemos incluir en-- dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química.

a) La desintegración mecánica se origina cuando las rocas sufren intemperización por agentes físicos como son:

1) Cambios periódicos de temperatura, la diferencia de temperatu-- ra entre la capa exterior y la interior de las rocas originan -- una diferencia de esfuerzos que hace que las rocas se descasca -- ren.

2) La acción del interperismo, al haber un descenso de tempera -- tura, se congela el agua introducida en las grietas y juntas de las rocas, aumentando su volumen y resquebrajando a las mismas.

3) Remoción de adyacentes o supradyacentes a la masa de que se -- trate y se presenta al hacer una excavación ya que se alivian -- los esfuerzos por la remoción del material, que en este caso se -- rán esfuerzos de compresión, en el material subyacente.

Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas o cuando -- mucho limos y solo en casos especiales arcillas. El tamaño míni-- mo producido por desintegración mecánica varía de 0.002 mm a -- 0.001 mm; por ejemplo en el polvo de rocas de erosión glacial o

eólica se tienen tamaños menores de 0.002 mm.

b) La descomposición química se presenta cuando los agentes que atacan modifican su constitución mineralógica. Como principal agente de este proceso está el agua cuyos mecanismos de ataque son: la oxidación, hidratación y carbonatación. También se pueden considerar como agente, aunque de menor grado los productos químicos de la vegetación. Todos estos mecanismos generalmente producen arcillas como último producto de descomposición.

Los cambios de temperatura acentúan los procesos anteriores por lo que se puede observar formaciones arcillosas de importancia en zonas húmedas y cálidas, el pequeño aporte de las corrientes de agua en condiciones favorables pueden constituir un depósito.

En la naturaleza no se puede separar estos dos procesos, sin embargo en determinadas circunstancias los suelos son de carácter predominantemente mecánicos al mismo tiempo actúan los procesos químicos.

Los efectos de los procesos químicos dependen de:

- 1.- Sustancias contenidas en el agua
- 2.- Valor relativo de la superficie expuesta a los agentes químicos.

También se puede comprobar que cuanto más pequeños son los fragmentos, menor será la eficacia de los procesos de desintegración mecánica y mayores los efectos de desintegración química. Dependiendo de los fenómenos de desintegración mecánica o química que intervinieron en la formación del suelo, se tendrán los siguientes

tes materiales:

1) Materiales granulares.- Son aquellos cuya acción entre sus partículas está determinada por procesos esencialmente mecánicos.

2) Materiales arcillosos.- Son aquellos en que la acción entre sus partículas está determinada por procesos esencialmente químicos.

3) Materiales de transición.- Representado por los limos que son gobernados por alguno de los dos tipos de fenómenos mecánico o químico.

c) Minerales constituyentes de las arcillas.- Un mineral es una sustancia inorgánica que tiene estructura interna características determinadas por cierto arreglo específico de sus átomos e iones. Su composición química y sus propiedades o son fijas o varían dentro de sus límites definidos. Las propiedades físicas son: el color, el lustre, dureza, la forma de estructura y disposición de sus planos de crucero, la tenacidad, la capacidad para permitir el paso de ondas y radiaciones y la densidad relativa, pero lo más importantes de ellos es su estructura atómico-molecular que condiciona sus propiedades físicas.

Los minerales de la arcilla son básicamente: silicatos de aluminio, hidratos y ocasionalmente silicatos de magnesio, hierro y otros metales también hidratados. Estos minerales tienen casi siempre estructura cristalina definida y sus átomos se disponen en láminas, por eso frecuentemente en la práctica se describen las arcillas como compuestos de partículas.

De acuerdo en la forma y orden en que se unen las retículas laminares, los minerales de arcilla se clasifican en tres principales grupos que son:

- 1) Caolinitas
- 2) Illitas o Hidrómicas
- 3) Montmorillonistas o Montmorillonoides

La fórmula química de las caolinitas es:  $H_4Al_2Si_2O_9$ .

Esta fórmula es una de las más correctas puesto que muestra que el agua estructural está ligada al enrejado en forma de oxidrilo, OH y no como  $H_2O$  y están formados por una lámina de sílice tetraédrica y una lámina aluminica octaédrica que se superpone indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (adsorción), haciendo de las caolinitas con esta formación estructural inexpansible unas arcillas muy estables en presencia del agua. Además cuando están húmedas las caolinitas no son sino moderadamente plásticas y tienden a tener un coeficiente de fricción interno mayor que cualquier material arcilloso.

La fórmula de las Illitas es:  $(OH)_4Ky(Si_8 - YAl_y)(Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)O_{20}$

Están estructuradas análogamente a las montmorillonitas, salvo algunos cambios en la composición química.

Los valores de sus densidades varían entre: 2.64 a 3.00 para las illitas; 2.60 a 2.68 para las caolinitas y 2.20 a 2.70 para las montmorillonitas.

Las montmorillonitas están formadas por una lámina octaédrica de alúmina entre dos láminas tetraédricas de sílice, superponiéndose indefinidamente. La ligazón entre las láminas es más bien laxa, por lo que el mineral resulta inestable especialmente en presencia del agua ya que ésta puede introducirse en la estructura con relativa facilidad a causas de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar, produciéndose un incremento de volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente en una expansión y en tales casos las distintas láminas de montmorillonitas están encerradas o envueltas en películas de agua. La montmorillonita así humedecida, posee gran plasticidad y un bajo coeficiente de fricción interna, además presenta fuerte tendencia a la inestabilidad. Cuando está en un proceso de desecación, una montmorillonita saturada queda sometida a gran contracción y agrupamiento.

Esta propiedad de expansión de las montmorillonitas siempre es de preocupación para el Ingeniero cuando se encuentra en el lugar en que se va utilizar, estos minerales de arcillas pueden -- originar daños.

Las tan conocidas bentonitas son arcillas del grupo montmorillonítico notable por su capacidad de dilatación, formadas por la descomposición química de cenizas volcánicas, que ayudan al Ingeniero en diversos trabajos como pueden ser:

a) Impedir fugas en depósitos y canales, lo que se consigue con una mezcla del suelo del lugar y arcillas del tipo bentonítico.-

Cuando entran en funcionamiento los canales, el agua ocasiona la dilatación de la arcilla y de esta forma estanca los flancos y fondos del canal.

b) En la construcción de perforaciones y zanjas en terrenos ya sean cohesivos o no y bajo forma de fluido de perforación cuya función será la de mantener las paredes de las perforaciones, -- para facilitar la extracción de sedimentos, etc.

Como se dijo anteriormente, las arcillas bentoníticas, pertenecen al grupo de las montmorillonóticas, que por su estructura -- laxa o débil entre las láminas que las constituyen permiten que al introducirse el agua entre las mismas, se produzca una expansión, es decir, son muy inestables en presencia de ella.

Estas arcillas debido al tamaño de sus partículas menores de 0.002 mm, las fuerzas de otro tipo ejercen una acción importantísima; ello debido principalmente a la superficie específica de sus partículas. Otras características de la bentonita es su " pureza ". Los coloides son de dos clases:

- 1) Geles o coloide gelatinosos
- 2) Sales o coloides semejantes al líquido

Cuando la bentonita se encuentra en presencia del agua y se somete a choques o vibraciones, algunos geles se convierten en sales formándose así un líquido relativamente fluido, si bien después de un período de reposo prolongado a veces unas horas vuelven a su estado de gel volviendo a endurecerse.

### III.- PROBLEMAS DE CORROSION

Los reportes recientes mostraron que el 70 y 80 % de los fracasos de tuberías de perforación resultaron de la corrosión, y la frecuencia de los fracasos se ha incrementado desde los últimos años pasados. Alrededor de los mismos períodos han adoptado ciertas alternativas de soluciones en las prácticas de perforación y en el control de los lodos.

- a) Se han usado tubos con un mayor esfuerzo permisible.
- b) Se han usado lodos con PH menor para obtener mejor estabilidad en el agujero.
- c) El uso de cromolignosulfonatos en lodos han llegado a ser difundido.

Se ha tratado de evitar la corrosión en una forma de responsabilidad dividida y de acuerdo a un programa encaminado para su control.

Los progresos hechos han sido en controlar la corrosión producida por los fluidos de perforación. Si las consideraciones son dadas para los materiales corrosivos; el oxígeno causa una mayor corrosión, éste se incorpora al fluido de perforación durante el sistema de circulación superficial de lodo. El ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y ácido orgánico pueden incorporarse al fluido desde la formación perforada; esos materiales se presentan en la mayoría de los fluidos de perforación bajo ciertas condiciones de actividad bacterial y según degradaciones de ciertos aditivos de los lodos.

Para pruebas en el fondo del agujero durante la perforación se colocan en la cuerda de la barrena sellos ( en forma de aro ) hechos de acero. Ellos nos darán la información sobre corrosión y áreas de picaduras en el agujero bajo condiciones de presión y temperatura.

Por otra parte, la información obtenida de los sellos pueden también ser engañosa ya que éstos presentan una superficie de metal limpia inacentuado. Los sellos no pueden indicar corrosiones serias y los fracasos pueden ocurrir por esfuerzos cíclicos o tipo de ataque de concentración celular.

Generalmente, algunas picaduras en los sellos pueden ser tomados como una advertencia de fuertes corrosiones posibles, y de que tratamientos pueden ser dados para eliminar las causas de las picaduras.

Campos de experimentación han mostrado que ciertas películas de cationes orgánicos pueden alargar la vida de la tubería de perforación significativamente. El uso de inhibidores aniónicos inorgánicos no han sido tan acertados en prevenir fracasos y enrosca<sup>o</sup> duras.

Los métodos para lograr que el inhibidor de corrosión quede colocado sobre la superficie y no dentro del lodo son:

- 1) Humedeciendo o rociando la tubería de perforación con la solución inhibidora antes de ésta pueda ser corrida.

2) Bombeando periódicamente baches de inhibidor diluido 5 a 10 partes por un volumen de aceite, debajo de la tubería.

3) Para una mejor protección de la tubería por lo general ésta es jalada a través de un limpiador y rociada con una solución inhibidora en viajes fuera del pozo.

El tratamiento con inhibidores no eliminaría el ataque por concentración cédica bajo las gomas de los tubos de perforación; se han obtenido mejores resultados en los llamados lodos de agua limpia y en lodos aereados.

Muchos solventes químicos y otros aditivos orgánicos usados en lodos densos de base agua son agentes reductores. Estos lodos se acostumbra a ser mantenido con sistemas alcalinos; así el oxígeno, dióxido de carbono y los ácidos orgánicos son menos probables para causar un severo problema de corrosión.

En lodos bien tratados, el ácido sulfhídrico es un problema si el metal más fuerte está sujeto a una mayor tensión.

Simples pruebas han revelado el progreso para impedir la corrosión. El trabajo ha sido hecho con barras o láminas de varios tipos de aceros.

Más recientemente, los conos de las barrenas han sido sujeto a esfuerzos previos de 40,000 PSI, en una prensa hidráulica y usados para protegerla contra rompimientos. El teflón de los "O" -- Rings pueden ser colocados en un estrecho o en varios pertrechos de sellos para checar los tipos de ataque de concentración cédica.

Estos sellos son usados para pruebas de fluidos de perforación - bajo condiciones estáticas y dinámicas y a varias temperaturas.- Mientras estos sellos pueden ser de gran ayuda en cada experimento de laboratorio o prueba de campo, esto recordará que las condiciones de pruebas no deben ser duplicadas para situaciones metalúrgicos o tensiones ocurridas en situaciones actuales de la - parte baja del agujero.

Las pruebas hechas durante la perforación de un pozo profundo en el Golfo de Campeche, muestran como los baleros pre-esforzados - han sido utilizados para estudiar las fallas en la tubería de -- perforación. Estas pruebas para perforar debajo de la tubería de revestimiento a una profundidad de 20,000 pies y con una temperatura de formación de 435 °F ocurren diferentes desenroscaduras.

El examen anterior de la tubería de perforación mostró una placa de sulfuro de fierro; y en pruebas de lodo mostraron cerca de 50 ppm de sulfuro. La mayoría de estas pruebas de filtrado de lodo- mostraron sulfatos cero. Una muestra de lodo circulado desde el- fondo, mostró 5 ppm de sulfato de fierro. Los baleros pre-esfor- zados que se han colocado dentro del lodo y han sido rolados du- rante 16 horas a 150 °F mostraron fracturamientos con sulfuro de hierro en la superficie.

Prueba de este lodo así como otros lodos conteniendo alta concentración de cromolignosulfonato o lignito, no mostró éxito en los intentos para precipitar o dar el sulfuro soluble.

A este tiempo no hay métodos proveídos de protección de tubos de

alta tensión hacia los estrechos rompimientos cuando el sulfato se presenta en el lodo base agua.

La protección puede ser proporcionada por un lodo de aceite, con dic ionado para este propósito. Si el enjabonado es correcto y -- los derivados de aminas se presentan en altas concentraciones el aceite moja de preferencia al hierro y puede dar una capa o pell cu la protectora que prevenga la corrosión y la formación de hi dr ó ge no que puede ser difundido dentro del metal; lodos base - - aceite pueden ser mantenidos altamente alcalinos sin excesiva -- gelatinización o solidificación que es lo que ocurre en uno base agua.

Los fluidos de empacamiento que se dejan entre la tubería de re vest im ie nto y la de producción y los empacadores a menudo presen tan pro ble mas ma yo res de cor rosi ón que aquellos producidos por - el fluido de perforación. Hay algunas razones para esto:

- 1) El lodo no puede ser reacondicionado para mantener alcalini dad; sulfato de hidrógeno, dióxido de carbono y ácidos orgánicos tienen que mantenerse.
- 2) Las reacciones que ocurren solamente a través de un largo pe rí o do de tiempo llegan a ser importantes.
- 3) Durante un largo período de tiempo bajo condiciones estáticas un medio ambiente altamente propicio, la actividad bacterial - - puede cambiar un lodo relativamente no corrosivo a un lodo que - podría contener sulfuro o a uno que puede causar ataque de con cent raci ón c é ld ica.

#### IV.- DIFICULTADES QUE SE PRESENTAN EN LAS CEMENTACIONES.

a) Características de la formación.- La mayoría de las dificultades que se presentan en la cementación de tuberías de revestimiento de pozos, se deben al desconocimiento de las siguientes características de las formaciones expuesta en el agujero:

- a) Presión de los fluidos
- b) Permeabilidad
- c) Presencia de fracturas naturales o inducidas cuando se corren las tuberías
- d) Presión de fractura

Formaciones con baja presión, alta permeabilidad o fracturadas pueden provocar deshidratación en la lechada de cemento, que para condiciones extremas significa: incrementar su densidad, reducir su bombeabilidad, disminuir el área efectiva del espacio anular e incrementar las pérdidas de presión por fricción. En consecuencia, se aumenta el riesgo de perder la circulación.

Por otra parte, si durante la colocación de la lechada se excede la presión de fractura de una formación, parte ó toda la lechada se perderá. Por lo consiguiente, es importante conocer las características de las formaciones antes mencionadas, a fin de tomar medidas para evitar lo antes descrito.

La máxima presión que se alcance durante una cementación, no debe exceder a la presión de fractura de las formaciones expuestas en el agujero, de otra manera, se inducirán pérdidas de fluidos y circulación.

Comúnmente, la presión de fractura de una formación se relaciona con su profundidad, expresándola como un gradiente de presión de fracturamiento, que es fácil de comparar con el gradiente de diseño de la cementación.

El gradiente de fracturamiento de las formaciones en un campo, no varía sustancialmente. Su valor se estima a partir de:

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

Cuando no se aplica ninguno de los criterios anteriores, la presión de fractura se puede obtener a partir de la siguiente ecuación, desarrollada para rocas sedimentarias a profundidades mayores de 1000 m.

$$P_f = \rho_r D \frac{2\mu}{1-\mu} + S_t \dots\dots\dots (1)$$

Donde:  $P_f$  = Presión de fractura

$\rho_r$  = Densidad de la roca

D = Profundidad

$\mu$  = Módulo de Poisson

$S_t$  = Esfuerzo de tensión

Ejemplo: Para rocas comprendidas entre 1000 y 3000 m de profundidad, el módulo de Poisson varía de 0.18 a 0.27, la densidad de 2 a 2.6 gr/cc y el esfuerzo de tensión de 14 a 70 Kg/cm<sup>2</sup>.

Tomando los valores medios de cada uno de estos parámetros, --

$M = 0.225$ ,  $\rho_r = 2.3$  gr/cc y  $S_t = 42$  kg/cm<sup>2</sup> y sustituyendo en --

la ecuación (1) se obtiene:

$$P_f = 0.1334 D + 42 \dots\dots\dots(2)$$

b) Propiedades de la lechada.- Las propiedades de la lechada se determinan en función de las características de las formaciones y del tiempo de cementación (operación) requerido según la técnica de diseño seleccionada.

A continuación se indican las principales propiedades y características que se deben controlar en la lechada de cemento:

a) Densidad.- Deberá ser tal que permita efectuar la cementación sin exceder el gradiente de fractura de la formación. Con el propósito de mejorar el desplazamiento del lodo en el espacio anular, se recomienda que la densidad de cementación sea mayor que la densidad del fluido de perforación, con una diferencia de -- 0.25 gr/cc

b) Pérdida de agua.- Para cementaciones primarias se recomienda lechadas que sometidas en un filtro prensa a 1000 PSI de presión diferencial durante 30 minutos, mantengan una pérdida de agua de 150 y 400 cc. Lechadas de cemento con apreciables pérdidas de agua originan: incremento en la densidad, reducción en la bombeabilidad, reducción en el área efectiva del espacio anular y por consiguiente un incremento en las pérdidas de presión por fricción. La pérdida de agua se controla a fin de evitar la deshidra

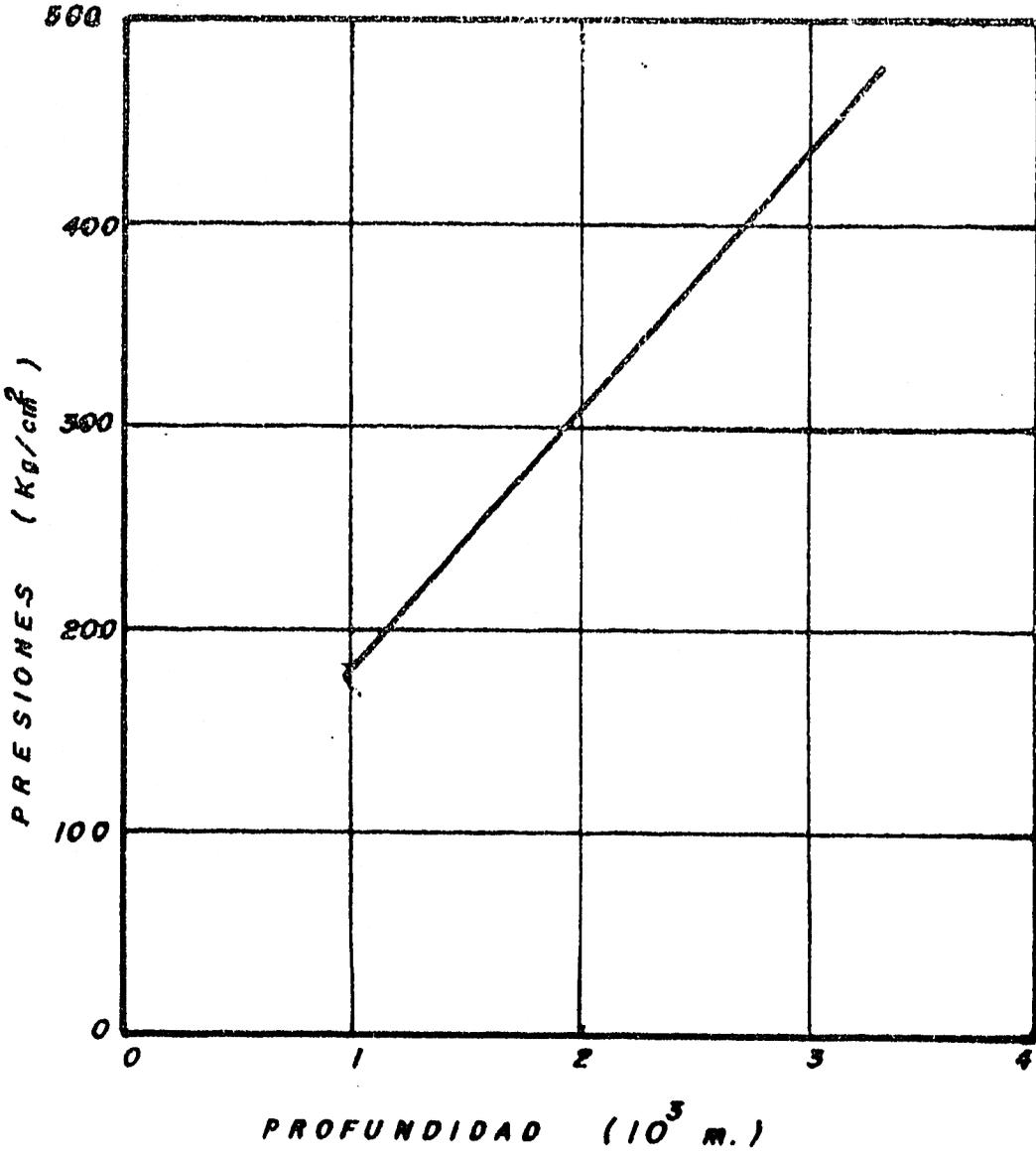


FIG.1.- GRAFICA PARA DETERMINAR LA PRESION NECESARIA PARA INDUCIR FRACTURAS VERTICALES EN FORMACIONES QUE YACEN A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1000 m.

tación de la lechada, sobre todo cuando se presume la presencia de formaciones muy permeables o de baja presión.

c) Tiempo de espesamiento.- Deberá permitir el desplazamiento de la lechada hasta el lugar predestinado, teniendo en cuenta que el espesamiento se acelera con: el incremento de temperatura, -- presiones mayores de 5000 PSI, la presencia de componentes inorgánicos y la pérdida de agua.

Este tiempo también se le conoce como tiempo de bombeabilidad y es el tiempo durante el cual se puede bombear el cemento.

d) Viscosidad.- Deberá mantenerse cerca, pero siempre mayor a la del fluido de perforación. Con esto se facilita el desplazamiento del lodo y se reducen las pérdidas de presión por efecto de viscosidad.

e) Resistencia a la compresión.- Después de colocar la lechada de cemento en el espacio anular, es necesario esperar hasta que ésta adquiera una consistencia capaz de sostener a la tubería de revestimiento, antes de continuar perforando o terminando el pozo. Se considera que una resistencia a la compresión de  $35 \text{ kg/cm}^2$  es adecuada para soportar la tubería. Por lo tanto, el tiempo de espera puede determinarse experimentalmente, simulando las condiciones de cementación en un aparato de construcción especial y midiendo a continuación la resistencia del cemento.

El tiempo de espera puede estimarse por medio de la ecuación (3) desarrollada por R.F. Farris. La expresión mencionada se obtuvo-

relacionando el tiempo necesario para obtener la consistencia requerida del cemento con el tiempo en que se alcanza la máxima presión dentro de la tubería.

$$t_{\text{woc}} = 1.5 t_{\text{max}} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:  $t_{\text{woc}}$  = Tiempo mínimo de espera para el fraguado del cemento

$t_{\text{max}}$  = Tiempo transcurrido desde que se mezcla el primer-saco de cemento hasta que se alcanza la máxima presión dentro de la tubería de revestimiento.

En la cementación de tuberías de explotación se emplea generalmente un tiempo de espera de 24 hrs. Se ha demostrado que este tiempo proporciona una seguridad apropiada, como puede observarse de los datos reportados en la tabla (1), donde se presenta la resistencia a la compresión, para cementos clases A, B, C, D, E, F y G. Estas resistencias se alcanzaron después de 8 y 24 horas de haberse efectuado la mezcla.

Obtener una lechada, para condiciones satisfactorias de bombeo y tiempo de fraguado, presenta dificultades cuando se trata de cementar intervalos considerablemente grandes y profundos.

En estos casos, la mezcla se diseña procurando que la cima y base del cemento en el intervalo en cuestión adquiera la misma resistencia al mismo tiempo.

f) Aditivos.- Los aditivos tienen por finalidad modificar las propiedades de las lechadas de cemento. Sin embargo, su uso requiere control riguroso, porque modificar alguna propiedad en particular puede alterar otra, tales como la resistencia a la

CURADO A			RESISTENCIA A LA COMPRESION EN KG/CM <sup>2</sup> PARA CEMENTOS CLASES:						
CEDULA No.	PRESION Kg/CM <sup>2</sup>	T °C	A	B	C	D	E	F	G
			EN 8 HORAS						
---	atm	37.7	17.7	14.1	-	-	-	-	-
15	55.9	35.0	-	-	-	-	-	-	21.6
35	209.8	60.0	-	-	-	-	-	-	106
65	209.8	110.0	-	-	-	35.5	-	-	-
85	209.8	143.3	-	-	-	-	35.5	-	-
95	209.8	160.0	-	-	-	-	-	35.5	-
			EN 24 HORAS						
---	atm	37.7	1.26	106	140.6	--	--	--	--
45	209.8	37.7	-	-	-	70.3	70.3	-	-
65	209.8	110.0	-	-	-	140.6	-	70.3	-
85	209.8	143.3	-	-	-	-	140.6	-	-
95	209.8	160.0	-	-	-	-	-	70.3	-

TABLA No. 1 Resistencia a la compresión para los cementos

Clase: A, B, C, D, E, F y G.

compresión, viscosidad, pérdida de agua, densidad, etc.

Existen diferentes tipos de aditivos y sus usos como anteriormente se mencionó requieren del control perfecto; la finalidad de este trabajo no es explicar los diferentes tipos de aditivos sino únicamente tener el concepto de éste.

#### V.- EQUIPO DE CEMENTACION Y ACONDICIONAMIENTO DEL POZO.

El equipo que se emplea en las cementaciones se selecciona de -- acuerdo a las características de las formaciones, condiciones -- del agujero y técnicas de cementaciones.

Con el propósito de facilitar el estudio del equipo requerido en las operaciones de cementación primaria, éste se clasificó en:

a) Equipo subsuperficial

b) Equipo superficial

a) Equipo subsuperficial.- En este capítulo se describen las fun ciones del equipo utilizado dentro del pozo al efectuar una ce - mentación primaria.

1) Zapata de cementación.- Se instalan en la parte inferior de - la sarta de tubería de revestimiento y sirven para guiarla y pro tegerla durante su introducción al pozo. Además, dependiendo de - su tipo, permiten o evitan el paso del lodo a través de ellas. - Se clasifican en: guía, flotadora y de control de flujo o dife - rencial.

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 que soporta la torre o mástil. Su uso requiere que la tu bería se corra sin sobrepasar una velocidad determinada; de - - acuerdo a las características de la formación y condiciones del-

agujero. 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 cementaciones 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 tubería de explotación y de tuberías intermedias, principalmente en formaciones depresionadas con alta permeabilidad o fracturadas.

Existe además, otro tipo de 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 debajo de ella.

Se opera soltando una canica desde la superficie, la cual asienta en la zapata, impidiendo el paso a través de ella y permitiendo levantar la presión dentro de la tubería. El aumento de presión da lugar a que esta zapata empaque con la pared del agujero, 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.

2) Coples de cementación.- Se distinguen dos tipos, los empleados en una cementación primaria convencional y los utilizados en cementaciones por etapas:

a) Cople 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 guía y flotadora respectivamente. Se emplean en los mismos casos que estas zapatas pero evitando combinar cople flotador con zapata diferencial o flotadora.

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

b) Coples para cementaciones por etapas.- Los coples para cementaciones por etapas están provistos de un mecanismo que permite comunicar el interior de la tubería con el espacio anular.

Son diseñados de modo que dejen pasar los tapones de desplazamiento utilizados en la colocación de la lechada en las etapas inferiores. Se abren por medio de un dispositivo que al asentarse en el cople, permite elevar la presión ocasionando que se deslice una camisa y se establezca una 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 se realiza análogamente a una cementación primaria convencional. Cada cople se coloca en la parte inferior del intervalo que se requiera cementar.

Cálculo de la distancia necesaria entre cople y zapata.

Ejemplo: Se desea determinar la distancia necesaria entre cople y zapata, para cementar una tubería de 6 5/8 ", N-80, de 32 lb/pie en agujero de 8 3/4 " a 3000 metros de profundidad. Considerando que se emplea solo 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: 6 5/8 ", N-80 , 32 lb/pie

Diámetro exterior = 6.625 pul

Diámetro interior = 5.675 pul

Capacidad de la tubería = 61.28 m/m<sup>3</sup>

Longitud de la tubería por tramo = 9 metros

Capacidad del espacio anular = 60.42 m/m<sup>3</sup>

S O L U C I O N .-

El volumen de residuos desplazados es :

$$7.97 \times 10^{-5} \text{ di} \cdot h_{mc} \cdot L$$

Donde: di = Diámetro interior en ( pul )

$h_{mc}$  = Espesor enegarre del lodo en ( mm )

L = longitud de la tubería en ( m )

$$7.97 \times 10^{-5} \times 5.67 \times 1 \times 3000 = 1.357 \text{ m}^3$$

Longitud equivalente de la tubería es:

$V \text{ (m}^3\text{)} \times \text{capacidad de la tubería ( m / m}^3\text{ )}$

$$1.357 \times 61.28 = 83.15 \text{ m}$$

Números de tramos requeridos :

Longitud equivalente de la tubería

Longitud de tubería por tramo

$$\frac{83.15}{9} = 9.23 = \underline{10 \text{ tramos}}$$

Como el tapón desplaza  $1.357 \text{ m}^3$  de película de lodo que ocupa una longitud de 83.15 m de tubería el cople de retención se debe colocar 10 tramos arriba de la zapata. Se hace notar que -- los 10 tramos representa 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 de cemento contaminado que aumenta el volumen de los residuos solos. En vista que no es conveniente colocar cemento contaminado en el espacio anular, la distancia cople y zapata debe incrementarse hasta alcanzar un volumen igual al de la zona contaminada.

Si se colocase el cople de retención en el primer tramo,  $1.22 \text{ m}^3$  de residuos pasarán al espacio anular, alcanzando un nivel de -- 73.71 m , arriba de la zapata, lo que conduciría a una mala cementación en la parte inferior de la tubería.

3) Raspadores o limpiadores de pared.- Se utilizan para desplazar el enjarre del lodo de las paredes del agujero, 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 el segundo se fija a la pared de la tubería, accionándose con el movimiento rotario de ésta. Los raspadores comúnmente usados, consisten de un anillo metálico sobre el que se asegura un haz de alambre, 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 en la forma indicada en la figura (2a). Estos raspadores, cuando se introducen con la tubería, están expuestos a una acción menos abrasiva menos intensa que los raspadores de alambre, además presentan la ventaja de adaptarse fácilmente al diámetro real del agujero, sin ofrecer restricciones de flujo.

Debe tenerse presente que, aunque al eliminar la película de lodo se mejora la adherencia entre cemento y pared de agujero 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.

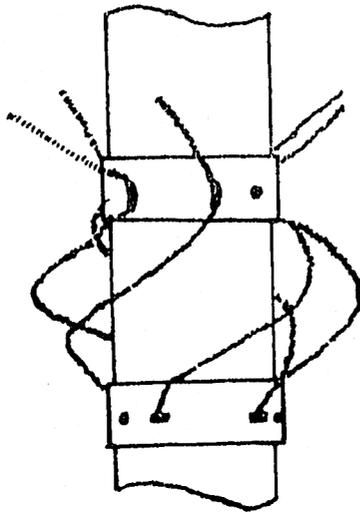
La operación de los raspadores o limpiadores se limita a cubrir los intervalos de interés, accionándolos durante la última etapa de circulación con el desplazamiento del dispersante de arcillas y antes de la colocación de la lechada de cemento.

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

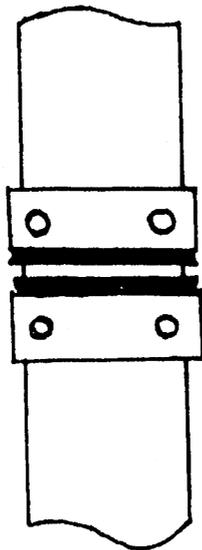
En el primer tramo tres raspadores, separados con dos collarines tope colocado a un  $1/4$  de  $L$  y  $1/2$  de  $L$ ; del segundo tramo hasta dos tramos arriba de la zona de interés, se colocarán dos raspadores, separados con un collarín colocado a  $L/2$ , siendo  $L$  la longitud de un tramo.

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 colocaran a  $1/4 L$ ,  $1/2 L$  y  $3/4 L$  y en los demás tramos a  $1/3$  y  $2/3 L$ .

4) Centradores. - Tienen por finalidad centrar la tubería en el agujero, 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.



(a)



(b)

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

La distribución de los centradores se determina en función del -  
diámetro de la tubería y el diámetro y desviación del agujero. -  
Se considera que para agujeros relativamente rectos, o sea con -  
desviaciones menores de  $2^\circ$ , una separación de 27 m es satisfac -  
toria.

La distribución de centradores en agujeros desviados se presenta  
en la Tabla II.

Por razones de seguridad, en agujeros relativamente rectos, la -  
distribución de centradores se modifica, colocando un centrador-  
por tramo para cubrir 60 m arriba y abajo de la zona de interés.

Existen en el mercado centradores de diseño especial, provistos-  
de álabes que desvían y aceleran el flujo, propiciando el esta -  
blecimiento de régimen turbulento. En esta forma, se logra des -  
plazar el lodo que ha quedado depositado en cavidades o ensancha  
mientos locales del agujero.

TABLA II.- SEPARACION ENTRE CENTRADORES PARA AGUJEROS  
DESVIADOS.

DIAMETRO DE LA TUBERIA		5-1/2"	6-5/8"	7"		
DIAMETRO DEL AGUJERO		7-7/8"	8-3/4"	8-3/4"	8-3/4"	9-7/8"
DESVIACION EN GRADOS.	SEPARACION (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	

Cálculo de centradores en pozos direccionales

$R_c$  = Carga máxima que soporta un centrador

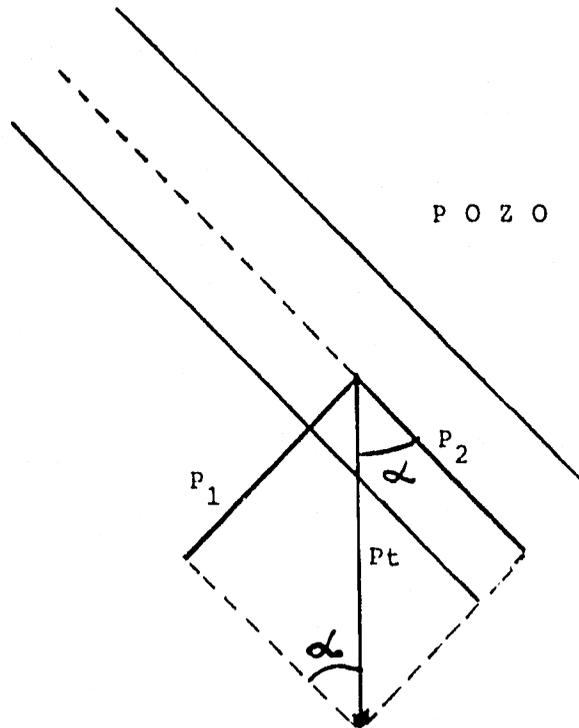
$W_{te}$  = Peso de 1 m lineal de T.R.

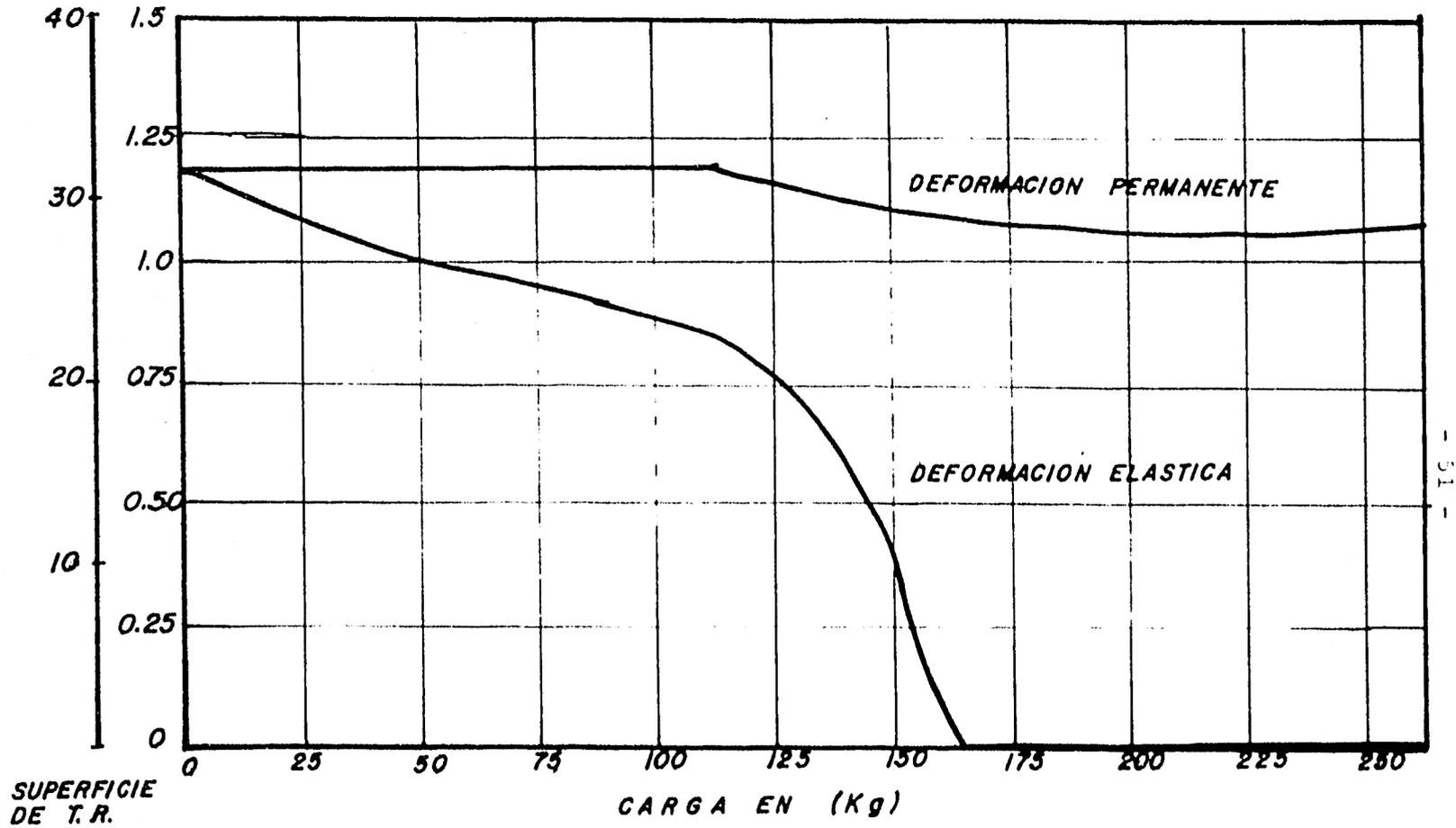
$L$  = Longitud del tramo analizado

$P_t$  = Peso de la T.R. en el tramo analizado

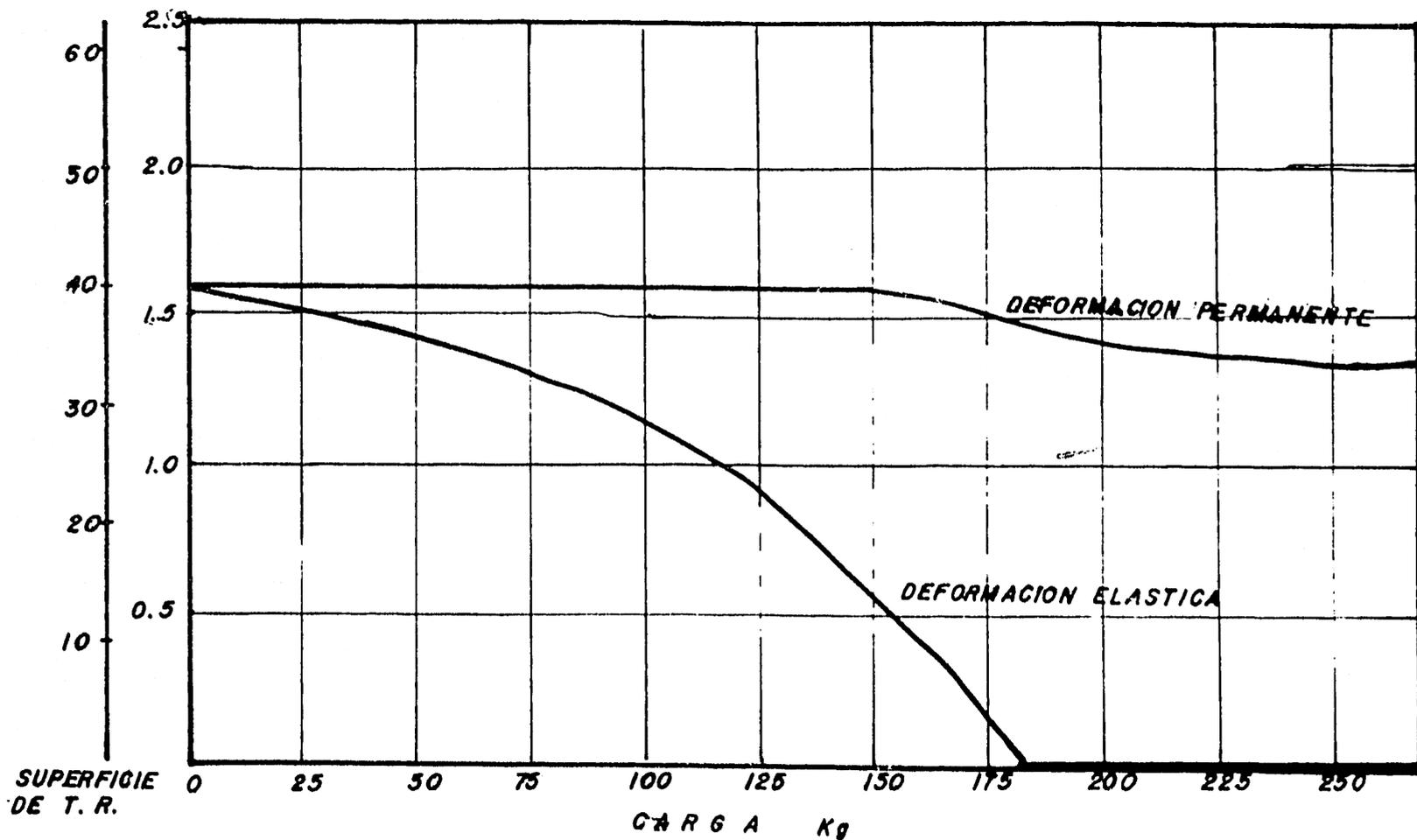
$P_1$  = Carga de la T.R. sobre la pared del pozo

$N_c$  = Número teórico de centradores





GRAFICA DE DEFORMACIONES DE LA MUELLE, SUJETA A CARGA DE UN CENTRADOR, TIPO SAE, PARA T.R. DE 6<sup>5</sup>/<sub>8</sub>" Y AGUJERO DE 8<sup>5</sup>/<sub>8</sub>" CON D.E. STANDAR DE 9".



GRAFICA DE DEFORMACIONES DE LA MUELLE, SUJETA A CARGA, DE UN CENTRADOR, TIPO SAE, PARA T.R. DE 7" Y AGUJERO DE  $9\frac{1}{2}$ "  $9\frac{5}{16}$ ". CON D.E. STANDAR DE  $10\frac{1}{4}$ "

$$P_t = W_{te} \times L$$
$$\text{Sen}\alpha = \frac{P_1}{P_t}$$

$$P_1 = P_t \text{ Sen}\alpha$$

$$N_c = \frac{P_1}{R_c} = \frac{P_t \text{ Sen}\alpha}{R_c} = \frac{W_{te} L \text{ Sen}\alpha}{R_c}$$

Carga máxima para centradores

Diámetro	Kgs.
6 5/8 "	115
7 "	115
7 5/8 "	100
9 5/8 "	150

5) Tapones de desplazamiento.- Se emplean para evitar la contaminación de la lechada de cemento con el fluido 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 lodo 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 después del fluido dispersante de arcilla. El segundo tapón, 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, 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.

6) Unidades sellantes.- Como el fraguado es un proceso exotérmico, la tubería de revestimiento sufre una dilatación y posteriormente ( una vez que el cemento ha fraguado y se restituyen las condiciones normales de temperatura dentro del pozo ) una contracción. Este fenómeno provoca que falle la adherencia entre cemento y la tubería propiciando la canalización de los fluidos producidos o inyectados. Para evitar el paso de fluido a través del espacio anular así formado, se emplean dispositivos denominados unidades sellantes, Fig (2b), que se aseguran a la tubería por medio de prisioneros ocultos. Las unidades sellantes no presentan ningún obstáculo a la cementación ya que su espesor es igual a los coples. Están provistas de copas de hule, que se sellan contra las paredes del cemento, evitando el paso de los fluidos. Deben instalarse 5 o 6 m arriba y abajo de la formación

productora.

b) Equipo Superficial.- A continuación se describen las funciones del equipo empleado en la superficie al efectuar una cementación primaria.

1) Cabeza de cementación.- Es un niple cerrado 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 enviado desde las bombas de perforación.

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

2) 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 unidad cementadora con la cabeza de cementación.

3) Mezclador.- En este depósito se efectúa la mezcla agua-cemento. 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 línea de alimentación de agua y la línea de descargar de lechada. La primera línea se une a una de las bombas de la unidad cementadora y la segunda línea descarga la mezcla de cemento a un dispositivo, del que es succionada por la otra y enviada al pozo.

Con el propósito de controlar la densidad de la lechada, ésta se determina periódicamente tomando muestra del depósito mencionado; o bien, se registra en forma continua, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que -- desplaza la lechada al pozo

4) Bombas de 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.

Acondicionamiento del pozo y del fluido de perforación.-

Esto comprende las siguientes operaciones: Limpieza de las paredes del agujero del enjarre del lodo, colocación de la tubería de revestimiento a la profundidad deseada, sin dañar las formaciones y homogenización del lodo, hasta dejarlo en condiciones para efec

tuar la cementación. La corrida de tubería en el pozo y el programa de circulación de lodo se consideran puntos claves para el acondicionamiento del pozo y lodo de perforación.

c) Colocación de la tubería de revestimiento.- Para comprender la importancia de esta operación, debe tenerse presente que las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del pozo al bajar la tubería, pueden originar pérdidas de circulación de fluidos y que la tubería se pegue debido a sedimentación de las partículas sólidas.

La presión total instantánea que actúa en el fondo del pozo, al introducir la tubería de revestimiento, es igual a la suma de: - la carga hidrostática debido al peso de la columna de fluidos en el espacio anular, las pérdidas de presión debida a la fricción entre la tubería y los fluidos (considerando que tanto la tubería como los fluidos están en movimiento) y la presión necesaria para vencer la inercia de los fluidos.

Las velocidades al bajar un tramo de tubería de revestimiento, - en un tiempo de 10 segundos, se representa por la curva (1) que aparece en la figura (3), la cual puede considerarse representativa para el caso de colocación de tubería de 6 5/8 " a profundidades mayores de 1500 m. La curva (2) corresponde a las aceleraciones correspondientes a las velocidades aludidas. Se observa - que la aceleración máxima alcanza inmediatamente después de iniciar el movimiento. Las disminuciones bruscas en la curva de acel

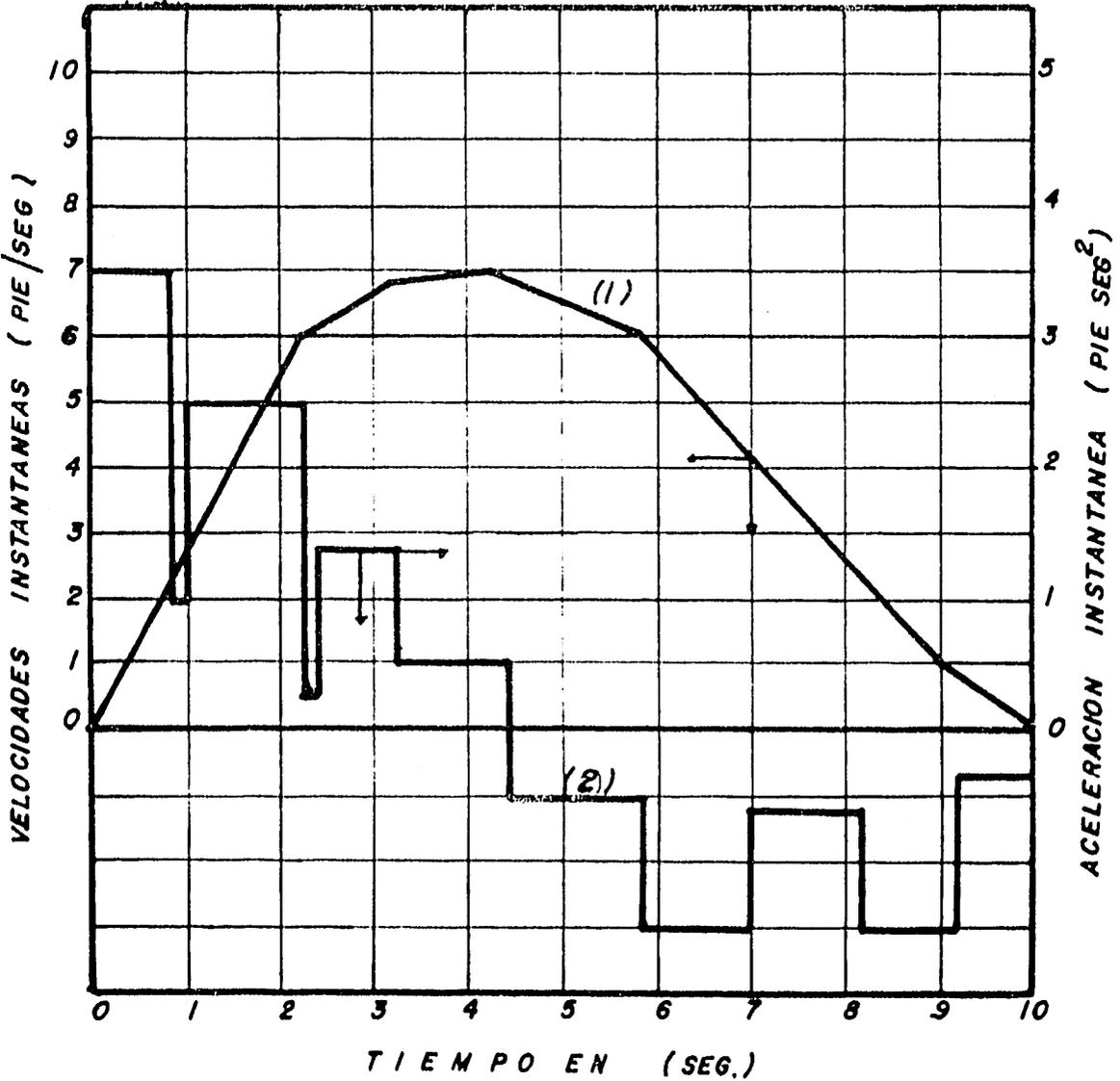


FIG. 3.- VARIACION DEL MOVIMIENTO DE UNA TUBERIA 6 5/8", RANGO 3, EN UN TIEMPO DE 10 SEG. A PROFUNDIDADES MAYORES DE 1500 m.

lización son debidas a que el operador aplica sucesivamente el freno del equipo, ocasionando cambio en las velocidades.

La velocidad sigue aumentando hasta alcanzar un máximo a los 4 segundos, instante en que, por efecto del freno, la aceleración pasa a valores negativos, dando lugar a que se reduzca hasta la detención total del movimiento al cabo de 10 segundos.

A continuación se indica, en forma de pasos, el procedimiento para determinar las presiones de fondo instantáneas desarrolladas durante la colocación de la tubería.

Procedimiento de cálculo.

1) Calculese la velocidad crítica del fluido de perforación en el espacio anular, mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{8.07M_p + 8.07 \sqrt{M_p^2 + 1.65 Y_p \rho (d_h - d_o)^2}}{d_e} \dots (4)$$

$$d_e = d_h - d_o \dots (5)$$

Donde: Vc = Velocidad crítica en ( pies/seg )

M<sub>p</sub> = Viscosidad plástica en ( cp )

Y<sub>p</sub> = Punto de cedencia en ( lbf/100 pies<sup>2</sup> )

ρ = Densidad en ( lb/pie<sup>3</sup> )

d<sub>e</sub> = Diámetro hidráulico en ( pul )

d<sub>h</sub> = Diámetro del agujero en ( pul )

d<sub>o</sub> = Diámetro externo de la tubería en ( pul )

Esta velocidad es la máxima que puede imponerse al lodo de perforación dentro de un régimen de flujo laminar.

2) Por medio de la ecuación (6) determínese la velocidad equivalente del fluido en el espacio anular y compárese con la velocidad determinada en el paso anterior con el propósito de definir el tipo de flujo prevaleciente.

$$V_e = V_t \left[ \frac{d_o^2}{d_h^2 - d_o^2} + 1/2 \right] \dots\dots\dots (6)$$

Donde:  $V_e$  = Velocidad equivalente en ( pies/seg )

$V_t$  = Velocidad de la tubería en (pies/seg)

$d_h$  = Diámetro del agujero en ( pul )

$d_o$  = Diámetro exterior en ( pul )

Si:  $V_e > V_c$ , el régimen de flujo se considera turbulento

Si:  $V_e < V_c$ , el régimen de flujo se considera laminar

La ecuación (6) se utiliza para cuantificar la velocidad ascendente de un fluido en el espacio anular, cuando la pared interna que define dicho espacio está en movimiento descendente.

3) Si el flujo es turbulento, calcúlese el No. de Reynolds para la velocidad de la tubería, empleando la ecuación (7). Si el flujo es laminar, continúese con el siguiente paso:

$$N_{Re} = \frac{396 d_e \rho V_t}{\mu_p} \left[ \frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.181 \right] \dots\dots\dots (7)$$

Donde:  $N_{Re}$  = Número de Reynolds

$\rho$  = Densidad en ( lb/pie )

$V_t$  = Velocidad de la tubería en ( pie/seg )

$\mu_p$  = Viscosidad plástica en ( cp )

$D_t$  = Desplazamiento de la tubería en ( pie<sup>3</sup>/tramo )

$L_t$  = Longitud de tubería en ( pie/tramo )

$A_p$  = Area proyectada por los coples de la tubería  
en ( pie<sup>2</sup> )

$A_a$  = Area del espacio anular en ( pie<sup>2</sup> )

Con el número de Reynolds obtenido y por medio de la figura No.-  
(4) obténgase el factor de fricción correspondiente.

4) Calcúlese las pérdidas de presión por fricción para el régi--  
men de flujo prevalecto por medio de las ecuaciones siguien--  
tes:

Para flujo turbulento:

$$P_f = \frac{1296 \times 10^{-6} f L \rho V_t^2}{d_e} \left[ \frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.181 \right]^2 \dots (8)$$

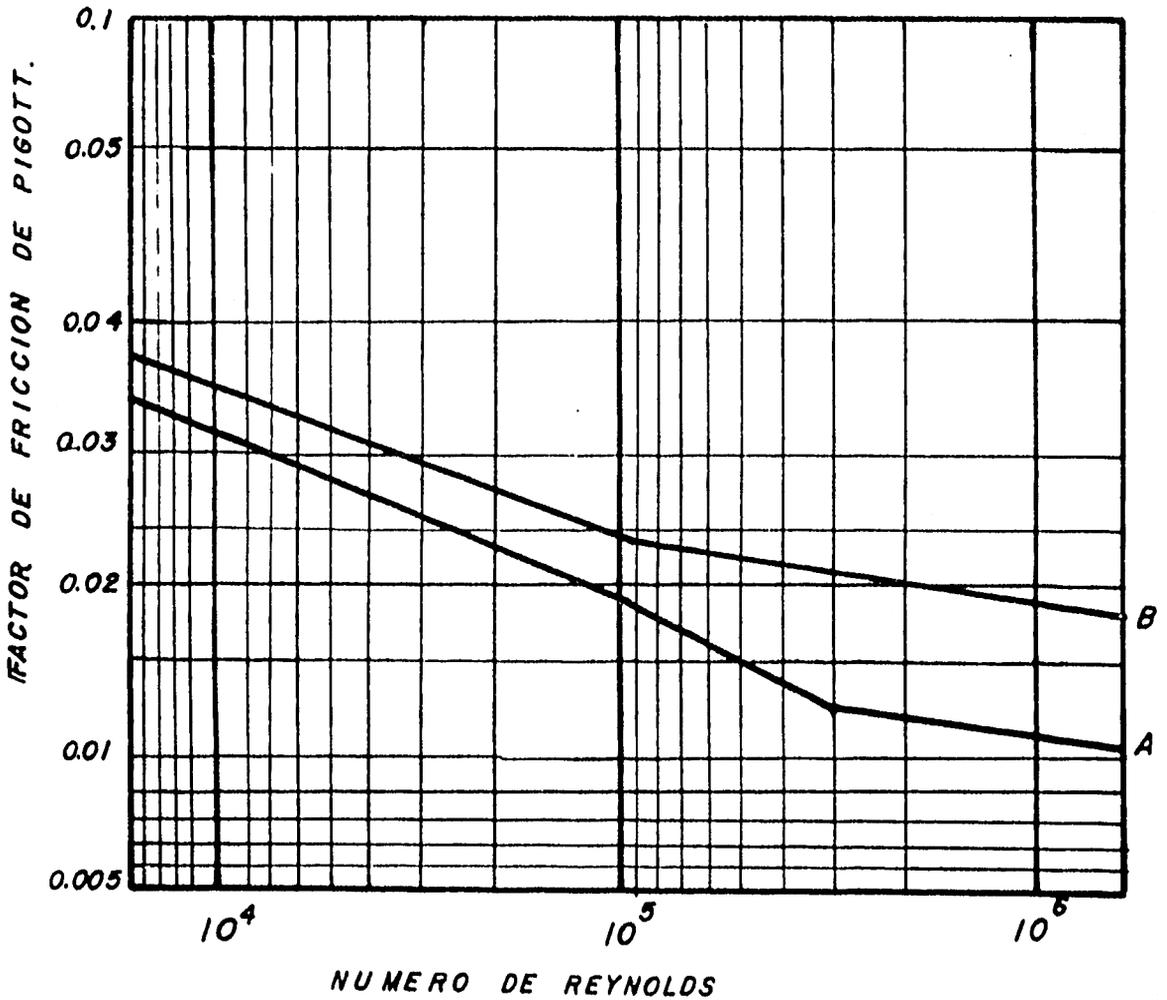
Para flujo laminar:

$$P_f = \frac{L Y_p}{225 d_e} + \frac{\mu_p L V_t}{1500 (d_h - d_o)^2} \left[ \frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} + 0.46 \right] \dots (9)$$

Donde:  $P_f$  = Pérdidas de presión por fricción en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$f$  = Factor de fricción de Fanning

$\rho$  = Densidad en ( lb/pie<sup>3</sup> )



A.- EN LA TUBERIA  
B.- EN EL ESPACIO ANULAR

FIG. 4.- FACTOR DE FRICCIÓN V.S. NUMERO REYNOLDS  
PARA USARSE CON LA ECUACION DE PIGOTT  
EN EL FLUJO TURBULENTO.

$V_t$  = Velocidad de tubería en ( pie/seg )

$D_t$  = Desplazamiento de la tubería en ( pie<sup>3</sup>/tramo )

$d_e$  = Diámetro hidráulico en ( pul )

$L$  = Longitud en ( pie )

$L_t$  = Longitud de tubería en ( pie/tramo )

$A_p$  = Area proyectada por los coples de la tubería  
en ( pie<sup>2</sup> )

$A_a$  = Area del espacio anular en ( pie<sup>2</sup> )

$Y_p$  = Punto de cedencia en ( lb/100 pie<sup>2</sup> )

$d_h$  = Diámetro del agujero en ( pul<sup>2</sup> )

$d_o$  = Diámetro exterior de tubería en ( pul )

5) Calcule la presión necesaria para vencer la inercia del lodo de perforación, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{ac} = 2155 \times 10^{-7} \rho L a_t \left[ \frac{D_t}{L_t A_a} + \frac{A_p}{A_a} \right] \dots \dots \dots (10)$$

Donde:  $P_{ac}$  = Pérdidas de presión por aceleración en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$\rho$  = Densidad en ( lb/pie<sup>3</sup> )

$L$  = Longitud en ( pie )

$a_t$  = Aceleración de la tubería en ( pie/seg<sup>2</sup> )

$D_t$  = Desplazamiento de la tubería en ( pie<sup>3</sup>/tramo )

$L_t$  = Longitud de la tubería en ( pie/tramo )

$A_p$  = Area proyectada por los coples de la tubería  
en ( pie<sup>2</sup> )

$A_a$  = Area espacio anular en ( pie<sup>2</sup> )

6) Cuantifíquese la carga hidrostática debido al peso de la columna de fluidos en el espacio anular empleando la ecuación:

$$P_{ha} = 0.007 \rho D \dots\dots\dots (11)$$

Donde:  $P_{ha}$  = Presión hidrostática en el espacio anular en  
( lb/pul<sup>2</sup> )

$\rho$  = Densidad en ( lb/pie<sup>3</sup> )

D = Profundidad en ( pie )

7) Determinese la presión total instantánea que actúa en el fondo del pozo, por medio de la ecuación:

$$P_w = P_f + P_{ac} + P_{ha} \dots\dots\dots (12)$$

Donde:  $P_w$  = Presión en el fondo del pozo en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$P_f$  = Pérdidas de presión por fricción en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$P_{ac}$  = Pérdidas de presión por aceleración en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$P_{ha}$  = Presión hidrostática en el espacio anular en  
( lb/pul<sup>2</sup> )

Ejemplo.- Cálculase la presión que actúa en el fondo de un pozo, al introducir tubería 6 5/8 ", rango 3 t provista de equipo de flotación, en agujero de 8 5/8 ".

DATOS:

Longitud por tramo de T.R. -----	40 pies
Desplazamiento por tramo -----	9.61 pie <sup>3</sup>
Densidad del lodo -----	112 lb/pie <sup>3</sup>
Punto de cedencia -----	15 lb/100 pie <sup>2</sup>
Profundidad -----	9840 pies

Considerando que la figura No. 3 es un registro típico de velocidades se tiene:

Velocidad máxima de la tubería ----- 7 pie/seg

Aceleración de la tubería -----0.5 pie/seg<sup>2</sup>

Tiempo empleado en introducir un ----- 10 seg

tramo de tubería

S O L U C I O N.-

a) Velocidad crítica del fluido de perforación

$$V_c = \frac{8.07 \times 35 + 8.07 \sqrt{35^2 + 1.65 \times 112 \times 15 \times 4}}{112 \times 2} = 5.2 \text{ pie/se}$$

b) Velocidad equivalente del fluido en espacio anular

$$V_e = 7 \left[ \frac{43.89}{30.46} + \frac{1}{2} \right] = 13.58 \text{ pie/seg}$$

$V_c < V_e$  Régimen turbulento

c) Número de Reynolds y factor de fricción

$$N_{Re} = \frac{396 \times 2 \times 112 \times 7}{35} \left[ \frac{9.61}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right] = 28740$$

De la figura No. 4 se obtiene  $f = 0.030$

d) Pérdidas de presión por fricción

$$P_f = \frac{1296 \times 10^{-6} \times 0.03 \times 9840 \times 112 \times 49}{2} \left[ \frac{9.61}{40 \times 0.1663} + 0 + 0.181 \right]^2 = 27741.460$$

$$P_f = 2771.460 \text{ lb/pul}^2$$

e) Presión necesaria para vencer la inercia del fluido de perforación.

$$P_{ac} = 2155 \times 10^{-7} \times 112 \times 9840 \times 0.5 \left[ \frac{-9.61}{40 \times 0.1663} + 0 \right] = 170.96 \text{ lb/pul}^2$$

f) Presión hidrostática.

$$P_h = 0.007 \times 112 \times 9840 = 7714.56 \text{ lb/pul}^2$$

g) Presión instantánea que actúa en el fondo del pozo.

$$P_w = 2771.46 + 170.96 + 7714.56 = 10656.98 \text{ lb/pul}^2$$

El gradiente de presión instantánea para las condiciones supuestas del problema es:

$$G_p = \frac{P_w}{D} = \frac{10656.98}{9840} = 1.08 \text{ lb/pul}^2/\text{pie}$$

Un gradiente de presión instantáneo de 1.08 lb/pul<sup>2</sup>/pie es capaz de fracturar cualquier tipo de formación como puede observarse en la figura No. 1.

El siguiente ejemplo nos ilustra el uso de la figura No. 5.

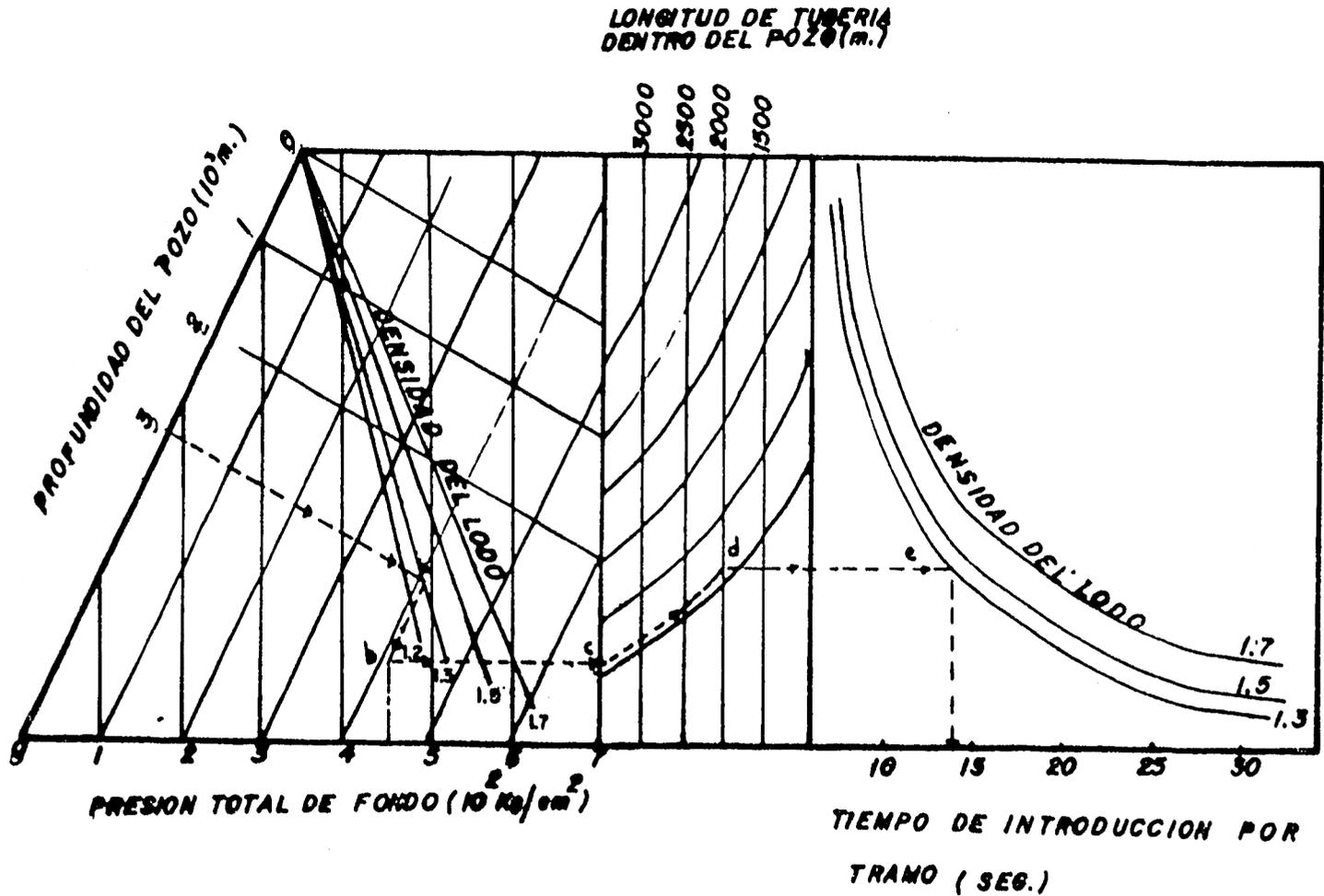
Ejemplo.- Determinar el tiempo mínimo en que debe introducirse una T.R. de 6 5/8 ", rango 3, provista de equipo de flotación, en un pozo de 8 5/8 " y 3000 m de profundidad. Longitud de tubería dentro del pozo igual 2000 m. La densidad del lodo de perforación es de 1.3 gr/cc y la presión de fractura de la formación es de 445 kg/cm<sup>2</sup>.

S O L U C I O N   G R A F I C A .

Haciendo uso de la gráfica No. 5. Con la profundidad del pozo -- (3000 m) y la densidad del lodo (1.3 gr/cc) se define el punto - (a). Desde (a) y desplazándose paralelamente al eje de profundidad, se localiza (b) en la intersección con la vertical levantada desde la presión total de fondo ( $445 \text{ kg/cm}^2$ ). Prosígase horizontalmente hasta (c) y de aquí, continúe según las curvas que - sirven como guías hasta cortar el eje de longitud de tubería dentro del pozo (2000 m), punto (d). Obtengáse (e) trazando una horizontal desde (d) hasta la densidad del lodo (1.3 gr/cc). Bajando una vertical desde (e) se determina un tiempo de introducción por tramo de 14 seg.

Procediendo en forma análoga a la descrita se obtienen los resultados siguientes:

P r o f u n d i d a d ( metros )		Tiempo mínimo de introducción por tramo.
de	a	segundos
0	1000	----- 10.0
1000	1500	----- 12.0
1500	2000	----- 14.0
2000	2500	----- 16.0
2500	3000	----- 17.0



**FIG. 5.- GRAFICA PARA DETERMINAR EL TIEMPO MINIMO POR TRAMO REQUERIDO PARA INTRODUCIR TUBERIA DE 6" EN AGUJERO DE 8" SIN FRACTURAR LA FORMACION**

Analizando las ecuaciones 8, 9, y 10, que intervienen en el cálculo de las presiones instantáneas, se observa que son directamente proporcionales a las velocidades de las tuberías en el pozo e inversamente al área de flujo del espacio anular. Por lo tanto, el problema " presiones instantáneas " puede atenuarse en tres formas diferentes:

- 1) Introduciendo la tubería en el pozo, a una velocidad inferior a la necesaria para ocasionar un gradiente de presiones instantáneas, capaz de fracturar las formaciones expuestas en el agujero.
- 2) Programando los diámetros de agujeros y tuberías de tal manera que se obtengan mayores áreas de flujo en el espacio anular.
- 3) Utilizando coples y zapatas de control de flujo o diferenciales que permiten llenar la tubería simultáneamente con su introducción al pozo. De esta manera, se disminuye el gasto medio de fluido desplazado y se reducen las pérdidas de presión por fricción.

La solución más aceptable, desde el punto de vista económico y de Ingeniería, consiste en la aplicación combinada de las formas indicadas en 1 y 3. El costo extra que origina la introducción de tubería a una velocidad adecuada y provista de zapata diferencial, está muy por debajo del ocasionado cuando surgen problemas a consecuencia de las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del pozo.

## VI.- METODOS DE DISEÑOS

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

- 1) Un desplazamiento efectivo del lodo de perforación en el espacio anular.
- 2) Una caída mínima de presión durante el desplazamiento de la lechada.
  - a) Técnica de cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento.

G.C. Howard y J.B. Clark establecieron que cuando se utiliza régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo en el espacio anular, lográndose, por consiguiente una mayor adherencia entre el cemento y la pared del agujero.

Sin embargo, debido a las altas presiones requeridas para obtener este tipo de flujo, la aplicación de esta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de presión de cementación, así como a la disponibilidad del equipo con capacidad suficiente para llevar a cabo la operación.

Se anticipa que el hecho de establecer flujo turbulento, durante la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular, no garantiza una buena eficiencia de desplazamiento, a pesar de que-

se tomen las medidas necesarias en cuanto a movimiento de la tubería y colocación de raspadores y centradores. Basta analizar la ecuación del número de Reynolds para inferir que dado un gasto fijo de desplazamiento, aunque sea bajo, es posible reduciendo la viscosidad al alcanzar régimen turbulento. La disminución de viscosidad se obtiene mediante el uso de aditivos.

Por consiguiente: lechadas de cemento con baja viscosidad, aún en régimen turbulento, conducirían a bajas eficiencias de desplazamiento, debido al fenómeno de interdigitación que tenderá a desarrollarse.

Puesto que la lechada de cemento se comporta como un fluido No-Newtoniano, la eficiencia de desplazamiento estará influenciada además, por las relaciones de puntos de cedencia de Bingham y densidades, que se mantengan, entre lechada y lodo.

Para establecer el diseño de una cementación primaria, bajo un régimen de flujo turbulento, es necesario determinar, como primer paso, la máxima presión de fondo bajo las condiciones de operación más favorables y compararla con la presión de fractura de las formaciones existentes, con el propósito de definir si es posible aplicar esta técnica. De no ser posible, se procede a aplicar la técnica de cementación bajo un régimen laminar. En el caso de que si se pueda aplicar dicha técnica se continúa el diseño cuantificando la potencia requerida en el equipo superficial de bombeo, el volumen de lechada y el tiempo de desplazamiento. Finalmente se calcula el tiempo de contacto el cuál se define co

mo " el intervalo de tiempo en que un punto de la pared del pozo permanece en contacto con la lechada de cemento, la cual está -- diendo desplazada bajo un régimen de flujo turbulento.

Procedimiento de Cálculo .

1) Determinése la velocidad crítica en el espacio anular, para -- establecer un régimen turbulento, utilizando la siguiente ecua -- ción:

$$V_c = \left[ \frac{1613 K}{\rho} \left( \frac{96}{d_e} \right)^n \right]^{\frac{1}{2-n}} \dots\dots\dots (13)$$

- Donde:  $V_c$  = Velocidad crítica en ( pie/seg )
- $K$  = Índice de consistencia en ( lbf-seg<sup>n</sup>/pie<sup>2</sup> )
- $n$  = Índice de comportamiento de flujo
- $d_e$  = Diámetro hidráulico en ( pul )
- $\rho$  = Densidad de la lechada en ( lb/gal )

$$n = 3.32 \text{ Log } \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \dots\dots\dots (14)$$

Donde:  $\theta_{600}$  = Lectura obtenida en el viscosímetro Fann en ( lb/100 pie<sup>3</sup> )

$\theta_{300}$  = Lectura obtenida en el viscosímetro Fann en ( lb/100 pie<sup>3</sup> )

$$K = N \frac{\theta_{300}}{100 \times 479^n} \dots\dots\dots (15)$$

Donde: K = Índice de consistencia

N = Constante del resorte del viscosímetro

n = Índice de comportamiento de flujo

2) Calcúlese el gasto crítico, correspondiente a la velocidad --  
obtenida en el paso anterior, por medio de la ecuación:

$$q_c = 0.154 v_c ( d_h^2 - d_o^2 ) \dots\dots\dots (16)$$

Donde:  $q_c$  = Gasto crítico en ( lts/seg )

$v_c$  = Velocidad crítica en ( pie/seg )

$d_h$  = Diámetro del agujero en ( pul )

$d_o$  = Diámetro externo de la tubería en ( pul )

3) Obtengase la velocidad del fluido dentro de la tubería de re-  
vestimiento aplicando la ecuación:

$$v = \frac{q_c}{0.154 d_i^2} \dots\dots\dots (17)$$

Donde: V = Velocidad del fluido en ( pie/seg )

$q_c$  = Gasto crítico en ( lts/seg )

$d_i$  = Diámetro interior en ( pul )

4) Determínese el factor de fricción de Fanning, para el flujo -  
en el espacio anular y dentro de la T.R. mediante la figura No.-  
(6) o utilizando la ecuación:

$$f = 0.00454 + 0.645 ( N_{Re} )^{-0.7} \dots\dots\dots (18)$$

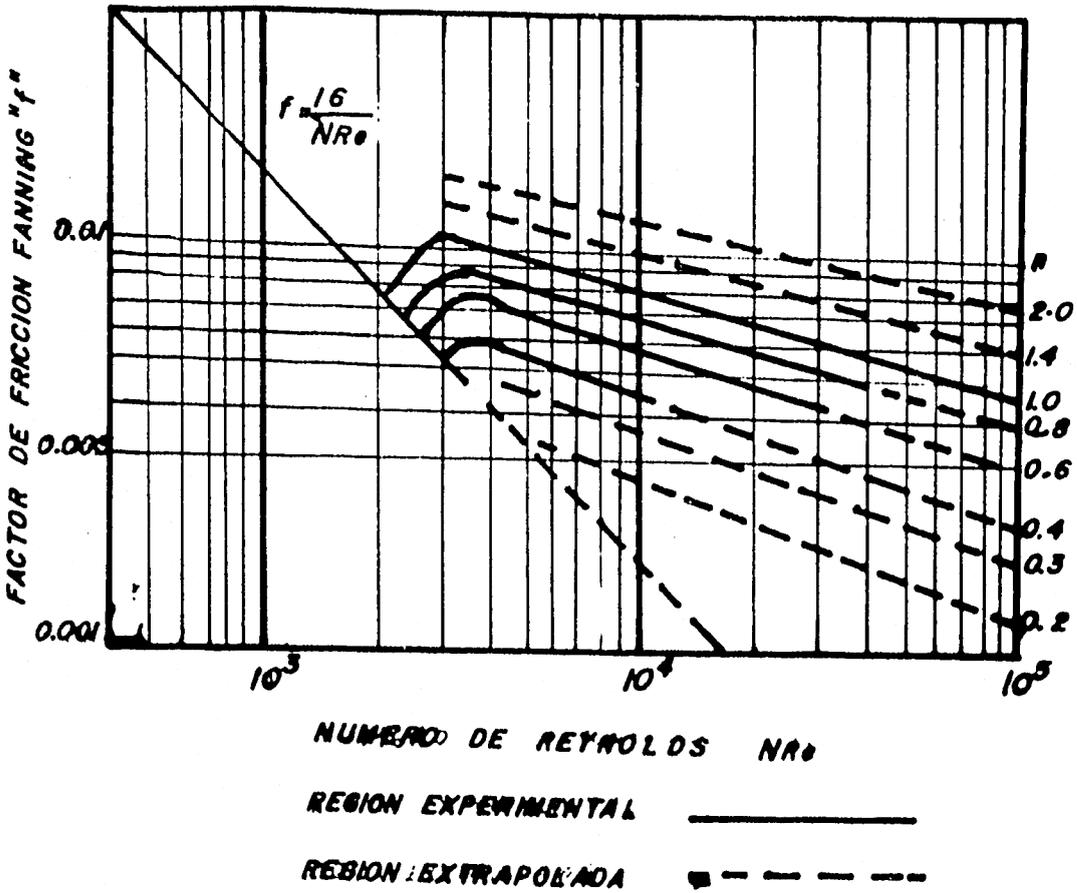


FIG. 6.- FACTOR DE FRICCION PARA FLUIDOS NO-NEWTONIANOS.

Donde:

$$N_{Re} = \frac{1.86 V^{(2-n)}}{K (96/d)^n} \dots\dots\dots (19)$$

Donde:  $N_{Re}$  = Número de Reynolds

$V$  = Velocidad en ( pie/seg )

$n$  = Índice de comportamiento de flujo

$K$  = Índice de consistencia

$d$  = Diámetro en ( pul )

5) Cálculense las pérdidas de presión por fricción, en el espacio anular y en el interior de la tubería, aplicando la ecuación:

$$P_f = \frac{f L \rho V^2}{25.8 d} \dots\dots\dots(20)$$

Donde:  $P_f$  = Pérdidas de presión por fricción en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$f$  = Factor de fricción de Fanning

$\rho$  = Densidad en ( lb/gal )

$V$  = Velocidad en ( pie/seg )

$d$  = Diámetro en ( pul )

6) Determinése la diferencia de carga hidrostática, debida a - - la diferencia de densidades del lodo de perforación y los fluidos colocados en el espacio anular mediante la siguiente ecuación:

$$P_h = 0.052 L \Delta \rho \dots\dots\dots(21)$$

Donde:  $P_h$  = Diferencia de presión hidrostática en ( lb/pul<sup>2</sup> )

L = Longitud en ( pie )

$\Delta\rho$  = Diferencia en densidades en ( lb/gal )

7) Cálculase la presión total requerida en la superficie, para -  
desplazar la lechada de cemento al espacio anular, a partir de -  
la ecuación:

$$P_s = P_{fa} + P_{ft} + P_h \dots\dots\dots (22)$$

Donde:  $P_s$  = Presión total en la superficie en ( lb&pul<sup>2</sup> )

$P_{fa}$  = Pérdidas de presión por fricción en el espacio  
anular en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$P_{ft}$  = Pérdidas de presión por fricción en la tubería  
en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$P_h$  = Diferencia de presión hidrostática en ( lb/pul<sup>2</sup> )

8) Utilizando la siguiente ecuación, se determina el gradiente -  
de presión de cementación y se compara con el gradiente de pre -  
sión de fractura de la formación.

$$G_c = \frac{P_{fa} + P_{ha}}{D} \dots\dots\dots (23)$$

Donde:  $G_c$  = Gradiente de presión de cementación en  
( lb/pul<sup>2</sup>/pie )

$P_{ha}$  = Presión hidrostática en el espacio anular en  
( Lb/pul<sup>2</sup> )

D = Profundidad en ( pie )

Si:  $G_c > G_f$  efectuese el diseño, según la técnica de flujo laminar.

Si:  $G_c < G_f$  continúese con el siguiente paso.

9) Cálculase la potencia necesaria en el equipo superficial de bombeo, para desplazar la lechada al espacio anular, mediante la ecuación:

$$H_h = 924 \times 10^{-8} P_s q_c \dots\dots\dots (24)$$

Donde:  $H_h$  = Potencia hidráulica en ( HP )

$P_s$  = Presión total en la superficie en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$q_c$  = Gasto crítico en ( lts/seg )

10) Determinése el volumen total de la lechada de cemento para alcanzar el nivel deseado dentro del espacio anular. Aumentando un 15 % del volumen calculado.

$$V_c = 0.154 \left[ L_a (d_h^2 - d_o^2) + L d_i^2 \right] \dots\dots\dots (25)$$

Donde:  $V_c$  = Volumen de lechada de cemento en ( lts )

$L_a$  = Longitud a cubrir en ( pie )

L = Longitud en ( pie )

$d_h$  = Diámetro del agujero en ( pul )

$d_o$  = Diámetro externo de la tubería en ( pul )

$d_i$  = Diámetro interno de la tubería en ( pul )

11) Cálculase el tiempo de desplazamiento necesario para colocar el cemento en el espacio anular.

$$t = \frac{V_t}{60 q_c} \dots\dots\dots (26)$$

Donde: t = Tiempo en ( minutos )

$V_t$  = Volumen total dentro de la T.R. en ( lts )

$q_c$  = Gasto crítico en ( lts/seg )

12) Cálculase el tiempo de contacto

$$t_c = \frac{V_c}{60 q_c} \dots\dots\dots (27)$$

Donde:  $t_c$  = Tiempo de contacto en ( minutos )

$V_c$  = Volumen de lechada de cemento en ( lts )

$q_c$  = Gasto crítico en ( lts/seg )

Ejemplo.- Diseñar la cementación de una T.R. de 6 5/8 " combinada de N-80 24 lb/pie y J-55 24 lb/pie, en agujero de 8 3/4 " , - en el intervalo de 1500 a 2000 m, según la técnica de flujo turbulento. El gradiente de fractura de la formación expuesta en -- el agujero es  $G_f = 0.73 \text{ lb/pul}^2/\text{pie}$ . Se dispone de los datos siguientes:

D A T O S: T.R. de 9 5/8 " , J-55 24 lb/pie cementada ---490 m.

Agujero de 8 3/4 " de ----- 490 a 2000 m.

Densidad de la lechada de cemento ----- 15 lb/gal

Densidad del lod----- 11.5 lb/gal

n de la lechada ----- 0.94  
n del lodo de perforación ----- 0.81  
K de la lechada de cemento ----0.00166 lb-seg<sup>n</sup>/pie<sup>2</sup>  
K del lodo de perforación -----0.0027 lb-seg<sup>n</sup>/pie<sup>2</sup>  
Dispersante de arcilla ----- 10 brl

S O L U C I O N . -

1) Velocidad crítica para establecer régimen turbulento en el --  
espacio anular.

$$V_c = \left[ \frac{1613 \times 0.00166 (96/2.125)^{0.94}}{15} \right]^{\frac{1}{2-0.94}} = \underline{5.6 \text{ pie/seg}}$$

2) Gasto crítico.

$$q_c = 0.154 \times 5.6 (8.750^2 - 6.625^2) = \underline{28.16 \text{ lb/seg}}$$

3) Velocidad del fluido dentro de la tubería

$$V = \frac{28.17}{0.154 (5.92)^2} = \underline{5.14 \text{ pie/seg}}$$

4) Número de Reynolds y factor de fricción

$$N_{Re} = \frac{1.86 \times 5.14^{(2-0.81)} \times 11.5}{0.0027 (96/5.921)^{0.81}} = \underline{5808}$$

Con:  $N_{Re} = 3000$  y  $n = 0.94$   $f = 0.01$

$N_{Re} = 5809$  y  $n = 0.81$   $f = 0.008$

5) Pérdidas de presión por fricción.

En el espacio anular:

$$P_{fa} = \frac{0.01 \times 1500 \times 3.28 \times 5.6^2}{25.8 \times 2.125} = \underline{140.8 \text{ lb/pul}^2}$$

En el interior de la T.R.:

$$P_{ft} = \frac{0.008 \times 2000 \times 3.28 \times 11.5 \times 5.14^2}{25.8 \times 5.921} = \underline{104.1 \text{ lb/pul}^2}$$

El proceso de cálculo se repite desde el paso (4), para determinar las pérdidas de presión por fricción debido al dispersante de arcillas y al lodo de perforación en el espacio anular, obteniéndose:

Para el dispersante de arcilla:

$$P_{fa} = \underline{6.8 \text{ lb/pul}^2}$$

Para el lodo de perforación en el espacio anular, desde el extremo inferior de la T.R. 9 5/8 ", hasta la profundidad a que se encuentra el dispersante de arcillas, las pérdidas de presión por fricción son:

$$P_{fa} = \underline{139 \text{ lb/pul}^2}$$

Y desde la superficie hasta el extremo inferior de la T.R. 9 5/8:

$$P_{fa} = \underline{60 \text{ lb/pul}^2}$$

6) Diferencia de presiones hidrostática

Entre: lodo - cemento

$$P_h = 0.052(491 \times 3.28)(15 - 11.5) = \underline{293.125 \text{ lb/pul}^2}$$

Entre: Dispersante de arcillas - lodo

$$P_h = 0.052(96 \times 3.28)(11.5 - 8.34) = \underline{51.729 \text{ lb/pul}^2}$$

Obteniéndose finalmente:

$$P_h = 293.125 - 51.729 = \underline{241.396 \text{ lb/pul}^2}$$

7) Presión total requerida en la superficie para desplazar la --  
lechada de cemento al espacio anular:

Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular

Lechada de cemento ----- 140.8 lb/pul<sup>2</sup>

Dispersante de arcillas ----- 6.8 "

Lodo de perforación -----  $\frac{199.0}{346.6} \text{ lb/pul}^2$

Pérdidas de presión en el interior de la T.R.

Lodo de perforación ----- 104.10 lb/pul<sup>2</sup>

Diferencia de presión hidrostática--  $\frac{241.396}{345.496} \text{ lb/pul}^2$

$$P_s = 346.6 + 345.496 = \underline{692.096 \text{ lb/pul}^2}$$

8) Gradiente de cementación.

Pérdidas de presión en el espacio anular

$$P_{fa} = \underline{346.60 \text{ lb/pul}^2}$$

Carga hidrostática en el fondo del pozo

Lechada de cemento ----- 1285.71 lb/pul<sup>2</sup>

Dispersante de arcilla ----- 136.50 "

Lodo de perforación -----  $\frac{2760.00}{4182.21} \text{ lb/pul}^2$

Por lo tanto:

$$G_c = \frac{-346.6 + 4182.21}{6560} = \underline{0.69 \text{ lb/pul}^2/\text{pie}}$$

Se observa que:

$G_f > G_c$  por lo tanto la técnica es factible y continúese

9) Potencia necesaria para desplazar la lechada de cemento al -- espacio anular.

$$H_h = 9.24 \times 10^{-5} \times 692.09 \times 28.17 = \underline{181.61 \text{ HP}}$$

10) Volumen de lechada.

$$V_c = 0.154(1640(76.56 - 43.89) + 29.52 \times 35.05) = \underline{8410.47 \text{ lts}}$$

$$V_c = 8410.47 + 15 \text{ \& } = \underline{9672.04 \text{ lts}}$$

11) Tiempo de desplazamiento

El volumen dentro de la T.R. es:

$$V_t = 0.154(6560 - 2952) \times 35.05 = \underline{35249.57 \text{ lts}}$$

Por lo tanto:

$$t = \frac{35249.57}{28.17 \times 60} = \underline{20.8 \text{ minutos}}$$

12) Tiempo de contacto

$$t = \frac{9672.04}{28.17 \times 60} = \underline{5.7 \text{ minutos}}$$

b) Técnica de cementación primaria bajo el régimen de flujo laminar.

En esta técnica se efectúa el desplazamiento de la lechada de cemento al espacio anular en régimen de flujo laminar. Se utiliza cuando se requiere cementar tubería a través de intervalos grandes, formaciones incompetentes o depresionadas; así como en la cementación de tuberías cortas a grandes profundidades y tuberías múltiples; o bien, cuando las características de las formaciones y equipo disponible no permiten emplear la técnica antes descrita.

#### P r o c e d i m i e n t o   d e   C á l c u l o .

El procedimiento es semejante al empleado en una cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, diferenciándose en que para flujo laminar la velocidad de desplazamiento, está definida por la ecuación (28), se determina para un número de Reynolds de 2000, considerando que la velocidad así obtenida es la máxima que puede lograrse dentro de régimen laminar. Por otra parte, no es recomendable, el uso de velocidades de desplazamiento dentro de la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, si se desarrollan turbulencias aisladas, que proporcionan la contaminación de la lechada de cemento con el lodo de perforación.

En caso de que el gradiente de presión de cementación, para la aplicación de esta técnica, resulte mayor que el de fracturamiento de las formaciones, expuestas en el pozo, el diseño deberá --

efectuarse según la técnica de cementación por etapas.

El método de cálculo para este diseño es como sigue:

1) Cálculase la velocidad máxima para mantener flujo laminar. --

Utilizando la ecuación:

$$V_c = \left[ \frac{1075 K (96/d_e)^n}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n}} \dots\dots\dots (28)$$

Donde:  $V_c$  = Velocidad crítica en ( pie/seg )

$d_e$  = Diámetro hidráulico en ( pul )

$n$  = Índice de comportamiento de flujo

$\rho$  = Densidad en ( lb/gal )

Los siguientes pasos son análogos a los empleados en el procedimiento de diseño bajo un régimen de flujo turbulento, hasta el paso (11). Las expresiones algebraicas no cambian, a excepción de los empleados en el cálculo de las pérdidas de presión por fricción que en este caso son:

Para el espacio anular:

$$P_{fa} = \frac{M_p L V_c}{1000 (d_h - d_o)^2} + \frac{L Y}{200 (d_h - d_o)} \dots\dots\dots (29)$$

Donde:  $P_{fa}$  = Pérdidas de presión por fricción en (lb/pul<sup>2</sup>)

$M_p$  = Viscosidad plástica en ( cp )

$V_c$  = Velocidad crítica en ( pie/seg )

$d_h$  = Diámetro del agujero en ( pul )

$d_o$  = Diámetro externo de la tubería en ( pul )

$L$  = Longitud en ( pie )

$Y_p$  = Punto de cedencia en ( lbf/100 pie<sup>2</sup> )

Para el interior de la tubería:

$$P_{ft} = \frac{M_p L V}{1500 d_i^2} + \frac{L Y_p}{225 d_i} \dots \dots \dots (30)$$

Donde:  $P_{ft}$  = Pérdidas de presión por fricción en ( lb/pul<sup>2</sup> )

$V$  = Velocidad en ( pie/seg )

$M_p$  = Viscosidad plástica en ( cp )

$L$  = Longitud en ( pie )

$Y_p$  = Punto de cedencia en ( lbf/100 pie<sup>2</sup> )

$d_i$  = Diámetro interno de la tubería en ( pul )

c). Técnica de cementación primaria por etapas.

La cementación primaria por etapas, consiste en la colocación selectiva del cemento en el espacio anular, a profundidades previamente determinadas, de acuerdo a las características de las formaciones existentes. Dicha colocación se logra a través de comples o juntas, diseñados específicamente, que van distribuídos - en la tubería de revestimiento de tal modo que quedan situados - en la parte inferior de cada intervalo a cementar.

Esta técnica se utiliza para cementar tuberías de gran longitud a través de formaciones cuyo gradiente de presión de fractura varía en forma irregular, o cuando no es posible efectuar la cementación en una sola etapa. También se recomienda su uso para aislar formaciones cuya distancia entre sí no permite efectuar la cementación en una sola etapa.

El método de diseño involucra determinar para cada etapa: el gradiente de presión de cementación, el volumen necesario de lechada de cemento, el tiempo de desplazamiento y la potencia requerida en el equipo superficial. Se aplicará la técnica de cementación bajo régimen de flujo turbulento o de flujo laminar según se juzgue conveniente.

d) Movimientos combinados que mejoran la cementación.

Uno de los aspectos más importantes en la perforación de un pozo es la cementación de la T.R. de explotación. La vida productiva del mismo depende de las condiciones de cementación.

Las operaciones posteriores que se realicen para corregir una cementación defectuosa, además de implicar en un costo mayor, nunca son tan eficaces como una buena cementación primaria.

Un procedimiento que Petróleos Mexicanos ha provado con éxito en el Distrito Frontera Noreste ( D.F.N.E. ), consiste en proporcionar a la T.R. una combinación de movimientos rotatorio y recíprocante simultáneos al cementarla.

El movimiento rotatorio se efectúa mediante un cabezal especial-acoplado a una unión giratoria que se acciona hidráulicamente.

El movimiento recíprocante se realiza subiendo y bajando la tubería.

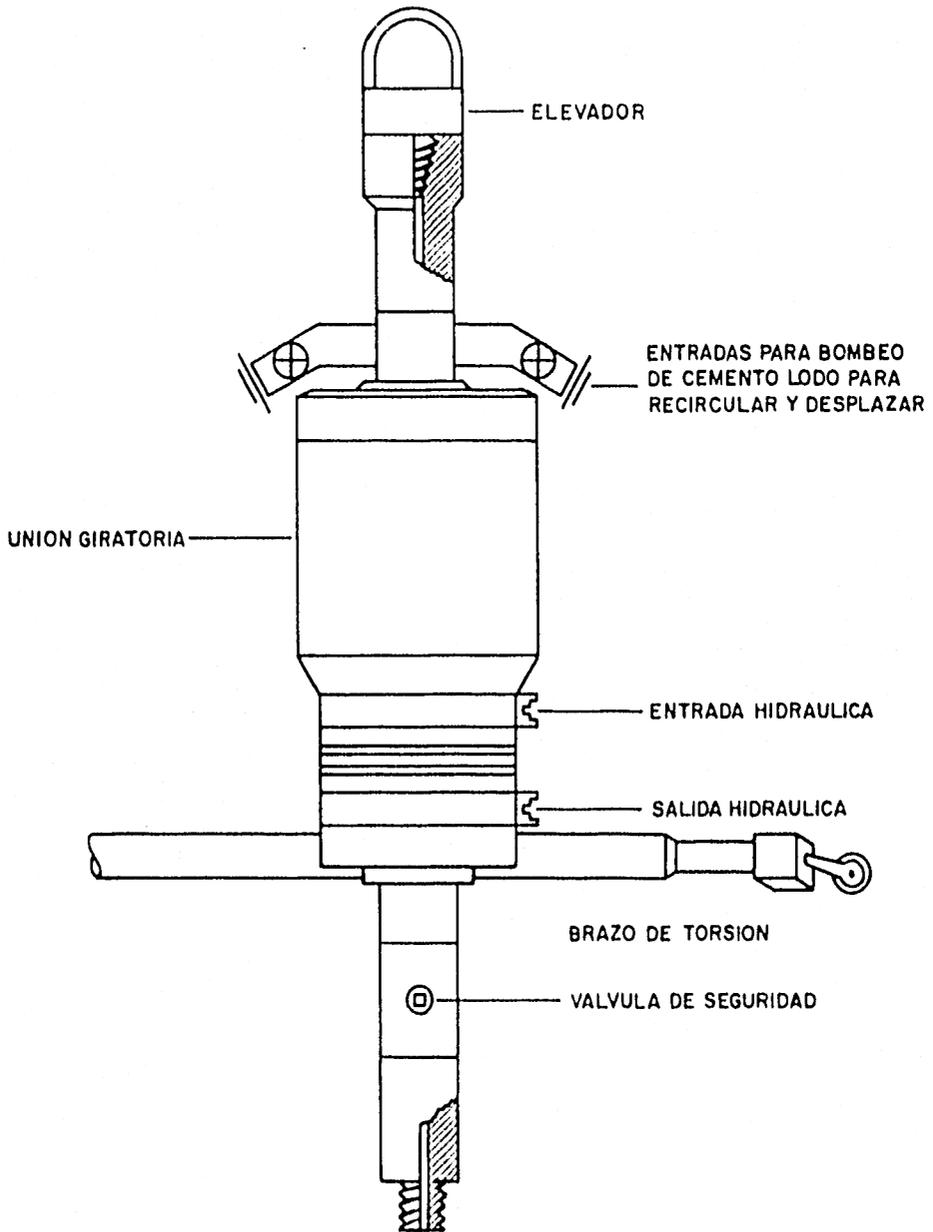
En tuberías que se corren hasta la superficie, el movimiento se continúa aún después del desplazamiento del cemento, hasta que la torsión se incrementa debido al fraguado inicial. En cementaciones de tuberías cortas, se procede de manera semejante usando colgador y herramienta soltadora especiales; la diferencia es -- que el movimiento se suspende al terminar de desplazar el cemento, para poder desconectar la citada herramienta.

El equipo que se utiliza para poder aplicar la combinación de -- movimiento es:

a) La unión giratoria.- (Figura No. 1) que consiste en una turbina accionada por presión hidráulica, la que se transmite a través de mangueras flexibles desde la unidad móvil.

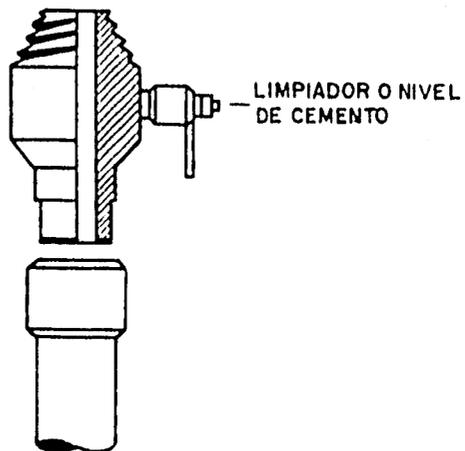
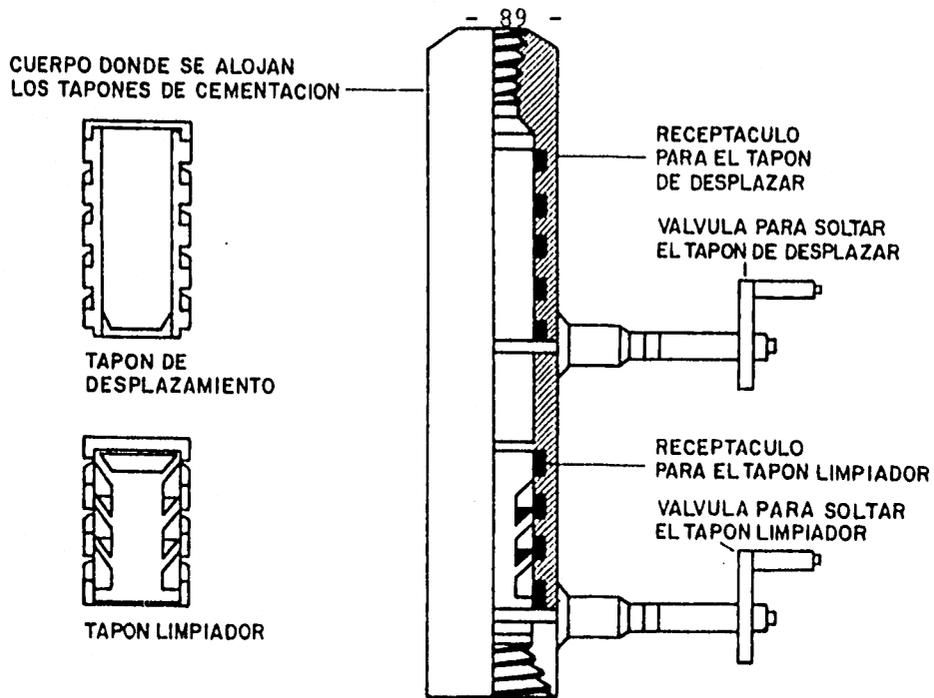
Se acciona a control remoto por una consola instalada en el piso del equipo de perforación y, para evitar que la parte superior de la unión gire al mismo tiempo que la inferior, se sujeta a -- través de un brazo a un cable tensionado, que se ubica entre el piso y uno de los travesaños de la torre; así permite que la -- unión y la cabeza suban y bajen libremente para dar el movimiento recíprocante.

En la parte superior de la unión giratoria hay dos entradas la --



UNION GIRATORIA PARA CEMENTAR

FIG No. 1



**CABEZAL DE CEMENTACION**

**FIG. No. 2**

terales a través de las cuales se conectan las mangueras para -- circular y bombear el cemento. La parte superior también tiene -- conectado un cuerpo cilíndrico que sujeta a la herramienta y sos tiene todo el peso de la tubería.

b) El cabezal de cementación ( figura No. 2 ) consta de un cuerpo cilíndrico con dos receptáculos donde se alojan los tapones de desplazamiento, el de diafragma y el sólido. En el interior se colocan unas camisas de acero intercambiables, de acuerdo con el diámetro de la T.R. a cementar, por lo que el cabezal de cementación puede servir para diferentes diámetros de tuberías.

La circulación del lodo, y posteriormente del cemento se hace -- por el exterior de la camisa. Al momento de soltar los tapones, -- las camisas se deslizan hasta un asiento especial, sellando paso de los fluidos por el exterior, originando entonces que el flujo se haga por su interior, desplazando así los tapones. En la parte inferior del cabezal hay un aditamento que levanta las camisas para eliminar el cemento que queda en su exterior y así evitar que se peguen al cuerpo de la cabeza.

C O N C L U S I O N E S .

Es importante tener en cuenta, que las propiedades de los fluidos de perforación son parte importante, para el buen desarrollo de los pozos petroleros, y en consecuencia se deben controlar para que con ello se logren buenos resultados.

Además se deben conocer todas las características físicas de las formaciones que se perforan, para que en base a éstas se desarrollen buenos programas; ya sean de perforación, terminación, reparación, etc.

El diseño de una buena técnica de cementación depende de varios factores y como en todo lo que se puede realizar se tienen limitaciones. Las limitaciones fundamentales que se tienen al efectuar una cementación primaria son: la capacidad del equipo superficial y la presión de fractura de la formación. La presión de fractura es importante conocerla ya que en base a ésta se puede escoger la técnica a utilizar. La presión de fractura de la formación no debe excederse, ya que de hacerlo, se inducirían fracturas que facilitarían la pérdida de fluidos. Estas fracturas -- pueden conducir, en caso muy extremo a la pérdida de circulación. Por lo tanto el procedimiento que debe observarse al diseñar una cementación primaria, consiste esencialmente en determinar la -- técnica que es posible aplicar bajo las limitaciones mencionadas. Se puede concluir que se tiene un buen diseño cuando la técnica empleada se realiza con el equipo disponible y sin dañar la formación.

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

- 1.- Chemistry of Portland Cement Used in oil wells  
Ludwing N. C.
- 2.- Outline of well Cementing  
Halliburton Company January 9, 1977
- 3.- Displacement Mechanics in Primary Cementing  
R.H Mc Lean, C.W. Manry and W.W. Whitaker  
Journal of Petroleum Technology
- 4.- Drilling Practices Manual  
Preston L. Moore  
The Petroleum Publishing C. Tulsa - 1974
- 5.- Mechanical Aids and Practices for Improvement of Primary  
Cementing Oil Well Cementing Practices in United States  
American Petroleum Institute  
A.H. Hilton
- 6.- Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent  
Flow Techniques  
Journal of Petroleum Technology
- 7.- Mud Flow in Drilling  
Drilling and Production Practices A.P.I.  
R.J.S. Pigott
- 8.- Improve Primary Cementing by Use of Hydraulic Analysis  
The Oil Gas Journal  
Max A. Gibbs
- 9.- Movimientos Combinados  
Ing. Carlos Lugo González