

3  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CEMENTACIONES DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO  
EN FORMACIONES CON BAJO GRADIENTE  
DE FRACTURA**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO PETROLERO**  
**P R E S E N T A**  
**WILFRIDO PEDRO BARRERA QUIJADA**

Director de Tesis:

ING. MIGUEL A. BENITEZ HERNANDEZ



MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1980



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

## INDICE

	Pag
INTRODUCCION.	
C A P I T U L O I	
CEMENTOS ESPUMOSOS	1
1.1. PROPIEDADES DEL CEMENTO ESPUMOSO.	5
1.1.A. Reología.	5
1.1.B. Tiempo de fraguado.	8
1.1.C. Pérdida de fluido.	10
1.1.D. Resistencia a la compresión.	11
1.1.E. Adherencia.	14
1.1.F. Estabilidad.	14
1.1.G. Porosidad y permeabilidad.	15
1.2. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO.	21
1.2.1. Temperatura.	21
1.2.2. Calibración del agujero.	22
1.2.3. Manejo de conexiones superficiales	

de control (preventores).	23
1.2.4. Calidad de la espuma.	23
1.2.5. Densidad de la lechada base.	24
1.2.6. Densidad de la lechada espumosa.	25
1.2.7. Uso del volumen de la lechada no nitrogenado.	25
1.3. DISEÑO DE LA LECHADA ESPUMOSA.	27
I. Diseño adecuado de la densidad de la lechada de cemento espumoso.	29
II. Diseño de la lechada de cemento espumoso estable.	30
1.4. APLICACIONES DEL CEMENTO ESPUMOSO.	34
1.4.1. Cementación primaria en formaciones con bajo gradiente de fractura.	34
1.4.2. Cementaciones forzadas en zonas agotadas.	34
1.4.3. Evitar pérdidas de circulación en zonas cavernosas.	36
1.4.4. Aislamiento térmico.	36
1.4.5. Aislamiento de zonas.	38
1.5. PREPARACION Y COLOCACION DE LA LECHADA	

DE CEMENTO ESPUMOSO.	40
1.6. OPERACION.	46
1.6.1. Técnicas de campo.	51
1.6.1.A. Densidad constante de la lechada espumosa.	52
1.6.1.B. Gasto constante de nitrógeno en la lechada espumosa.	53
CAPITULO II	
CEMENTACION FOR ETAPAS	84
II.1. Cementación en dos etapas.	85
II.2. Cementación en tres etapas.	90
II.3. Descripción del cople de cementación múltiple.	92
CAPITULO III	
EMPACADOR INFLABLE	97
III.1. Descripción.	97
III.2. Accesorios.	99
III.3. Funcionamiento del empacador inflable.	107

<b>III.4. Aplicaciones.</b>	<b>109</b>
<b>III.5. Ventajas.</b>	<b>110</b>
<b>III.6. Procedimientos generales de operación.</b>	<b>111</b>
<b>III.6.1. Cementación en una etapa.</b>	<b>111</b>
<b>III.6.2. Cementación en dos etapas.</b>	<b>114</b>
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>130</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>133</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>135</b>

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

En las cementaciones de tuberías de revestimiento en los pozos petroleros, en ocasiones se presentan condiciones difíciles en las formaciones que se van a revestir, las cuales pueden presentar bajo gradiente de fractura, pérdida de circulación entre otras.

Para la realización de una buena cementación de tuberías de revestimiento (T.R.) bajo estas condiciones se requiere de un buen diseño de una lechada de cemento, la cual debe ser de baja densidad, como la lechada de cemento espumoso, en las que se utilizan el nitrógeno líquido para conseguir su baja densidad.

La utilización del cemento espumoso para cementar en estas formaciones, nos permite minimizar el riesgo de fracturarlas en comparación a las lechadas comunes de baja densidad, en las cuales se usan grandes porcentajes de agua y aditivos ligeros.

Las cementaciones de T.R. en formaciones con bajo gradiente de fractura se pueden efectuar por me-

dio de la cementación por etapas, de esta forma se reduce el peso de la columna de lechada de cemento y por consiguiente la presión sobre la formación, previendo de no fracturarla, para esto se utiliza la herramienta copie de cementación múltiple.

Otra alternativa para llevar a cabo una cementación de tubería de ademe en estas formaciones, es con la utilización del empacador inflable, el cual forma parte de la T.R., y se colocará por arriba de la zona débil, con la función de que soporte la columna de lechada de cemento hasta que esta adquiriera consistencia evitando una posible pérdida de circulación hacia la formación.

Es posible utilizar dos o los tres métodos anteriores según el problema presentado, para realizar una buena cementación de T.R. en estas formaciones.

# C A P I T U L O I

## CEMENTOS ESPUMOSOS

Una cementación, es un proceso mediante el cual se desplaza una lechada de cemento hacia el espacio que forman la pared del pozo y la tubería de revestimiento. dicho espacio se conoce como espacio anular, evitando con ello la migración vertical de fluidos indeseables. Además de desplazar el fluido de control que se tiene en el espacio anular (e.a.), el cemento separa las formaciones que estaban comunicadas a través del agujero perforado, también soporta la tubería de ademe que se ha introducido en el pozo.

Los objetivos principales de la cementación primaria son:

- \* Aislar la formación perforada.
- \* Permitir elevar la densidad del fluido de control si se requiere.
- \* Aislar zonas de pérdida de circulación.
- \* Proporcionar soporte a las tuberías de ademe por medio de la adherencia de éstas y el agujero.

- Controlar el movimiento de fluidos: gas, aceite o agua de tal manera que no ocasionen problemas durante la perforación y terminación del pozo.

Si la presión ocasionada por la columna de cemento colocada en el e.a. excede el límite de fractura de la formación, puede ocurrir el fracturamiento de esta, llevando consigo una pérdida considerable de cemento en la formación. Esto traerá como consecuencia no llegar a los objetivos buscados de una buena cementación.

Para evitar lo anterior, se debe reducir la presión hidrostática ejercida por la columna de lechada de cemento en el e.a., esto se logrará con la reducción de la densidad de la lechada de cemento utilizando los aditivos adecuados.

Existen las lechadas extendidas con agua en las cuales se pueden alcanzar densidades de hasta 1.32 gr/cc (11 lb/gal) aproximadamente, utilizando aditivos tales como, cáscara de nuez, bentonita, tierra diatomizada, gilsonita, etc.. Esto ha sido basado en el principio de añadir un estabilizador (bentonita) a

la lechada de cemento para agregarle agua extra; esto limitará la densidad mínima por alcanzar, puesto que se incrementa el porcentaje de agua y esto se convierte en una gran dificultad para que la lechada de cemento desarrolle el esfuerzo requerido a la compresión.

Puede reducirse también la densidad de la lechada de cemento al rango de  $0.96$  a  $1.08 \text{ gr/cm}^3$  (8 a 9 lb/gal) utilizando aditivos de peso ultraligero, como son las pequeñas esferas de vidrio, las cuales utilizan aire encapsulado como agente reductor de densidad, la desventaja es que son de costo elevado debido a la gran cantidad por agregar al cemento.

Otra posible forma de reducir la densidad a la lechada de cemento, es con el uso del cemento espumoso, el cual, se ha diseñado para preparar lechadas de  $0.48$  a  $1.32 \text{ gr/cm}^3$  (4 a 11 lb/gal), capaces de desarrollar altas resistencias a la compresión en un lapso corto, aún en bajas temperaturas. El cemento espumoso es un sistema en el cual el nitrógeno ( $N_2$ ) (medio reductor de densidad) se incorpora directamente dentro de la lechada para obtener un cemento ligero y además le proporciona propiedades tixotrópicas a la lechada.

La generación de cemento espumoso en el campo, requiere el uso de lechadas de cemento normal, una fuente de gas (compresor) y la adición de un surfactante para estabilizar la espuma. La disponibilidad de este tipo de cemento, ofrece un control instantáneo de la densidad de la lechada durante la operación; regulando el gasto de gas inyectado y el gasto de la lechada de cemento, se pueden bombear lechadas espumosas a la densidad deseada.

Las propiedades físicas del cemento espumoso van a depender de su densidad y esto necesita considerarse en un diseño de operación.

## 1.1. PROPIEDADES DEL CEMENTO ESPUMOSO.

Se describirán las propiedades más comunes del cemento espumoso, dando un ejemplo de como obtenerlas en el laboratorio, además de hacer un análisis comparativo con las propiedades de un cemento normal. Algunas de las propiedades del cemento espumoso se comportan de manera diferente y otras de igual forma que las propiedades de un cemento normal.

### 1.1.A. REOLOGIA.

Las mediciones reológicas del cemento espumoso muestran que es un fluido pseudoplástico con un índice de comportamiento de flujo decreciente conforme en la calidad de la espuma el contenido de  $N_2$  se incrementa. Esto significa que la viscosidad y la densidad son inversamente proporcionales, ó sea, si la viscosidad aumenta la densidad disminuye e inversamente. Por ende las lechadas de cemento espumoso son más viscosas que las lechadas con las cuales son preparadas. Matemáticamente, este comportamiento es

referido a un incremento estable del valor de  $K'$  a medida que más gas se estabiliza en la lechada espumosa.

El valor de  $n'$  disminuye, lo que indica un esfuerzo de corte constante.

El cemento espumoso exhibe un comportamiento reológico similar al de las espumas normales.

La reología de las espumas es compleja, depende principalmente del contenido de gas, del tamaño de las burbujas, de la existencia de fuerzas gelificantes entre las partículas sólidas en la espuma, del tipo de concentración del surfactante.

Medidas reológicas de un cemento espumoso tipo "H" fueron realizadas para diferentes calidades de cemento espumoso, estas fueron efectuadas en un viscosímetro Fann. Tabla 1-1. La densidad deseada se obtuvo por entrada de aire en una mezcladora.

Los resultados de estas pruebas indican una respuesta relativa, no lineal, de propiedades reológicas con densidad variable.

T A B L A 1-1 REOLOGIA DE UN CEMENTO ESPUMOSO TIPO "H".

Densidad [lb/gal]	$n'$	$k'$ [lb.seg/pie <sup>2</sup> ]	$V_p$ [lb.seg/pie <sup>2</sup> ]	$Y_p$ [lb/100 pie <sup>2</sup> ]
7.07	0.627	0.021	42	66
7.24	0.750	0.009	48	66
8.42	0.747	0.012	70	62
11.51	0.757	0.008	67	25
15.70	0.703	0.056	24	3

T A B L A 1-II COMPARACION DEL TIEMPO DE FRAGUADO ENTRE UN CEMENTO SIN ESPUMAR Y UNO ESPUMOSO.

TIPO DE CEMENTO	AGUA (%)	DENSIDAD DEL CEMENTO ESPUMOSO [LB/GAL]	TIEMPO DE FRAGUADO CEMENTO ESPUMOSO [HRS:MIN]	TIEMPO DE FRAGUADO CEMENTO SIN ESPUMAR A 40 LB/PG <sup>2</sup> [HRS:MIN:G]
H	46	7.4	7:55	8:40
G	44	7.6	3:07	2:30
C	56	7.2	1:59	3:01

#### 1.1.B. TIEMPO DE FRAGUADO

El comportamiento de los aditivos agregados a un cemento espumoso es similar al obtenido al agregar estos a una lechada de cemento normal. Por ejemplo el cloruro de calcio (CaCl) acelera el fraguado, mientras que la harina sílica tiene poco efecto, y el lignosulfonato de calcio puede inhibir o retardar el fraguado del cemento si se agrega una sobre dosis.

El porcentaje de agua tanto para cementos espumosos como para un cemento normal tiene un efecto importante para el fraguado.

En el laboratorio mediante dos pruebas diferentes se determinó el tiempo de fraguado para cementos espumosos. En la primera se utilizó una lechada sin espumar, de acuerdo a procedimientos de pruebas API en un consistómetro presurizado, bajo una presión de 40 lb/pg<sup>2</sup> durante toda la prueba.

Para la segunda prueba se utilizó una lechada espumosa, utilizando un consistómetro modificado, manteniendo una presión de 40 lb/pg<sup>2</sup> constante.

De los resultados obtenidos de estas pruebas se concluye que el espumar una lechada provoca un pequeño efecto en el tiempo de fraguado. Tabla I.II.

### 1.1.C. PERDIDA DE FLUIDO.

Los mismos aditivos que se utilizan en cementos normales para el control de la pérdida de fluido se utilizan para cementos espumosos. En una prueba con cemento tipo "G", con 0.7% de aditivos comunes para evitar la pérdida de fluido, con 44% de agua, a una temperatura de 27° C (80° F), se midieron los valores API de pérdida de fluido, usando celdas normales de pérdida de fluido. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 1.III, los cuales muestran una disminución de fluido conforme la densidad disminuye.

En lechadas de cementos espumosos, la única forma de pérdida, esta alrededor de la burbuja de N<sub>2</sub>. Mientras la densidad decrece, se incrementa más el área de superficie de las burbujas, de este modo se incrementa la distancia que el fluido debe viajar para dejar la lechada. Este efecto es visto como una disminución en la pérdida de fluido.

T A B L A 1.III PERDIDA DE FLUIDO COMO UNA FUNCION DE LA DENSIDAD.

DENSIDAD DE LA LECHADA [LB/GAL]	% A D I T I V O S		
	PERDIDA DE FLUIDO	ESPUMANTE	API PERDIDA DE FLUIDO
15.2	0.7	0.75	206
12.1	0.7	0.75	182
10.6	0.7	0.75	151
8.1	0.7	0.75	129

1.1.D. RESISTENCIA A LA COMPRESION.

El cemento espumoso puede ser perforado con seguridad bajo todas las condiciones normales de los pozos petroleros, ya que desarrolla una gran resistencia a la compresión.

Se han realizado pruebas para examinar el ce

mento espumoso cuando se realiza la operación de los disparos, y estas demostraron que éste podía ser perforado siempre y cuando su porosidad no se excediera del 40% aproximadamente. A porosidades más altas, la ruptura alrededor de las perforaciones será excesiva.

En cementos normales de baja densidad (10-15 lb/gal), es común la disminución de la resistencia a la compresión, al contrario de los espumosos que presentan resistencias a la compresión hasta de 500 lb/pg<sup>2</sup>, con permeabilidades menores de 20 md, a temperaturas bajas. Esto se debe principalmente a la baja densidad del gas, lo que se refleja en el uso de pequeños volúmenes de cemento para tener reducción de su densidad. La ausencia de esos volúmenes adicionales en el cemento espumoso da como resultado un cemento más resistente.

Cuando un cemento desarrolla 500 lb/pg<sup>2</sup> de resistencia a la compresión, es considerada su eficiencia para sostener la tubería de ademe y continuar las operaciones.

En el laboratorio se determino la resistencia a la compresión de cementos espumosos de diversas densidades. Para lograr estas densidades se utilizó un mezclador de vibraciones por admisión de aire. La composición de cada una de estas lechadas consistió de cemento puro y 0.75% de agente espumante. Para las pruebas se utilizaron cementos API tipo C, H y G. Figuras 1.D.1, 1.D.2, 1.D.3..

De esta prueba resultó, que los tres tipos de cemento desarrollaron por lo menos una resistencia a la compresión de  $500 \text{ lb/pg}^2$  en 24 Hrs., con una densidad de  $0.84 \text{ gr/cc}$  ( $7 \text{ lb/gal}$ ). Las resistencias a 8 y 12 Hrs., fueron significativamente más bajas para densidades de  $7 \text{ lb/gal}$  excepto para el cemento tipo "G", el cual obtuvo una resistencia a la compresión de  $512 \text{ lb/pg}^2$ , esta diferencia es causada por el molido más fino.

En las figuras se puede observar que entre mayor es la densidad, se desarrolla más rápido la resistencia a la compresión, suficiente para reanudar

las operaciones.

Para determinar la resistencia a la compresión se necesitan datos tomados de un registro sónico de cementación y la utilización de la figura 1.D.4..

#### 1.1.E. ADHERENCIA.

Los mismos factores que afectan la fuerza de adherencia en los cementos convencionales, también afectan y de la misma forma la adherencia en los cementos espumosos.

Si se realiza una buena remoción del lodo y un diseño adecuado de la lechada se obtendrá una mejor adherencia de cualquier cemento.

#### 1.1.F. ESTABILIDAD.

El surfactante utilizado para ayudar a generar y a estabilizar el cemento espumoso, debe ser efectivo a altas presiones y temperaturas en un medio altamente alcalino con contenido de calcio en la fase agua de la lechada de cemento.

### 1.1.G. POROSIDAD Y PERMEABILIDAD.

Las limitaciones prácticas para dar un cemento espumoso con una permeabilidad de 1.0 md ó menos, es aproximadamente de 0.84 gr/cc (7 lb/gal). En densidades más bajas que ésta, la resistencia a entradas de cualquier fluido son inaceptables.

La permeabilidad de los cementos espumosos viene a ser un valor crítico para propósitos de diseño cuando las densidades son muy bajas.

En el laboratorio se llevo a efecto una prueba donde se curaron muestras de cemento puros con 0.75% de agente espumante a una temperatura de 80° F (27° C) durante 24 Hrs., posteriormente se midio su permeabilidad al aire, resultando los valores mostrados en la tabla 1.IV.

El cemento espumoso curado apropiadamente y con una porosidad menor del 40% tiene una permeabilidad menor a 1.0 md.

VARIACION DEL ESFUERZO COMPRESIVO CON LA  
DENSIDAD (Cemento clase H)  
(140 ° F)

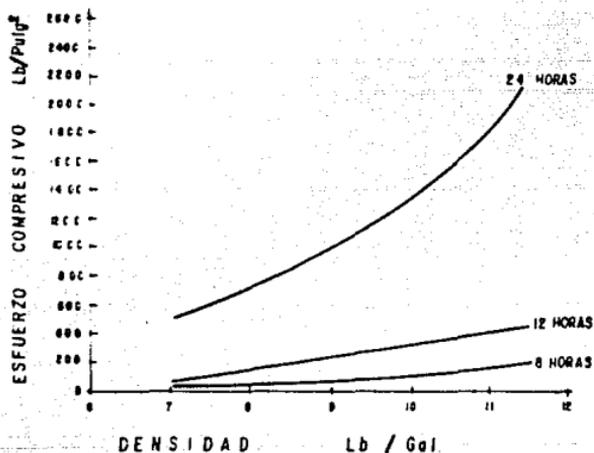


FIG. I. D. I

VARIACION DEL ESFUERZO COMPRESIVO CON  
LA DENSIDAD (Cemento clase 6)  
(140 ° F)

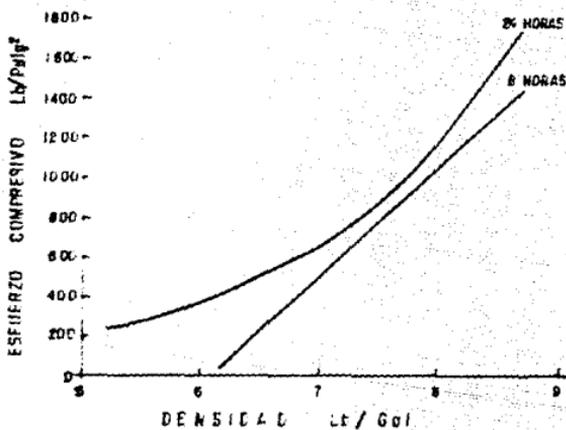
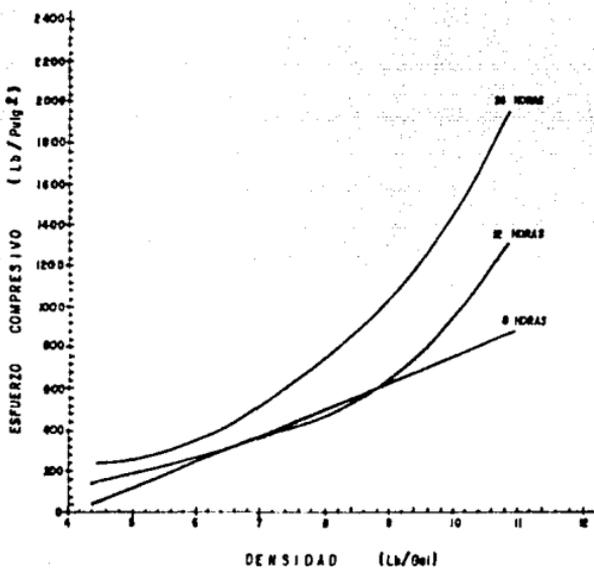
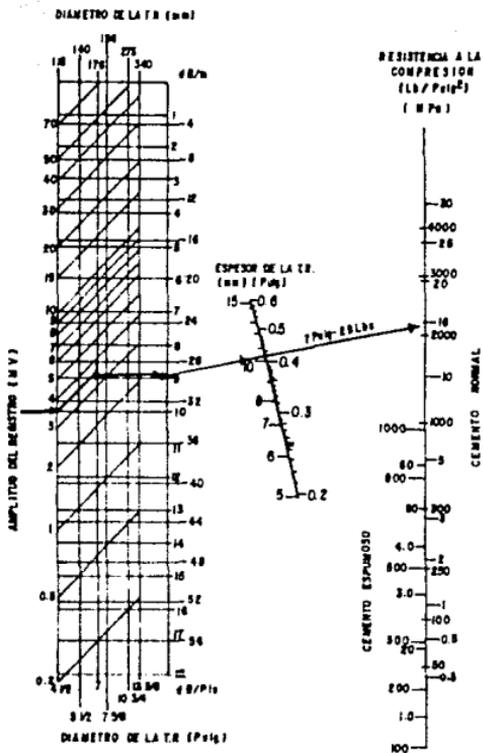


FIG. I. D. 2



VARIACION DEL ESFUERZO COMPRESIVO CON LA DENSIDAD  
(Cemento clase C, a 140°F)

FIG. I. D. 3.



CARTA DE INTERPRETACION DEL REGISTRO SONICO DE CEMENTACION  
 (HTTA. Centrada, espaciamento de 3 Pie. [0.914 m]).

FIG. I. D. 4

TABLA 1.IV. VARIACION DE LA PERMEABILIDA DEL CEMENTO  
CON RESPECTO A LA DENSIDAD.

P E R M E A B I L I D A D (md)			D E N S I D A D
TIPO C	TIPO G	TIPO H	[lb/gal]
129.00	3.50	116.00	6
1.20	0.13	0.08	8
0.05	0.02	0.05	10
<0.01	<0.01	<0.01	Cemento sin espumar

## 1.2 FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO.

### 1.2.1 TEMPERATURA.

Es muy importante conocer la presión que ejerce la columna de cemento espumoso después del desplazamiento, al igual que la temperatura de la columna antes de su fraguado, para poder calcular la cantidad de  $N_2$  que se utilizará. Se recomienda usar más  $N_2$  que la cantidad teórica basada únicamente en la presión y en la temperatura. Por esta razón se sugiere asumir una temperatura menor que la temperatura real promedio, por lo que se incluye un pequeño exceso de  $N_2$  en el cálculo.

$$T = \frac{(T_f - 80^\circ\text{F}) (H_T^{\text{CCE}})}{H_T} + 80^\circ\text{F}$$

Donde:

$H_T$

+ 80°F

$T$  = Temperatura en el centro de la columna de cemento. [°F].

$T_f$  = Temperatura de fondo. [°F].

## 1.2 FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO.

### 1.2.1 TEMPERATURA.

Es muy importante conocer la presión que ejerce la columna de cemento espumoso después del desplazamiento, al igual que la temperatura de la columna antes de su fraguado, para poder calcular la cantidad de  $N_2$  que se utilizará. Se recomienda usar más  $N_2$  que la cantidad teórica basada únicamente en la presión y en la temperatura. Por esta razón se sugiere asumir una temperatura menor que la temperatura real promedio, por lo que se incluye un pequeño exceso de  $N_2$  en el cálculo.

$$T = \frac{(T_f - 80^{\circ}\text{F}) (H_{\text{CCE}})}{H_T} + 80^{\circ}\text{F}$$

Donde:

$T$  = Temperatura en el centro de la columna de cemento. [ $^{\circ}\text{F}$ ].

$T_f$  = Temperatura de fondo. [ $^{\circ}\text{F}$ ].

$H_T$  = Profundidad total. [pies].

$H_{CCE}$  = Profundidad en el centro de la columna de cemento espumoso. [pies].

En ocasiones se tendrá que considerar más de una temperatura, esto cuando se tengan pozos con alto gradiente de temperatura y/o columnas grandes de cemento espumoso. Una vez decidido el número de temperaturas diferentes a considerar, la columna de cemento se divide en intervalos de 1000 a 1500 pies, o menores.

#### 1.2.2. CALIBRACION DEL AGUJERO.

Es muy importante tomar un registro de calibración del agujero antes de cada trabajo, con el fin de poder calcular el volumen de cemento espumoso necesario para la cementación de la T.R.. La determinación del diámetro del agujero se puede obtener con el calibrador.

### 1.2.3. MANEJO DE CONEXIONES SUPERFICIALES DE CONTROL (PREVENTORES).

Con el objeto de prevenir un descontrol del pozo, se requiere tener la capacidad para cerrar el preventor y así manejar la circulación a través de la línea de matar, manteniendo la contrapresión de ser necesario. En ocasiones se debe dejar contrapresión en el g.a. mientras se opera el preventor.

### 1.2.4. CALIDAD DE LA ESPUMA.

La calidad de la espuma es la relación que existe entre el  $N_2$  de la espuma y el volumen total del cemento espumoso. La máxima calidad de la espuma posible es del 52%, esto significa que el 52% del volumen total de la lechada puede estar ocupado por pequeñas burbujas aisladas de gas.

La calidad de la espuma en un diseño de una lechada espumosa que será utilizada en una cementación primaria de T.R., no debe exceder del 40% y menos cuando el cemento espumoso se vaya a utilizar en una zona que será disparada.

### 1.2.5. DENSIDAD DE LA LECHADA BASE.

La densidad de la lechada base utilizada para un cemento espumoso, afecta directamente a la cantidad de  $N_2$  requerida para alcanzar la densidad necesaria de la lechada espumosa y las propiedades del cemento espumoso ya fraguado.

Esta densidad base nos va ha ser util para reducir la cantidad de  $N_2$  requerida, sin embargo, debido al alto contenido de agua, reduce el esfuerzo de cohesión e incrementa la permeabilidad del cemento espumoso.

La densidad de la lechada base dependerá de la aplicación que se le dará:

Si una lechada base tiene una densidad de 1.90 gr/cc (15.8 lb/gal), esta puede utilizarse para una cementación primaria de T.R. en una zona crítica con la cual se obtendrá una baja permeabilidad. Una lechada base con densidad de 1.70 gr/cc (14.4 lb/gal) puede ser utilizada para sellar zonas de pérdida de circulación, obteniendo propiedades adecuadas de fraguado.

### 1.2.6. DENSIDAD DE LA LECHADA ESPUMOSA.

La densidad del cemento espumoso se calcula tomando en consideración los gradientes de fractura de cualquiera de los intervalos de pérdida de circulación y el peso del lodo utilizado para mantener una circulación total.

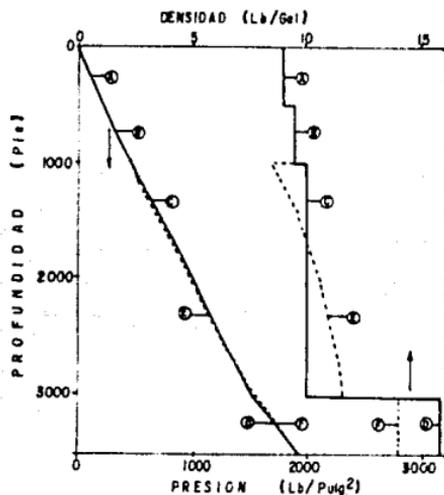
El rango de la densidad de un cemento espumoso es de 0.84 a 1.32 gr/cc (7 a 11 lb/gal).

Se puede diseñar una lechada de cemento espumoso con densidad constante ó densidad variable, la primera es la más recomendada debido a que permite un mejor control de la operación y de la presión hidrostática (ver figura 1.2.6.A.).

### 1.2.7. USO DEL VOLUMEN DE LECHADA NO NITROGENADO.

Se recomienda bombear un volumen de lodo, espaciador ó cemento no nitrogenado de 500 pies<sup>3</sup>, cuando se requiera circular cemento hasta la superficie.

## PRESION Y DENSIDAD VS PROFUNDIDAD DEL POZO



- A) DENSIDAD DEL LODO 9 Lb/Gal.
- B) DENSIDAD DEL ESPACIADOR 9.5 Lb/Gal
- C) DENSIDAD CONSTANTE DEL CEMENTO ESPUMOSO 10 Lb/Gal.
- D) CEMENTO DE ALTA DENSIDAD 15.8 Lb/Gal.
- E) DENSIDAD DEL CEMENTO ESPUMOSO 8.4 - 11.8 Lb/Gal
- F) DENSIDAD DEL CEMENTO NORMAL 14.0 Lb/Gal.

**FIG. I. 2. 6. A.**

### 1.3. DISEÑO DE LA LECHADA ESPUMOSA.

Para obtener una buena circulación y colocación de la lechada espumosa, con la densidad programada, donde existen posibles problemas de pérdida de circulación debe hacerse un diseño cuidadoso de la lechada.

Deben tomarse en cuenta entre otras las siguientes consideraciones, los cambios continuos de presión y temperatura y los esfuerzos de corte a los que están sometidos los fluidos dentro del pozo.

Con las pruebas de laboratorio se obtendrán datos precisos para la correcta ejecución de la operación. Un resumen de las consideraciones generales del diseño son:

- A. Profundidad del pozo.
- B. Antecedentes.
- C. Gradientes de fractura en zonas frágiles.
- D. Localización de zonas de pérdida.
- E. Temperatura estática y de circulación.

- F. Temperatura de formación.
- G. Volumen de agujero.
- H. Espaciadores.
- I. Necesidades de contrapresión en el e.a.
- J. Unidad mezcladora, densímetro y medidores de flujo.
- K. Válvula check.
- L. Unidad de  $N_2$ , gasto y presión de  $N_2$  y equipo de control.
- M. Surfactantes, bombas y medidor de gasto de éste.
- N. Generador de vapor, toberas de medición, conexión múltiple, niples y adaptadores.
- ñ. Equipo de transporte de cemento (trompos).
- O. Agua dulce.
- P. Espacio suficiente en la localización.
- Q. Fluido de desplazamiento.
- R. Líneas de retorno y desvío.
- S. Sistemas de estrangulación del e.a.
- T. Movimiento mínimo de la T.R.
- U. Precaución al colgar la T.R. en cuñas.

Se tienen dos criterios para realizar un diseño adecuado de la lechada de cemento espumoso.

#### 1. DISEÑO ADECUADO DE LA DENSIDAD DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO.

Para determinar el gasto de gas necesario para una operación, es muy importante conocer la presión de fondo a la cual va a ser sometida la lechada de cemento, esta es la información más importante que se requiere para obtener la densidad adecuada de la lechada de cemento espumoso. Los factores en segundo término para el logro de esta son, la temperatura de operación y longitudes de los intervalos. Es necesario también, determinar volúmenes anulares exactos para un buen desarrollo de trabajo.

El lodo en el pozo proporciona una presión hidrostática limitante con la cual el cemento espumoso puede comprimirse. En la tabla 1.3.1. se muestran los pies cúbicos de  $N_2$ /bl de lechada de cemento para preparar una lechada de cemento espumoso de una densidad de

0.96 gr/cc (8 lb/gal) a partir de una lechada de cemento normal de 1.92 gr/cc (16 lb/gal), varía drásticamente como función de la profundidad o la presión de fondo. Será importante tener una variación exacta de esta presión. Fig. 1.3.A.

## II. DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO ESTABLE.

Para lograr un cemento espumoso estable se requiere de:

a) La lechada se introduce en un aparato mecánico generador de espuma, que le imparta suficiente energía y acción de mezclado, con gas presurizado para preparar burbujas de gas uniformes y de tamaño adecuado.

Sin suficiente entrada de energía, resultarán burbujas de gas más grandes, incrementando la permeabilidad y disminuyendo la resistencia a la compresión del cemento fraguado.

Se entiende por estabilidad del diseño, a la

capacidad de la lechada para aceptar la entrada de gas a una densidad predeterminada y una agitación constante.

La lechada así preparada, es esencialmente estable, de forma tal, que el gas no coalesce ni se separa del cemento, esto si la lechada permanece bajo ciertas condiciones de presión, para la cual fue diseñada.

b) Para la creación del elemento esencial de la espuma estable, es necesario tener presente un surfactante (espumante) y un estabilizador de espuma eficiente en la lechada de cemento.

Es muy importante la selección del surfactante productor de espuma, su composición química afecta el volumen del gas liberado, la naturaleza física y el esfuerzo a la compresión del cemento espumoso. Además la lechada de cemento debe tener alta tolerancia al Ca y al PH alto.

TABLA 1.3.1. VOLUMEN DE GAS REQUERIDO COMO FUNCION  
DE LA PROFUNDIDAD (PRESION).

Densidad superficial de la lechada = 16.0 lb/gal. Densidad de la lechada espumosa = 8.0 lb/gal.	
PROFUNDIDAD [PIE]	Pies <sup>3</sup> estandar de N <sub>2</sub> por Bl de lechada a condiciones de su- perficie.
0	6
10	7
12	9
50	13
100	21
200	37
500	85
1000	165
2000	333
5000	859
10000	1590

REQUERIMIENTOS DE  $N_2$  PARA PREPARAR 8.5 Lb/Gal.  
DE CEMENTO ESPUMADO

(Pies cúbicos estándar de  $N_2$  por barril de una lechada  
de cemento de 14.8 Lb/Gal.)

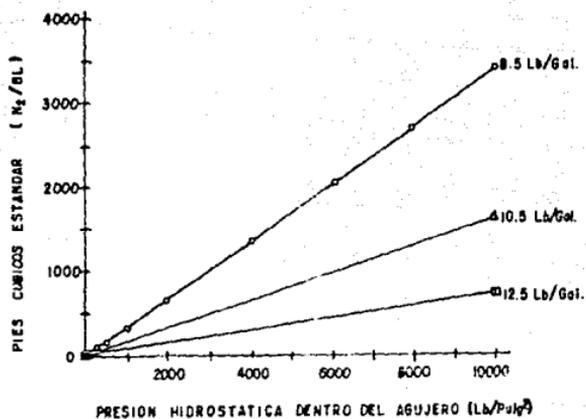


FIG. I. 3. A

## 1.4. APLICACIONES.

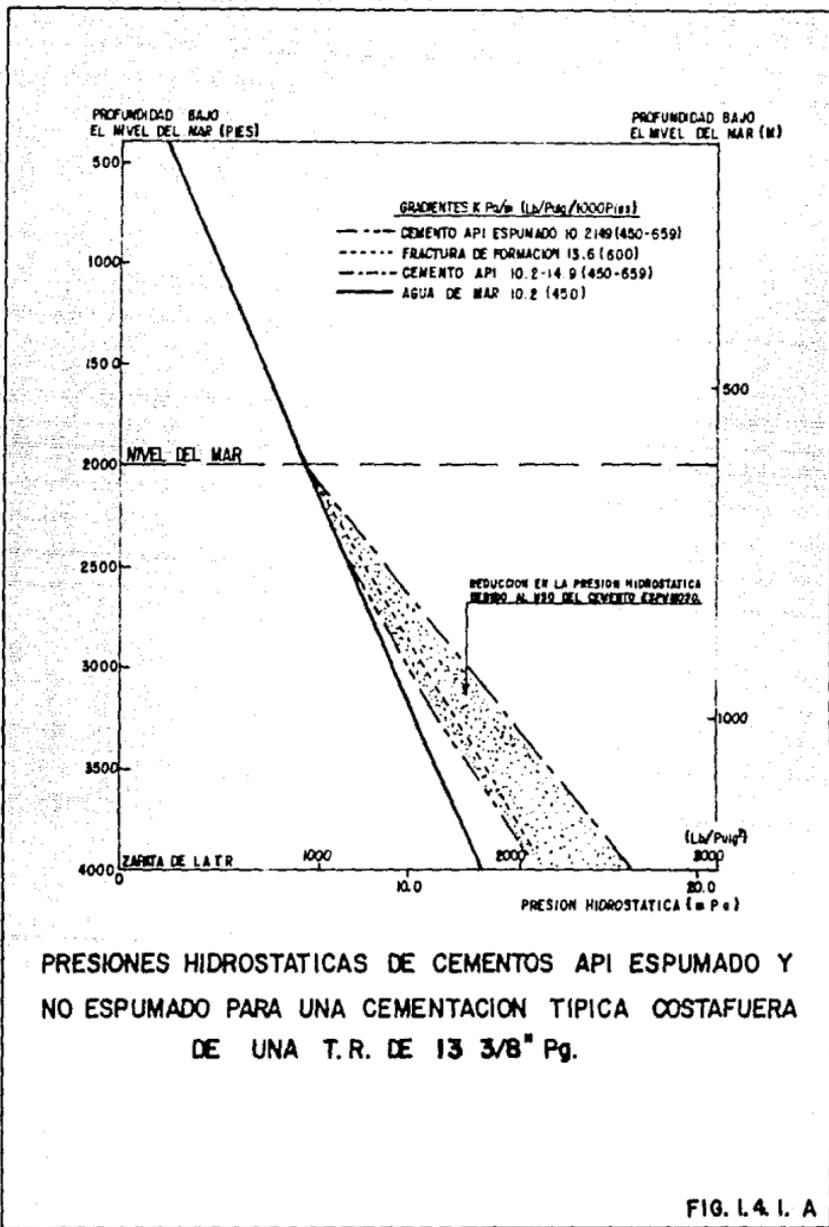
### 1.4.1. CEMENTACION PRIMARIA EN FORMACIONES CON BAJO GRADIENTE DE FRACTURA.

Para esta aplicación la densidad, del cemento espumoso se puede reducir tanto como 0.72 gr/cc (6 lb/gal), con el propósito de reducir ó eliminar una pérdida de circulación durante la cementación de una sola etapa de un intervalo largo.

En zonas cercanas a la costa, las cuales están constituidas de arenas no compactas, con gradientes de fractura relativamente bajos, es aplicable el cemento espumoso. Fig. 1.4.1.A..

### 1.4.2. CEMENTACIONES FORZADAS EN ZONAS AGOTADAS.

Es aplicable el cemento espumoso, en aquellos pozos agotados que no llegan a soportar una pequeña columna de cemento. Generalmente la cementación



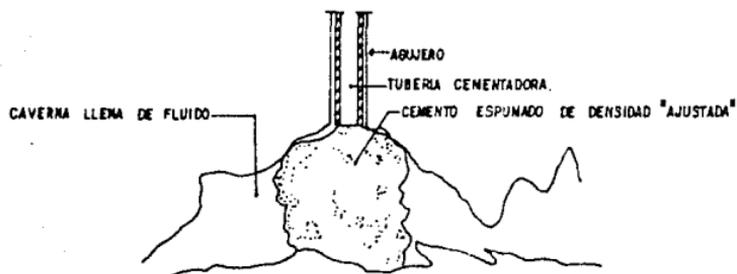
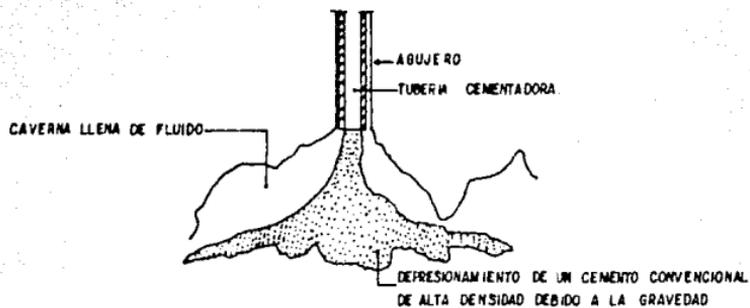
forzada con lechadas convencionales resulta difícil y costosa en tiempo, logrando el éxito de esta después de varios intentos.

#### 1.4.3. EVITAR PERDIDA DE CIRCULACION EN ZONAS CAVERNOSAS.

Por lo general al taponar zonas cavernosas con una lechada relativamente pesada, no da resultado, debido a que la fuerza de gravedad provoca que la lechada de mayor densidad se asiente en el fondo de la cavidad. El uso de un cemento espumoso tixotrópico (de igual densidad que el fluido contenido en la caverna), ayudará a prevenir la segregación gravitacional y asegurará que el cemento se asiente donde fue colocado. Fig. 1.4.3.A.

#### 1.4.4. AISLAMIENTO TERMICO.

El cemento espumado, presenta una conductividad térmica reducida, debido al aglomeramiento de



USO DE UN CEMENTO ESPUMADO DE DENSIDAD AJUSTADA PARA PREVENIR PERDIDAS DE CIRCULACION EN ZONA CAVERNOSAS

FIG. I. 4. 3. A

burbujas de  $N_2$ .

Se ha investigado y demostrado que la conductividad térmica del cemento espumado es significativamente menor que la del cemento no espumado.

El cemento espumado es un excelente aislante, aísla la tubería de ademe en pozos con inyección de vapor y en pozos geotérmicos, aísla zonas acuíferas que causan el problema del parafinamiento.

#### 1.4.5. AISLAMIENTO DE ZONAS.

Durante la deshidratación y fraguado, las lechadas de cemento pasan por un estado de transición, en el cual ocurre una disminución de la presión hidrostática y del volumen de agua intersticial debido a la hidratación química.

La reducción en el volumen, genera una caída de presión muy severa, ya que el agua intersticial de la lechada de cemento ya no es móvil, mientras la lechada de cemento se encuentra en su estado de transi-

ción. Esto a su vez conduce a entrada de la corriente de gas a través de la columna de cemento hidratado.

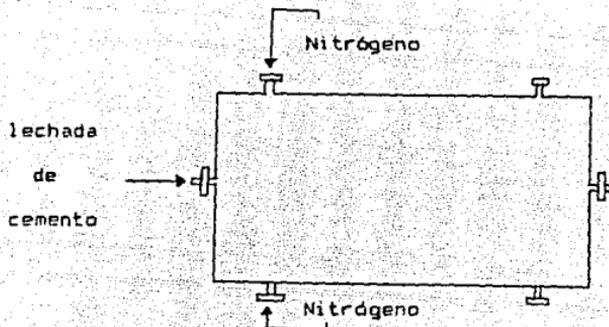
La naturaleza expansiva del cemento espumoso es una posible solución para impedir la disminución en el volumen del agua intersticial, de modo tal que restringe la entrada de gas o de otros fluidos de la formación.

## 1.5. PREPARACION Y COLOCACION DE LA LECHADA.

Para la preparación de un cemento espumoso se necesita de una lechada de cemento normal en la superficie, usando equipo convencional, de preferencia se debe incluir revolventoras de recirculación, con el fin de asegurar una densidad correcta de la lechada y proporciones uniformes de bombeo.

Una vez preparada la lechada normal, se bombea a la cabeza del pozo.

En la línea de bombeo se encuentra insertado un generador de espuma Fig. 1.5.A., que deberá de contar con el número y tamaño adecuado de boquillas de gas y reguladores. Generalmente son boquillas de 3 1/16", pero en trabajos de grandes volúmenes de gas se pueden usar boquillas de 1/4". Las líneas de N<sub>2</sub> están conectadas por pares opuestos de boquillas, como se ilustra en la Fig. siguiente.



Puede evitarse un exceso de presión en la línea de  $N_2$ , aumentando los pares de boquillas, homogeneidad y estabilidad de la espuma, y además de tener un camino alternativo en el caso de que una boquilla se tape con suciedad. Se debe tener cuidado antes de conectar las líneas de  $N_2$ , de que la suciedad del metal y de las conexiones haya sido removida.

Los reguladores y boquillas, aseguran que la energía suficiente sea impartida desde el flujo de gas dentro de la lechada de cemento para preparar burbujas celulares de espuma estables y separadas.

Es recomendable que se instale un adaptador

## GENERADOR DE ESPUMA

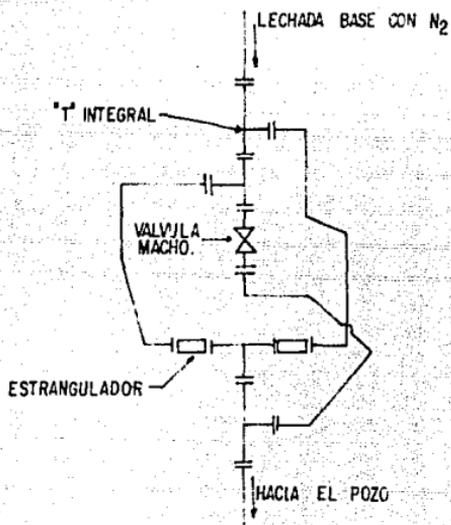


FIG. 1. 5. A.

para la inyección del surfactante. El surfactante y el estabilizador de espuma son medidos e inyectados dentro de un conjunto de válvulas de succión de la bomba de alta presión. El requerimiento normal de surfactante es del 15% y del estabilizador de espuma de 0.75%, ambas cantidades basadas en el volumen de agua requerido para mezclar la lechada normal. En el campo ambos productos son mezclados juntos, cuidadosamente revueltos para obtener una uniformidad y ser inyectados como una solución.

La figura 1.5.B. ilustra el equipo requerido para preparar una lechada de cemento espumoso.

La fuente de gas para el cemento espumoso, deberá seleccionarse de acuerdo con el equipo disponible y la cantidad de gas necesario para lograr la densidad requerida a la presión de trabajo en el fondo del pozo. Se debe calcular el gasto de gas por barril de lechada de cemento.

# DIAGRAMA ESQUEMATICO PARA OBTENER CEMENTO ESPUMOSO

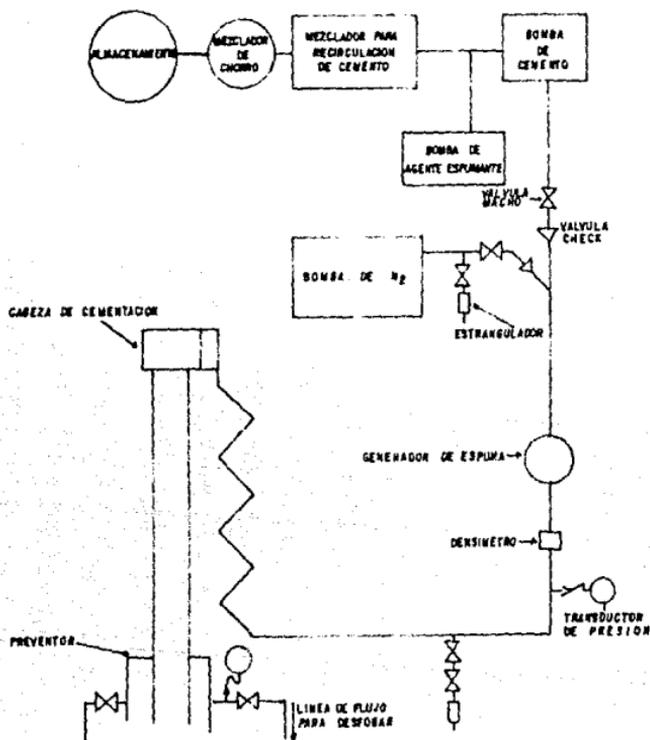


FIG. 1. 5. B

Para preparar el cemento espumoso en operaciones profundas, se necesita de unidades con gas comprimido ó con  $N_2$  líquido, mientras que para operaciones someras, basta con compresores de aire.

La coordinación de los gastos de bombeo del cemento, gas ( $N_2$ ) y la relación de inyección de surfactante son parámetros muy importantes para el logro de las características de la lechada espumosa deseada.

## 1.6. OPERACION .

En las cementaciones de T.R. se requiere que la lechada de cemento circule a la superficie.

Lo ideal es que el cemento espumoso no circule hasta la superficie, si es que se puede evitar.

En condiciones atmosféricas el cemento espumoso no es limitado por presiones significativas y por ende tiende a expandirse a su mayor volumen posible, dando como resultado grandes masas de cemento inestable, teniendo poca ó ninguna resistencia a la compresión y baja densidad.

Al diseñar una cementación, en la que se requiere que la lechada de cemento sea regresada a superficie, es conveniente utilizar un volumen de cemento sin espumar delante de la lechada espumosa. El cemento sin espumar tendrá dos funciones:

a) Sirve como marcador, regresará a superficie antes de que llegue el cemento espumoso.

b) Proteger al cemento espumoso, conteniendo hasta que frague.

Se sugiere que la distancia del intervalo de cemento sin espumar, sea hecha para cada trabajo específico, y que esta sea 200 pies (61 m.) mínimo. En operaciones donde no se desee el regreso de la lechada a superficie se sugiere colocar mínimo 100 pies (30.5 m.) de lechada de cemento sin espumar. Esta formará un espaciador efectivo entre el cemento espumoso y el lodo de control, permitiendo a la cuadrilla de campo, el tiempo suficiente para estabilizar los ritmos de bombeo de la lechada de cemento, y al mismo tiempo proporcionar un tapón denso de cemento en la cima de la columna del cemento espumoso.

Si el cemento espumoso va a llegar a superficie, se recomienda instalar un árbol de estrangulación con capacidad para alto flujo. La persona encargada para controlar el estrangulador, debe operar inmediatamente que el cemento espumoso empieza a salir a superficie, posteriormente se cierra el pozo hasta que ocurra el fraguado inicial del cemento.

Cuando hay grandes pérdidas de circulación, estas se pueden remediar bombeando un reactivo químico después del lodo pero antes de la lechada de cemento. Esta técnica es muy recomendada para uso de cemento espumoso. Este reactivo se diseña para cubrir la formación y la T.R. con un material activo. Se usan grandes cantidades de este material en áreas que soportan fluidos bajo presión que al hacer contacto con el cemento espumoso experimentan una reacción química y tiende a crear un precipitado inmóvil el cual sella la zona que acepta fluido, pruebas posteriores han dado como resultado que el uso de estos reactivos dan buenos registros de adherencia de cemento y buena remoción de lodo así como el aislamiento de zonas de pérdida de circulación.

En temperaturas mayores de 140<sup>o</sup> F se recomienda que el cemento espumoso se trabaje con prudencia. A dichas temperaturas, el esfuerzo a la compresión del cemento espumoso ya fraguado disminuye, a los 230<sup>o</sup> F el esfuerzo que se puede lograr con base de un cemento espumoso portland es de aproximadamente 300 lb/pg<sup>2</sup>.

Si se va a trabajar con morteros y se esperan altas temperaturas, es recomendable no usar los cementos tipo G ó H y si emplear el tipo C.

La tabla 1.6.1. muestra que los cementos tipo C, pueden proporcionar lechadas espumosas aplicables para alta temperatura.

Al mezclarle harina sílica al cemento espumoso se obtendrá una excelente estabilidad a alta temperatura y propiedades térmicas aislantes.

\*\*\*\*\*

TABLA 1.6.I. PROPIEDADES DEL CEMENTO ESPUMOSO  
A ALTAS TEMPERATURAS.

\*\*\*\*\*

CONDICIONES: Prepare un cemento espumoso de 9.5 lb/gal.  
Eleve la temperatura a 165°F en 2°F/min. a  
transfiera y eleve una temperatura a 210°F  
en 4 horas.

COMPOSICION DEL CEMENTO I

Componentes de la lechada lb/saco		Resultado
Tipo C	94	Resistencia a la compresión = 354 lb/pg <sup>2</sup> / 48 horas
Arena Silica	35	
Reductor de pérdida de fluido y retardador	0.1	K <sub>aire</sub> = 7.7 md
Gelatinizante	0.25	Porosidad = 67%
Agua	75	

COMPOSICION DEL CEMENTO II

Componentes de la lechada lb/saco		Resultado
Tipo C	94	Resistencia a la compresión = 360 lb/pg <sup>2</sup> / 48 horas
Diesel	35	
Arena Silica	20	K <sub>aire</sub> = 1.19 md
Aditivos ligeros	40	
Cal	10	Porosidad = 54%
Gelatinizante	0.25	
Reductor de pérdida de fluido y retardador	0.25	
Agua	248	

### 1.6.1. TECNICAS DE CAMPO.

Una vez diseñada la lechada, se bombeará dentro del pozo. Los trabajos de cementos espumosos, son llevados a cabo de dos maneras diferentes: Densidad constante de la lechada espumosa ó gasto constante de nitrógeno.

Estas técnicas tienen sus aplicaciones definidas y sus problemas particulares. Las dos técnicas se basan en la ley de los gases, para controlar la densidad de la lechada a diferentes condiciones de presión y temperatura a lo largo de todo el pozo.

En la primera técnica, se tiene al concluir el trabajo de cementación una densidad constante de la lechada espumosa lograda por el incremento del  $N_2$ .

Mientras que en la segunda técnica se obtiene una densidad variable del fondo a la superficie de la lechada espumosa.

### 1.6.1.A. DENSIDAD CONSTANTE DE LA LECHADA ESPUMOSA.

Teóricamente la densidad puede mantenerse constante en una columna de cemento espumoso, con el control continuo de la relación de gas. Prácticamente el ajuste se realiza mediante incrementos en la relación de gas, estos incrementos deben diseñarse de tal manera que ocurra la menor variación en la densidad de la columna de cemento.

El uso del cemento espumoso de densidad constante es aplicado más en cementaciones primarias, en formaciones débiles y profundas.

Un procedimiento para determinar la proporción de  $N_2$  y así obtener una densidad constante del cemento espumoso consiste en dividir el trabajo en etapas, conforme se incrementa la profundidad en cada etapa, el volumen de cemento, la presión y la temperatura son usados para determinar la proporción de  $N_2$  necesario para la densidad requerida.

Factores utilizados para determinar el volumen de  $N_2$  por unidad de lechada base, para alcanzar la densidad de la lechada espumosa requerida:

Densidad de la lechada base.

Temperatura.

Presión hidrostática.

Factor de desviación de los gases, z.

#### 1.6.1.B. GASTO CONSTANTE DE NITROGENO EN LA LECHADA ESPUMOSA.

Esta técnica consiste en mantener un volumen de inyección de  $N_2$  constante durante todo el tiempo de bombeo de la lechada. En esta técnica existirá una variación de la densidad y la presión hidrostática con la profundidad, estas variaciones dependen de la presión, temperatura y de la densidad de la lechada base.

En algunas aplicaciones del cemento espumoso a gasto constante se ha utilizado una capa o sello de lodo sin espumar ó cemento normal aligerado, antes del cemento espumoso.

Esta técnica se usa generalmente a profundidades someras (600 m.).

A estas profundidades, gran parte de la aplicación es para aislar zonas porosas. También se han aplicado en zonas con pérdida de circulación.

Esta técnica tiene el inconveniente de alcanzar la densidad de la lechada base durante el bombeo, y por tanto, deben conocerse las presiones de fractura y densidades circulantes equivalentes, para asegurar de no fracturar la formación.

## EJEMPLO DE APLICACION

Cementar una tubería de revestimiento de 10 3/4" a 3080.0 m, utilizando una lechada de cemento espumoso, aplicando la técnica de densidad constante y una sola etapa. Por experiencia se conoce que el área tiene una zona con bajo gradiente de fractura en el intervalo 1882 a 2632 m., por tal motivo se necesita un cemento ultraligero. Durante la etapa de perforación se utilizó lodo de 1.10 gr/cc, manteniendo una total circulación durante la misma.

### RECOMENDACIONES:

Suponer que se tiene agujero descubierto hasta la superficie.

El trabajo se debe diseñar con el fin de que la presión hidrostática total del separador del lodo y del cemento espumoso, no exceda la presión de fractura a la profundidad de 3080 m. utilizando un factor de seguridad aproximado de 500 lb/pg<sup>2</sup>. Para asegurar que el intervalo con bajo gradiente de fractura sea cubierto con cemento espumoso, se colocará esta lechada en el intervalo 790 a 2744 m.. Para cubrir el fondo se utilizará cemento normal.

Es conveniente de que en el laboratorio se verifique la compatibilidad del espaciador con el lodo

del pozo. Para este caso se utilizarán 42 bl. con una densidad de 1.03 gr/cc.

**DATOS:**

Tubería de revestimiento de 10 3/4"

Diámetro del agujero 14 3/4"

Capacidad entre agujero y T.R. de 10 3/4" = 0.0991 bl/pie

Profundidad = 3080.0 m.

Gradiente de fractura a 2744.0 m. = 0.520 lb/pg<sup>2</sup>/pie

Presión de fractura a 2744.0 m. = 4660 lb/pg<sup>2</sup>

Densidad del lodo = 1.10 gr/cc

Altura total del cemento = 2290.0 m.

**CEMENTO ESPUMOSO:**

Altura = 1954.0 m.

Densidad = 1.03 gr/cc = 8.6 lb/gal

**CEMENTO NORMAL:**

Altura = 336.0 m.

Densidad = 1.90 gr/cc

Rendimiento = 47.3 lt/sc

Requerimiento de agua = 15.1 lt/sc

Tiempo de bombeo = 4 hrs.

Composición: cemento clase 10, 1.5% de retardador

**LECHADA BASE:**

Densidad = 1.70 gr/cc = 14.2 lb/gal

Rendimiento = 36.5 lt/sc

Requerimiento de agua = 22.7 lt/sc

Composición: cemento clase "G", 36:65 extendedor,  
1.5 % de agente espumante, 0.5% retardador,  
1.0 % de extendedor para alto rendimiento.

Volumen de espaciador = 6678 lts

Densidad del espaciador = 1.03 gr/cc

Temperatura a 3080.0 m. = 185 °F

Temperatura a 1882.0 m. = 148 °F

#### SOLUCION:

A) CALCULO DE LOS VOLUMENES ANULARES.

-Volumen anular total:

$$V_{AT} = 3080.0 \text{ m} * 0.0991 \text{ bl/pie} * (3.28 \text{ pie} / 1 \text{ m})$$

$$V_{AT} = 3080.0 \text{ m} * 0.325 \text{ bl/m}$$

$$V_{AT} = 1001 \text{ bls}$$

-Volumen anular desde la superficie hasta 790.0 m.

$$V_{A1} = 790.0 \text{ m.} * 0.325 \text{ bl/m}$$

$$V_{A1} = 257 \text{ bls}$$

-Volumen anular de 790.0 a 2744.0 m.

$$V_{A2} = 1954.0 \text{ m} * 0.325 \text{ bl/m.}$$

$$V_{A2} = 635 \text{ bls}$$

-Volumen anular desde 2744.0 a 3080.0 m.

$$V_{A3} = 336 \text{ m.} * 0.325 \text{ bl/m.}$$

$$V_{A3} = 109 \text{ bls.}$$

B) CALCULO DE LA PRESION HIDROSTATICA EN EL PUNTO MEDIO DEL CEMENTO ESPUMOSO.

$$Ph = h * Den * 1.42$$

$$Ph_E = 129.0 \text{ m} * 1.03 \text{ gr/cc} * 1.42$$

$$Ph_E = 189 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CE} = 977.0 \text{ m} * 1.03 \text{ gr/cc} * 1.42$$

$$Ph_{CE} = 1429 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_L = 661.0 \text{ m} * 1.10 \text{ gr/cc} * 1.42$$

$$Ph_L = 1032 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_T = Ph_E + Ph_{CE} + Ph_L$$

$$Ph_T = 2650 \text{ lb/pg}^2$$

C) CALCULO DE LA CALIDAD DEL CEMENTO ESPUMOSO (CCE)

$$Den_{CE} = X (Den_{LB}) + (1-X) (Den_{N_2}) \dots\dots\dots (a)$$

$$Den_{N_2} @ 2600 \text{ lb/pg}^2 \text{ y } 150 \text{ } ^\circ\text{F} = 796 \text{ pies}^3 \text{ N}_2/\text{bl}$$

(de tabla II)

$$= 1.372 \text{ lb/gal}$$

Despejando X :

$$X = (Den_{CE} - Den_{N_2}) / (Den_{LB} - Den_{N_2}) \dots\dots\dots (b)$$

sustituyendo datos :

$$X = (8.6 - 1.372) / (14.2 - 1.372) = 0.5634$$

$x = 0.5634$  Galones de cemento base / galones de cemento espumoso.

$1-x = 0.4366$  Galones de  $N_2$  / galones de cemento espumoso.

Por lo tanto:

$$CCE = (1 - x) / (1 - x + x) * 100$$

Sustituyendo:

$$CCE = (0.4366) / (0.4366 + 0.5634) * 100$$

$$CCE = 43.66\%$$

D) CALCULO DE LA CONCENTRACION DE  $N_2$  PROMEDIO EN LA LECHADA BASE ( $C_{N_2}$ )

$$C_{N_2} = 0.4366 * 796 = 347.5 \text{ pie}^3 \text{ de } N_2 / \text{bl promedio}$$

E) CALCULO DEL RENDIMIENTO DEL CEMENTO ESPUMOSO ( $R_{CE}$ )

$$R_{CE} = 1 / x * R_{LB}$$

$$R_{CE} = 1 / 0.5634 * 36.5 \text{ lt/sc}$$

$$R_{CE} = 64.78 \text{ lt/sc}$$

F) CALCULO DEL NUMERO DE SACOS DE CEMENTO BASE ( $S_{CB}$ )

$$S_{CB} = V_{A2} / R_{CE}$$

$$= 635 \text{ bl} * (159 \text{ lt/bl}) / 64.78 \text{ lt/sc}$$

$$S_{CB} = 1559 \text{ sc}$$

G) CALCULO DEL NUMERO DE SACOS DE CEMENTO NORMAL ( $S_{CN}$ )

$$S_{CN} = V_{A3} / R_{CN}$$

$$= 109 \text{ bl} * (159 \text{ lt/bl}) / 47.3 \text{ lt/sc}$$

$$S_{CN} = 367 \text{ sc}$$

#### H) SECUENCIA DE BOMBEO:

- 1) Espaciador
- 2) Lechada base más el nitrógeno
- 3) Lechada pesada
- 4) Fluido de desplazamiento

Puntos a determinar :

- Cantidad de nitrógeno
- Gasto de nitrógeno
- Gasto de cemento base

Se dividirá la longitud del intervalo a cementar con cemento espumoso en 5 partes iguales.

$$\text{Long. de cada intervalo} = 1954 / 5 = 390.8 \text{ m}$$

(fig. 1)

Cálculo de la presión hidrostática total en los puntos medios de cada uno de los intervalos.

$$Ph_{CEM1} = 390.8 / 2 * 1.03 * 1.42 = 286 \text{ lb/pg}^2 + Ph_E + Ph_L$$

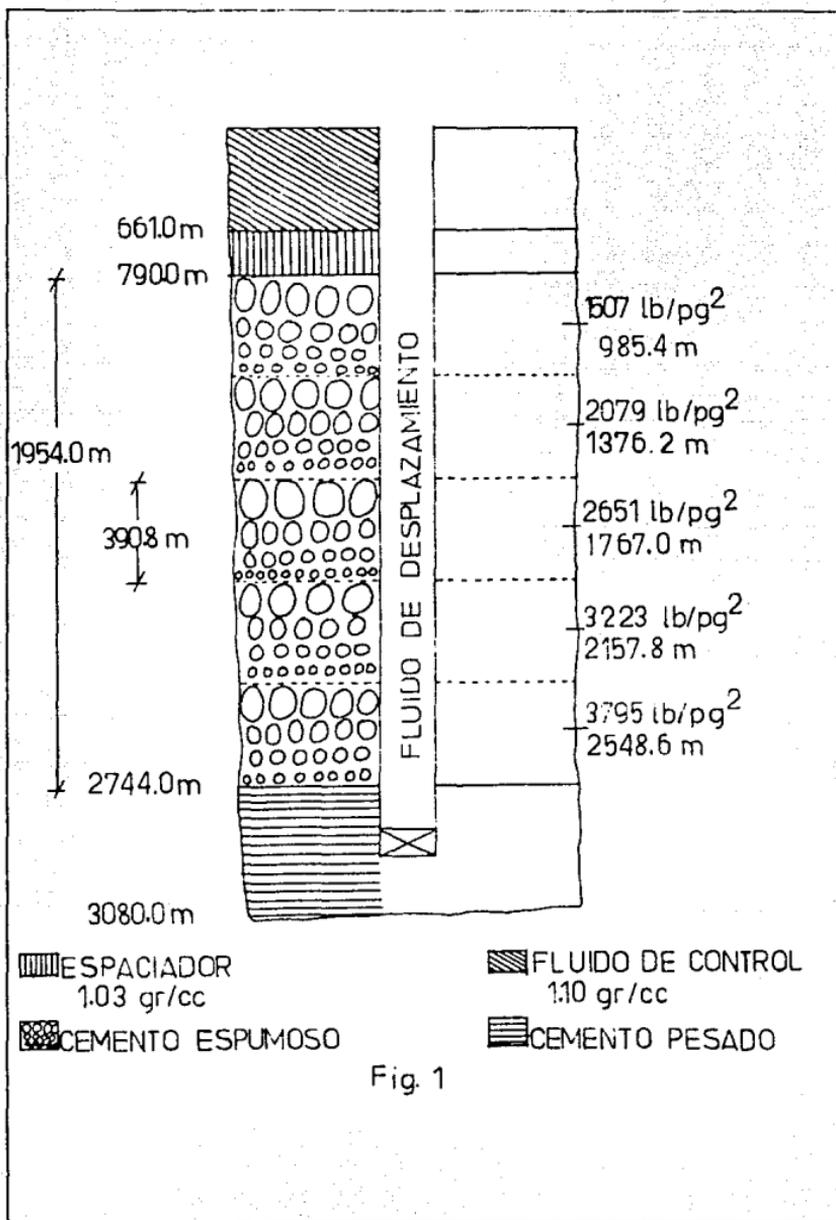
$$Ph_{CEM1} = 1507 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CEM2} = 2079 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CEM3} = 2651 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CEM4} = 3223 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CEM5} = 3795 \text{ lb/pg}^2$$



Cálculo del volumen anular, cantidad de lechada base y  $N_2$  para cada intervalo. Para lo cual se utilizarán las fracciones de cada uno de estos componentes calculados en el paso C.

$$V_{AI} = 390.8 \text{ m.} * 0.0991 \text{ bl/pie} * 3.28 \text{ pie/m}$$

$$V_{AI} = 127 \text{ bls.}$$

$$L_B = 127 \text{ bl} * 0.5634 = 71.5 \text{ bl.}$$

$$N_2 = 127 \text{ bl} * 0.4366 = 55.4 \text{ bl.}$$

CALCULO DE LA TEMPERATURA DE FONDO DE CADA INTERVALO

$$T_F = (T_{FT} - 80) * H_{CCEI} / H_T + 80$$

Por lo que:

$$TF1 = (185 - 80) * 1180.8 / 3080.0 + 80$$

$$TF1 = 120 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$TF2 = 134 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$TF3 = 147 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$TF4 = 160 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$TF5 = 174 \text{ }^\circ\text{F}$$

De tablas se determinan los pies<sup>3</sup> de N<sub>2</sub> / bl de espacio anular (tablas I...IX).

Intervalo	Prof. [m.]	Ph [lb/pg <sup>2</sup> ]	Pies <sup>3</sup> de N <sub>2</sub> / bl de espacio anular	Temp. [°F]
1	985	1507	505	120
2	1376	2079	670	134
3	1767	2651	815	147
4	2158	3223	945	160
5	2549	3795	1057	174

Cálculo de N<sub>2</sub> para cada intervalo:

Intervalo	N <sub>2</sub> (bls)	Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub> / bl	Total (pies <sup>3</sup> )
1	55.4	505	22977
2	55.4	670	37116
3	55.4	815	45151
4	55.4	945	52353
5	55.4	1057	58558

T O T A L N<sub>2</sub> = 221,157 PIES<sup>3</sup>

#### VERIFICACION DEL PASO D.

Volumen anular total que tendrá cemento espumoso es de 635 bls., el volumen de lechada base requerido para cada uno de los 5 intervalos es de 71.5 bls., el  $N_2$  ocupa 55.4 bls. por cada 390.8 m. de volumen anular.

$$5 * 71.5 = 357.5 \text{ bls.}$$

$$5 * 55.4 = 277.0 \text{ bls.}$$

$$\text{total} = 634.5 \text{ bls.}$$

$$\text{El } N_2 / \text{bl promedio} = 221,157 / 634.5$$

$$= 348 \text{ pies}^3 N_2 / \text{bl promedio}$$

Por lo que queda verificado el paso D.

Cálculo del gasto de  $N_2$  y el gasto de cemento base.

$$\text{Total de } N_2 \text{ para cada intervalo} = 55.4 \text{ bls.}$$

$$\text{Total de cemento base para cada intervalo} = 71.5 \text{ bls.}$$

Intervalo	Total pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /Int	Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub> /bl de cemento
1	27977	391
2	37118	519
3	45151	631
4	52353	732
5	58558	819

Construcción de tablas que muestren la densidad de la lechada espumosa contra la presión de cada una de las etapas de nitrógeno, para diferentes gastos. Para este problema se realizará para un gasto de un bl/min y la utilización de la gráfica A.

El trabajo se realizará midiendo la densidad conforme se va bombeando la lechada, y la presión utilizando dichas gráficas. La presión en la superficie durante el bombeo estará variando lo mismo ocurrirá con la densidad de la lechada espumosa. La densidad de la lechada base será constante (1.70 gr/cc) así como el gasto de esta. La otra variable en consideración es el gasto de nitrógeno, esta variación se llevará a cabo para cada intervalo.

Las gráficas siguientes, ayudarán a controlar el

gasto de nitrógeno con el objetivo de que la densidad requerida de la lechada de cemento espumoso se pueda colocar en el espacio anular del pozo.

#### CALCULO DEL GASTO DE BOMBEO DEL AGENTE ESPUMANTE.

Para la lechada base se requieren 27.7 lt de agua por saco, su rendimiento es de 36.5 lt/sc. El agente espumante se agrega al 1.5% del agua para mezclar.

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento de la lechada base} &= 36.5 \text{ lt/sc} \\ &= 4.35 \text{ sc/bl} \end{aligned}$$

$4.35 \text{ sc/bl} * 22.7 \text{ lt/sc} = 98.7 \text{ lts. de agua para mezclar por minuto.}$

Gasto de la lechada base	Vol. de agua para mezclar por min.	Espumante [lt/min]
1	98.7	1.48
2	197.4	2.96
3	296.1	4.44
4	394.8	5.92
5	493.5	7.40

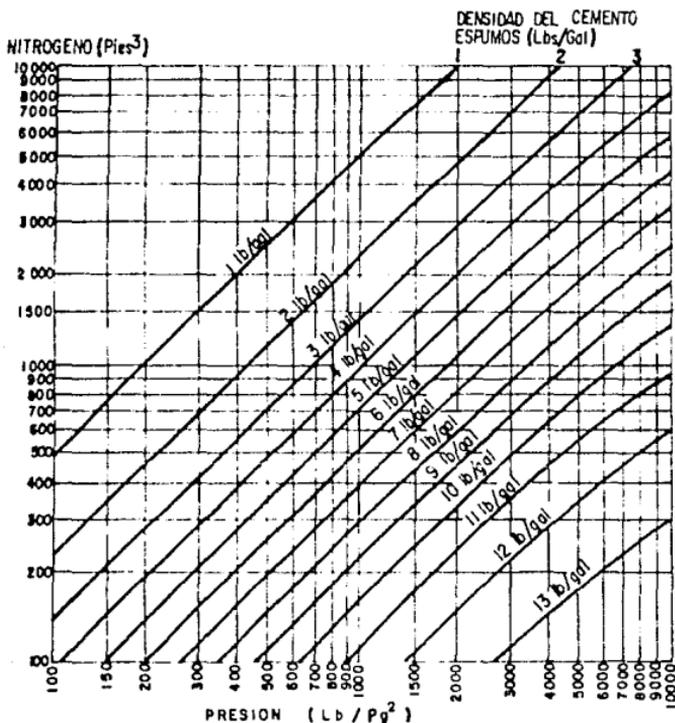
Int.	1 BPM		2 BPM		3 BPM	
	Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub>   min.		Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub>   min.		Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub>   min.	
1	391	71	782	35.5	1173	23.6
2	519	71	1038	35.5	1557	23.6
3	631	71	1262	35.5	1893	23.6
4	732	71	1464	35.5	2196	23.6
5	819	71	1638	35.5	2457	23.6
Total	3092	355	6184	177.5	9276	118.0

Int.	4 BPM		5 BPM	
	Pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub>   min.		pies <sup>3</sup> N <sub>2</sub>   min.	
1	1564	17.7	1955	14.2
2	2076	17.7	2595	14.2
3	2524	17.7	3155	14.2
4	2928	17.7	3660	14.2
5	3276	17.7	4095	14.2
Total	12368	88.7	15460	71.0

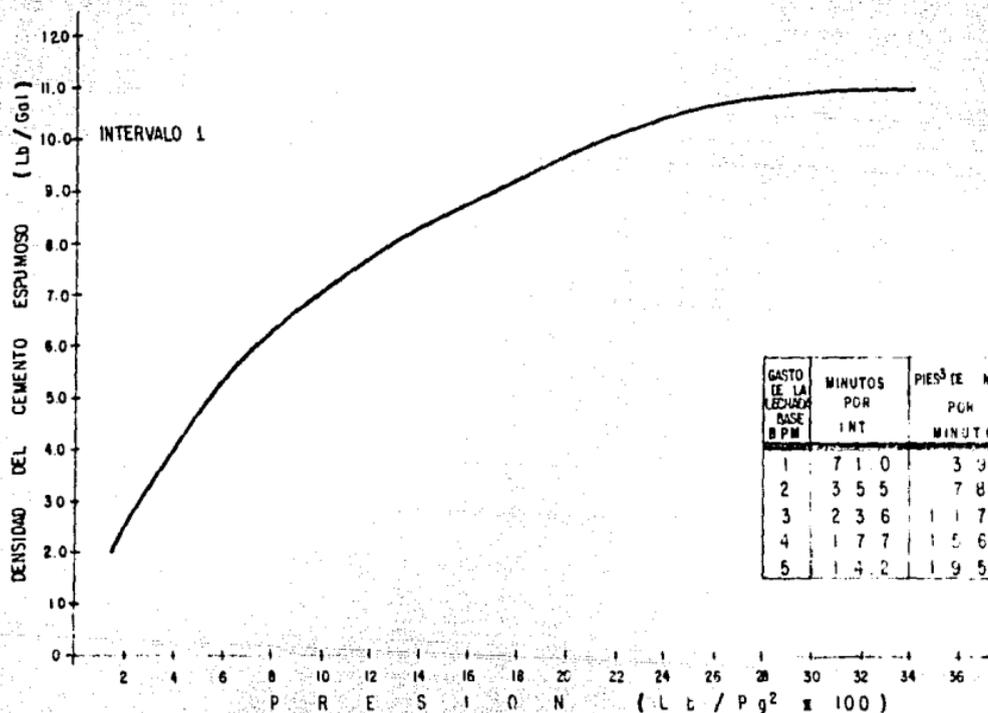
## GRAFICA "A"

Esta gráfica compara la presión, pies<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>/barril de cemento y densidad y es usada para determinar la densidad del cemento espumoso contra la presión para un gasto constante de N<sub>2</sub>.

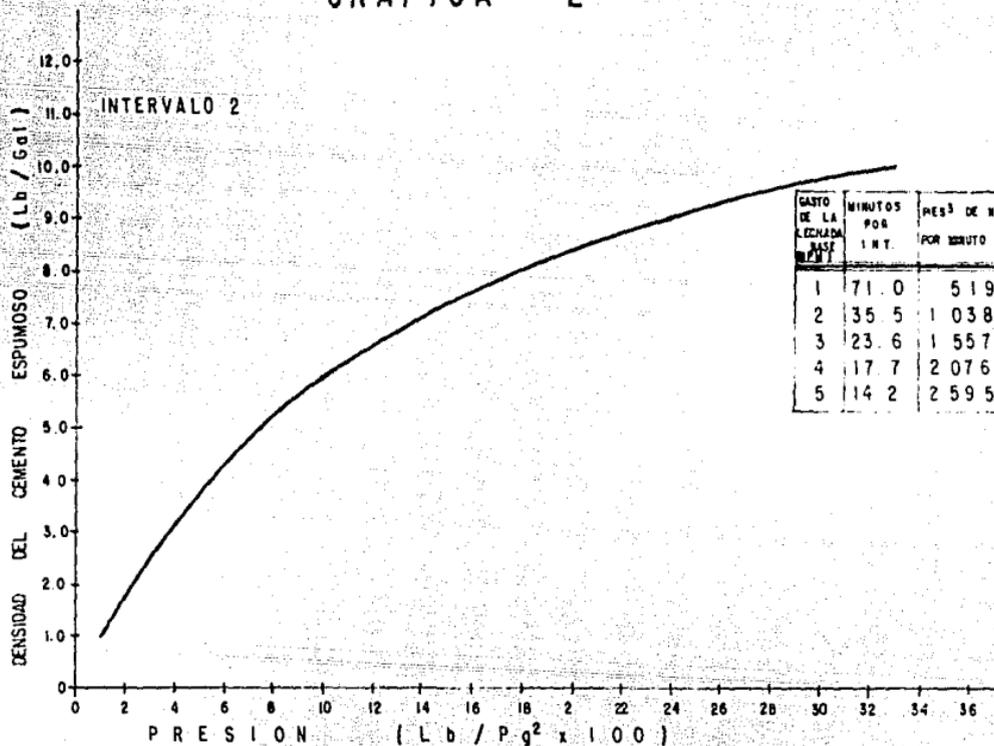
DENSIDAD DEL CEMENTO BASE = 14.2 Lb/Gal.



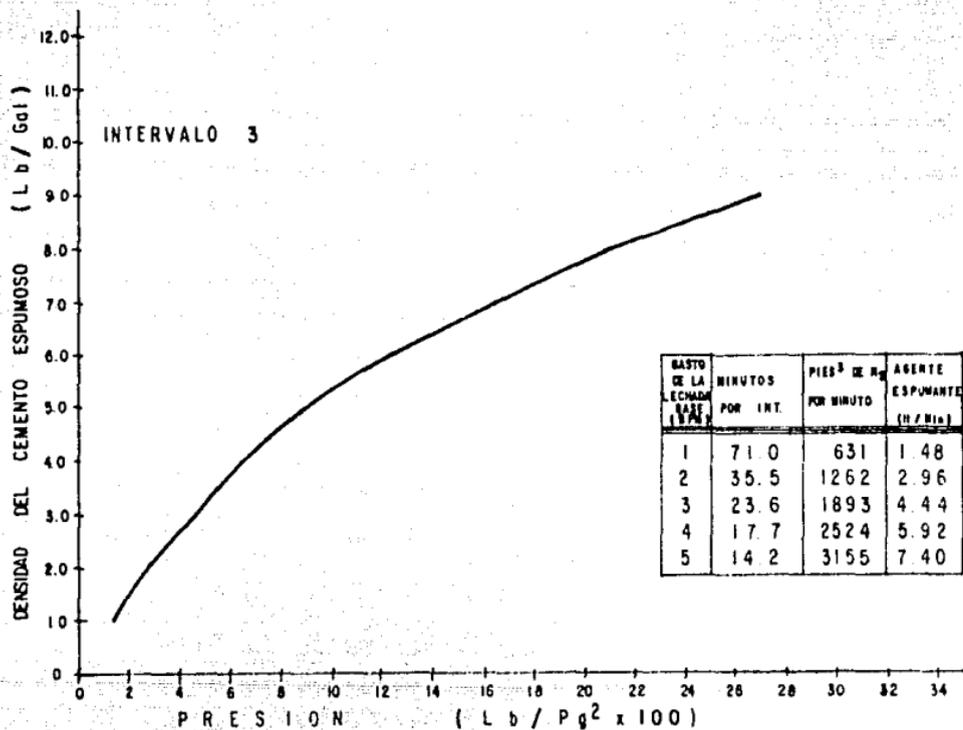
GRAFICA " 1 "



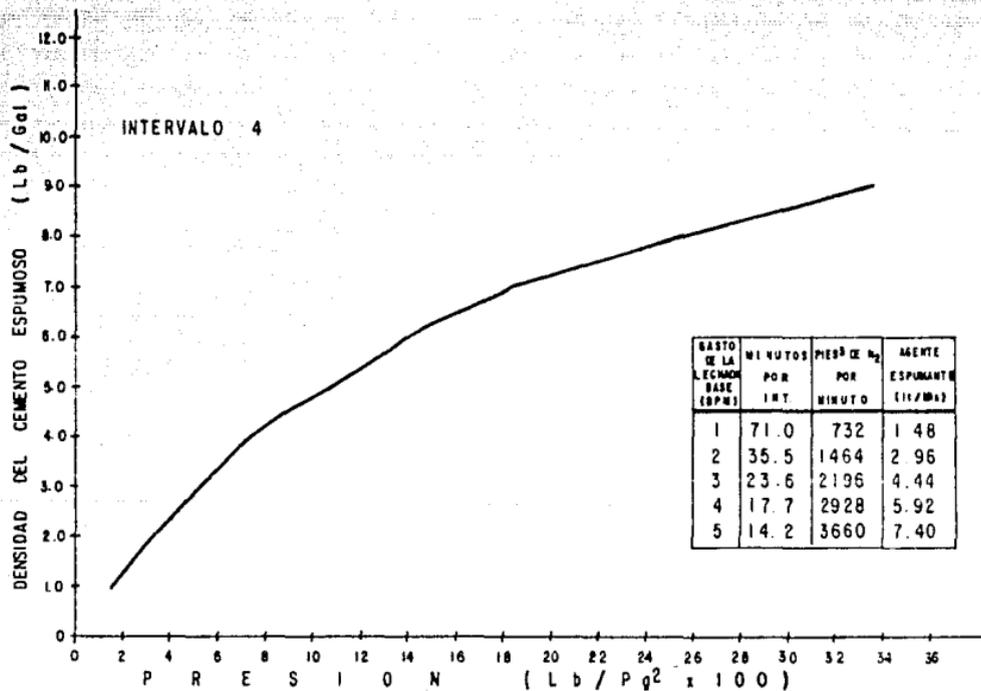
# GRAFICA "2"



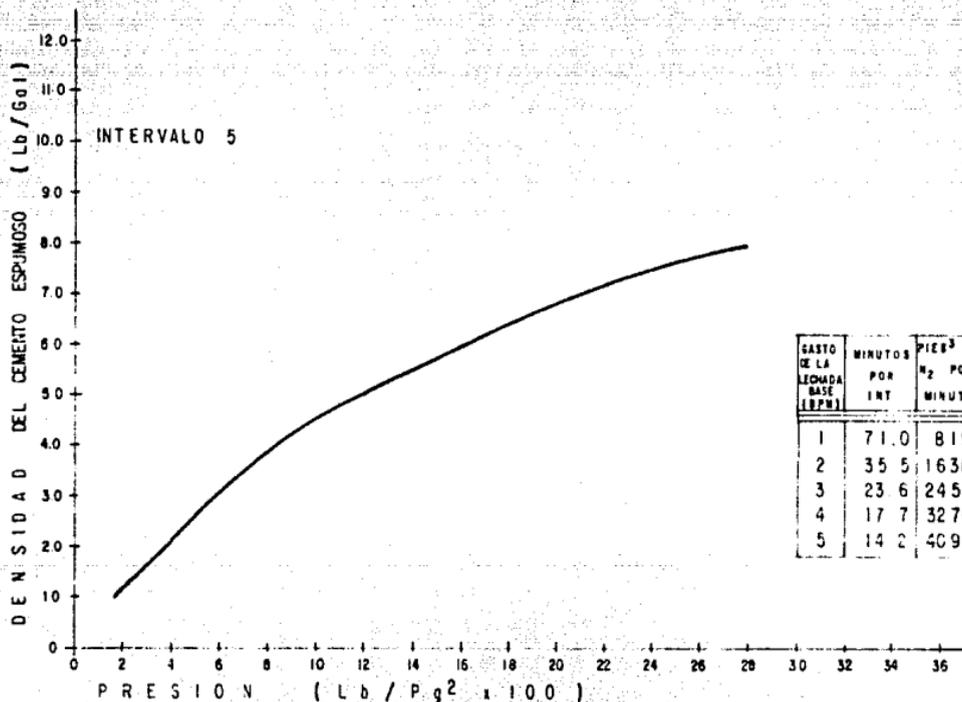
# GRAFICA N° 3



# GRAFICA "4"



# GRAFICA "5"



GASTO DE LA LECHADA BASE (LPM)	MINUTOS POR INT	PIES <sup>3</sup> DE N <sub>2</sub> POR MINUTO	AGENTE ESPUMANTE
1	71.0	819	1.48
2	35.5	1638	2.96
3	23.6	2457	4.44
4	17.7	3276	5.92
5	14.2	4095	7.40

TABLA "A"

DENSIDAD DE LA LECHADA DE CEMENTO ESPUMOSO EN LA SUPERFICIE

[lb/gal]

INT.	GASTO DE N <sub>2</sub> (P <sup>o</sup> /bl)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	391	-	1175	1280	1400	1550	1740	1990	11300	1700	12120	13400	15700	P
2	519	1105	1225	1380	1550	1730	11000	1380	1800	12400	13300	14700	18400	R
3	631	1132	1275	1460	1650	1890	11250	1650	2100	12700	13700	15900	19800	S
4	732	1145	1320	1530	1740	11100	1400	1850	2550	13350	14700	17000	21200	I
5	819	1170	1370	1590	1840	11200	1600	2100	2600	13750	15300	18400	22800	N
														lb
														pg

TABLA I  
 PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESTON	TEMPERATURA ° F.														
lb/pg2 abs	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	
100	39	38	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	24	
200	79	78	73	70	68	66	64	62	60	58	56	55	53	52	
300	119	114	110	106	102	99	96	93	90	87	85	82	80	78	
400	158	152	147	141	134	132	128	124	120	116	113	110	107	104	
500	198	190	183	177	171	165	160	155	150	146	141	137	134	130	
600	240	230	221	212	204	197	190	184	178	173	168	163	158	154	
700	280	268	258	248	238	230	222	214	208	201	195	189	184	179	
800	320	307	294	283	272	262	253	245	237	229	222	216	210	204	
900	360	345	331	318	306	295	284	275	264	257	250	242	236	229	
1000	400	383	367	353	339	327	316	305	295	285	277	269	261	254	
1100	440	421	404	390	373	359	346	334	323	313	304	295	287	279	
1200	480	459	440	422	406	391	377	364	352	341	330	321	312	303	
1300	519	496	476	457	439	423	407	393	380	368	357	346	337	328	
1400	558	534	511	491	472	454	438	423	408	395	383	372	361	352	
1500	597	571	547	525	504	485	468	452	436	422	409	397	386	374	
1600	636	608	582	559	537	516	498	480	464	449	435	422	411	400	
1700	674	644	617	592	569	547	527	509	492	474	461	447	435	423	
1800	712	681	652	625	601	578	557	537	519	502	487	472	459	447	
1900	749	717	686	658	632	608	586	565	544	528	512	497	483	470	
2000	787	752	720	691	663	636	615	593	573	554	537	521	506	493	

14.7 lb/pg2 y 60 C.F.

TABLA II

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESTON	P E R F O R M A N C E													
lb/sg2 abc	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
2100	823	787	754	723	694	668	643	621	600	580	562	545	530	516
2200	860	822	787	755	725	697	672	648	626	606	587	569	553	538
2300	895	856	820	787	755	727	700	675	652	631	611	593	576	561
2400	930	890	853	818	785	756	728	702	678	656	635	616	599	583
2500	965	923	885	849	815	784	755	728	704	681	659	640	622	605
2600	999	956	916	879	845	812	782	755	729	705	683	663	644	627
2700	1033	989	948	909	873	840	809	781	754	729	707	686	666	649
2800	1066	1021	978	939	902	868	836	806	779	753	730	708	688	670
2900	1098	1052	1009	968	930	895	862	832	803	777	753	731	710	691
3000	1130	1083	1038	997	958	922	888	857	828	801	776	753	732	713
3100	1161	1113	1068	1025	986	948	914	882	852	824	798	775	753	733
3200	1192	1143	1096	1053	1013	975	939	906	875	847	820	796	774	754
3300	1222	1172	1125	1081	1039	1000	964	930	899	869	842	818	795	774
3400	1251	1200	1153	1108	1065	1026	989	954	922	892	864	839	816	795
3500	1279	1228	1180	1134	1091	1051	1013	978	945	914	886	860	836	815
3600	1307	1255	1207	1160	1117	1075	1037	1001	967	936	907	880	856	834
3700	1334	1282	1233	1186	1142	1100	1060	1024	989	957	928	901	876	854
3800	1361	1308	1258	1211	1166	1124	1084	1046	1011	979	949	921	896	873
3900	1386	1334	1284	1236	1190	1147	1106	1068	1033	1000	969	941	915	892
4000	1411	1359	1308	1260	1214	1170	1129	1090	1054	1020	989	961	935	911

14.7 lb/sg2 v 80 G.F.

TABLA III

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESION lb/pg2	TEMPERATURA G.F.													
	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
4100	1487	1398	1337	1284	1234	1191	1149	1111	1075	1042	1011	982	955	930
4200	1482	1419	1361	1307	1258	1213	1171	1132	1096	1062	1031	1001	974	949
4300	1506	1442	1384	1330	1280	1234	1192	1153	1116	1082	1050	1020	993	967
4400	1530	1466	1407	1352	1302	1256	1213	1173	1136	1101	1069	1039	1011	985
4500	1584	1489	1429	1374	1324	1277	1234	1193	1156	1121	1088	1056	1029	1001
4600	1577	1512	1452	1396	1345	1298	1254	1213	1176	1140	1107	1076	1048	1021
4700	1600	1534	1474	1418	1366	1319	1274	1233	1195	1159	1126	1095	1066	1038
4800	1622	1556	1495	1439	1387	1339	1294	1253	1214	1178	1144	1113	1083	1054
4900	1645	1578	1517	1460	1408	1359	1314	1272	1233	1197	1163	1131	1101	1073
5000	1667	1600	1538	1481	1428	1379	1334	1292	1252	1215	1181	1149	1119	1090
5100	1688	1621	1559	1501	1448	1399	1353	1311	1271	1234	1199	1166	1136	1107
5200	1710	1642	1579	1522	1468	1419	1373	1330	1289	1252	1217	1184	1153	1124
5300	1731	1663	1600	1542	1488	1438	1392	1348	1308	1270	1235	1201	1170	1141
5400	1752	1683	1620	1561	1507	1457	1410	1367	1326	1288	1252	1218	1187	1157
5500	1772	1703	1640	1581	1527	1476	1429	1383	1344	1305	1269	1236	1204	1174
5600	1792	1723	1659	1600	1546	1493	1447	1403	1362	1323	1287	1252	1220	1190
5700	1812	1743	1679	1619	1564	1513	1466	1421	1379	1340	1304	1269	1237	1206
5800	1832	1762	1698	1638	1583	1532	1484	1439	1397	1357	1321	1286	1253	1222
5900	1851	1782	1717	1657	1601	1550	1501	1456	1414	1374	1337	1302	1269	1238
6000	1871	1800	1736	1673	1620	1569	1519	1474	1431	1391	1354	1319	1285	1254

14.7 lb/pg2 y 60 G.F.

TABLA IV

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESION lb/psg	TEMPERATURAS													
	36	40	40	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	300
6100	1690	1819	1794	1694	1638	1585	1537	1491	1446	1408	1370	1335	1301	1269
6200	1908	1838	1772	1712	1655	1603	1554	1506	1465	1425	1387	1351	1317	1285
6300	1927	1856	1790	1730	1673	1620	1571	1525	1482	1441	1403	1367	1333	1300
6400	1945	1874	1808	1747	1690	1638	1588	1542	1498	1457	1419	1382	1346	1314
6500	1963	1892	1826	1765	1708	1655	1605	1556	1515	1473	1435	1398	1363	1331
6600	1981	1909	1843	1782	1725	1671	1621	1575	1531	1489	1450	1413	1379	1346
6700	1999	1927	1861	1799	1742	1688	1638	1591	1547	1505	1466	1429	1394	1361
6800	2016	1944	1878	1816	1758	1705	1654	1607	1563	1521	1481	1444	1409	1375
6900	2033	1961	1894	1833	1775	1721	1670	1623	1578	1536	1497	1460	1424	1390
7000	2050	1978	1911	1849	1791	1737	1686	1639	1594	1552	1512	1474	1436	1404
7100	2067	1995	1928	1865	1807	1753	1702	1654	1609	1567	1527	1489	1453	1419
7200	2083	2011	1944	1882	1823	1769	1718	1670	1625	1582	1542	1504	1468	1433
7300	2100	2027	1960	1898	1839	1785	1733	1685	1640	1597	1557	1518	1482	1447
7400	2116	2043	1976	1913	1855	1800	1749	1701	1655	1612	1571	1533	1496	1461
7500	2132	2059	1992	1929	1870	1816	1764	1716	1670	1627	1586	1547	1510	1475
7600	2147	2075	2007	1944	1886	1831	1779	1731	1685	1641	1600	1561	1524	1489
7700	2163	2090	2023	1960	1901	1846	1794	1745	1699	1656	1615	1576	1536	1503
7800	2178	2106	2038	1975	1916	1861	1809	1760	1714	1670	1629	1590	1552	1516
7900	2194	2121	2053	1990	1931	1876	1824	1775	1728	1685	1643	1603	1565	1530
8000	2209	2136	2068	2005	1946	1890	1838	1789	1743	1699	1657	1617	1580	1543

14.7 lb/psg y 60 G.F.

TABLA V  
PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESION lb/psq <sup>2</sup>	TEMPERATURA ° F														
	abs	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
8100	2233	2156	2086	2021	1960	1904	1851	1801	1755	1711	1670	1630	1594	1559	
8200	2246	2170	2100	2035	1974	1917	1864	1815	1768	1724	1682	1643	1606	1571	
8300	2259	2183	2113	2048	1987	1930	1877	1828	1781	1737	1695	1656	1619	1583	
8400	2272	2196	2126	2061	2000	1943	1890	1840	1794	1749	1708	1668	1631	1596	
8500	2285	2209	2139	2074	2013	1956	1903	1853	1806	1762	1720	1681	1643	1608	
8600	2298	2222	2152	2087	2026	1969	1916	1866	1819	1775	1733	1693	1656	1620	
8700	2311	2235	2165	2099	2039	1982	1928	1878	1831	1787	1745	1705	1668	1632	
8800	2323	2248	2177	2112	2051	1994	1941	1891	1844	1799	1757	1718	1680	1644	
8900	2336	2260	2190	2124	2064	2007	1953	1903	1856	1811	1769	1730	1692	1656	
9000	2348	2272	2202	2137	2076	2019	1965	1915	1868	1823	1781	1741	1704	1668	
9100	2360	2284	2214	2149	2088	2031	1978	1927	1880	1835	1793	1753	1715	1679	
9200	2372	2296	2226	2161	2100	2043	1990	1939	1892	1847	1805	1765	1727	1691	
9300	2384	2308	2238	2173	2112	2055	2001	1951	1904	1859	1817	1776	1738	1702	
9400	2396	2320	2250	2185	2124	2067	2013	1963	1915	1871	1828	1788	1750	1713	
9500	2407	2332	2262	2197	2135	2078	2025	1974	1927	1882	1840	1799	1761	1725	
9600	2419	2343	2273	2208	2147	2090	2036	1986	1938	1894	1851	1811	1772	1736	
9700	2430	2355	2284	2219	2158	2101	2048	1997	1950	1905	1862	1822	1783	1747	
9800	2441	2366	2296	2230	2170	2113	2059	2009	1961	1916	1873	1833	1795	1759	
9900	2452	2377	2307	2242	2181	2124	2070	2020	1972	1927	1885	1845	1807	1771	
10000	2463	2388	2318	2253	2192	2135	2081	2031	1983	1938	1896	1855	1816	1779	

14.7 lb/psq<sup>2</sup> y 60 R.F.

TABLE VI

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESION lb/pg2	T E R R E F E R E N C I A													
	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
10100	2474	2399	2329	2264	2203	2146	2092	2042	1994	1948	1906	1866	1827	1790
10200	2485	2410	2340	2275	2214	2157	2103	2053	2005	1960	1917	1877	1838	1801
10300	2495	2420	2350	2285	2224	2168	2114	2064	2016	1971	1928	1887	1848	1811
10400	2506	2431	2361	2296	2235	2178	2125	2074	2027	1981	1939	1898	1859	1822
10500	2516	2441	2371	2306	2246	2189	2135	2085	2037	1992	1949	1908	1869	1832
10600	2526	2451	2382	2317	2256	2199	2146	2095	2048	2002	1960	1919	1880	1843
10700	2537	2462	2392	2327	2266	2210	2156	2106	2058	2013	1970	1929	1890	1853
10800	2547	2472	2402	2337	2277	2220	2166	2116	2068	2023	1980	1939	1900	1863
10900	2556	2482	2412	2347	2287	2230	2177	2126	2078	2033	1990	1949	1910	1873
11000	2566	2492	2422	2357	2297	2240	2187	2136	2088	2043	2000	1960	1920	1883
11100	2576	2501	2432	2367	2307	2250	2197	2146	2099	2054	2011	1970	1930	1893
11200	2586	2511	2442	2377	2317	2260	2207	2156	2108	2063	2020	1979	1940	1903
11300	2595	2521	2451	2387	2327	2270	2217	2166	2119	2073	2030	1989	1950	1913
11400	2605	2530	2461	2397	2336	2280	2226	2176	2128	2083	2040	1999	1960	1922
11500	2614	2540	2470	2406	2346	2289	2236	2186	2138	2093	2050	2009	1969	1932
11600	2623	2549	2480	2416	2355	2299	2246	2195	2148	2103	2059	2018	1979	1941
11700	2632	2558	2489	2425	2365	2308	2255	2205	2157	2112	2069	2028	1989	1951
11800	2641	2567	2498	2434	2374	2316	2265	2214	2167	2122	2079	2037	1998	1960
11900	2650	2576	2507	2443	2383	2327	2274	2224	2176	2131	2088	2047	2007	1970
12000	2659	2585	2517	2452	2393	2336	2283	2233	2186	2140	2097	2056	2017	1979

14.7 lb/pg2 y 60 G.F.

TABLA VII

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRESION lb/psg	TEMPERATURA ° F.													
	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
12100	2468	2594	2825	2461	2402	2345	2292	2242	2195	2150	2107	2068	2026	1988
12200	2476	2603	2834	2470	2411	2354	2301	2251	2204	2159	2116	2078	2035	1997
12300	2485	2611	2843	2479	2420	2363	2310	2260	2213	2168	2125	2084	2044	2006
12400	2493	2620	2852	2488	2428	2372	2320	2269	2222	2177	2134	2093	2053	2015
12500	2502	2629	2860	2497	2437	2381	2328	2278	2231	2186	2143	2102	2062	2024
12600	2510	2637	2869	2505	2446	2390	2337	2287	2240	2195	2152	2111	2071	2033
12700	2518	2645	2877	2514	2454	2399	2346	2296	2249	2204	2161	2119	2080	2042
12800	2527	2654	2886	2522	2463	2407	2355	2305	2257	2212	2169	2128	2089	2051
12900	2535	2662	2894	2531	2471	2416	2363	2313	2264	2221	2178	2137	2097	2059
13000	2543	2670	2902	2539	2480	2424	2372	2322	2275	2230	2187	2146	2106	2068
13100	2551	2678	2910	2547	2488	2432	2380	2330	2283	2238	2195	2154	2115	2076
13200	2559	2686	2918	2555	2496	2441	2388	2339	2292	2247	2204	2163	2123	2085
13300	2566	2694	2926	2564	2505	2449	2397	2347	2300	2255	2212	2171	2132	2093
13400	2574	2702	2934	2572	2513	2457	2405	2356	2308	2264	2221	2180	2140	2102
13500	2582	2709	2942	2580	2521	2465	2413	2364	2317	2272	2229	2188	2148	2110
13600	2589	2717	2950	2587	2529	2472	2421	2372	2325	2280	2237	2196	2157	2118
13700	2597	2725	2958	2595	2537	2481	2429	2380	2333	2288	2246	2204	2165	2127
13800	2604	2732	2965	2603	2544	2489	2437	2388	2341	2296	2254	2213	2173	2135
13900	2612	2740	2973	2611	2552	2497	2445	2396	2349	2305	2262	2221	2181	2143
14000	2619	2747	2981	2618	2560	2505	2453	2404	2357	2313	2270	2229	2189	2151

14.7 lb/psg y 60 S.F.

TABLE VIII

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARRIL

PRECISION	lb/pg <sup>2</sup>	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
14100	2826	2708	2686	2626	2568	2518	2461	2412	2365	2320	2278	2237	2197	2159	
14200	2833	2762	2695	2633	2575	2520	2469	2420	2373	2328	2286	2246	2205	2167	
14300	2840	2769	2703	2641	2583	2528	2476	2427	2381	2336	2294	2252	2213	2175	
14400	2847	2776	2710	2648	2590	2536	2484	2435	2388	2344	2301	2260	2221	2182	
14500	2854	2783	2717	2655	2598	2543	2491	2443	2396	2352	2309	2268	2229	2190	
14600	2861	2790	2724	2663	2605	2550	2499	2450	2404	2359	2317	2276	2236	2198	
14700	2868	2797	2731	2670	2612	2558	2506	2456	2411	2367	2324	2283	2244	2206	
14800	2875	2804	2738	2677	2619	2565	2514	2465	2419	2374	2332	2291	2252	2213	
14900	2882	2811	2745	2684	2627	2572	2521	2473	2426	2382	2340	2299	2259	2221	
15000	2888	2818	2752	2691	2634	2580	2528	2480	2434	2389	2347	2306	2267	2228	
15100	2895	2825	2759	2698	2641	2587	2536	2487	2441	2397	2354	2314	2274	2236	
15200	2902	2831	2766	2705	2648	2594	2543	2494	2448	2404	2362	2321	2282	2243	
15300	2908	2838	2773	2712	2655	2601	2550	2502	2456	2411	2369	2328	2289	2251	
15400	2915	2845	2779	2719	2661	2608	2557	2509	2463	2419	2376	2336	2296	2258	
15500	2921	2851	2786	2725	2668	2615	2564	2516	2470	2426	2384	2343	2303	2265	
15600	2927	2857	2793	2732	2675	2622	2571	2523	2477	2433	2391	2350	2311	2272	
15700	2934	2864	2799	2739	2682	2629	2578	2530	2484	2440	2398	2357	2318	2279	
15800	2940	2870	2806	2745	2688	2635	2585	2537	2491	2447	2405	2364	2325	2287	
15900	2946	2877	2812	2752	2695	2642	2591	2544	2498	2454	2412	2371	2332	2294	
16000	2952	2883	2818	2758	2702	2648	2598	2550	2505	2461	2419	2378	2339	2301	

14.7 lb/pg<sup>2</sup> y 60 O.F.

TABLA IH

PIES CUBICOS DE NITROGENO POR BARIL

PRESION lb/pg <sup>2</sup>	TEMPERATURA G.F.														
	abs	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
18100	3070	3003	2941	2883	2829	2778	2729	2683	2639	2596	2555	2516	2477	2439	
18200	3070	3008	2946	2889	2834	2783	2735	2689	2645	2602	2562	2522	2483	2445	
18300	3080	3014	2952	2894	2840	2789	2741	2695	2651	2608	2568	2528	2489	2451	
18400	3085	3019	2957	2900	2846	2795	2746	2700	2657	2614	2573	2534	2495	2457	
18500	3090	3024	2962	2905	2851	2800	2752	2706	2662	2620	2579	2540	2501	2463	
18600	3095	3029	2968	2910	2856	2806	2758	2712	2668	2626	2586	2546	2507	2469	
18700	3100	3034	2973	2914	2862	2811	2763	2718	2674	2632	2591	2552	2513	2475	
18800	3105	3039	2978	2918	2867	2817	2769	2723	2680	2638	2597	2558	2519	2481	
18900	3110	3044	2983	2924	2873	2822	2774	2729	2685	2643	2603	2563	2523	2485	
19000	3115	3049	2988	2928	2878	2827	2780	2734	2691	2649	2609	2569	2529	2491	
19100	3120	3054	2993	2934	2883	2833	2785	2740	2697	2655	2614	2575	2535	2497	
19200	3124	3059	2998	2941	2888	2838	2791	2745	2702	2660	2620	2581	2542	2505	
19300	3129	3064	3003	2947	2893	2843	2796	2751	2708	2666	2626	2586	2548	2510	
19400	3134	3069	3008	2952	2899	2849	2801	2756	2713	2671	2631	2592	2554	2516	
19500	3138	3073	3013	2957	2904	2854	2807	2762	2719	2677	2637	2598	2559	2522	
19600	3143	3078	3018	2962	2909	2859	2812	2767	2724	2683	2642	2603	2565	2528	
19700	3148	3083	3023	2966	2914	2864	2817	2772	2729	2688	2648	2609	2571	2533	
19800	3152	3087	3027	2971	2919	2869	2822	2778	2735	2693	2653	2614	2576	2539	
19900	3157	3092	3032	2976	2924	2874	2827	2783	2740	2699	2659	2620	2582	2544	
20000	3161	3097	3037	2981	2929	2879	2833	2788	2745	2704	2664	2625	2587	2550	

14.7 lb/pg<sup>2</sup> y 60 G.F.

## CAPITULO II

### CEMENTACION POR ETAPAS

La cementación en dos ó tres etapas, son operaciones en que cada etapa es una operación distinta, separada una de la otra. La combinación requerida de tapones para cada uno de estos dos métodos, difiere uno del otro.

La cementación por etapas, permite cementar T.R. en formaciones con bajo gradiente de fractura, esto es posible ya que se reduce la presión hidrostática de la columna de cemento, esta reducción se hace posible mediante el acortamiento del intervalo ha cementar con el fin de evitar daños a formaciones débiles, evitar pérdidas de cemento, facilitar la cementación de columnas largas.

## II.1. CEMENTACION EN DOS ETAPAS.

Una vez que la T.R. se encuentra a la profundidad programada, se recomienda revisar el número de tramos sobrantes, para confirmar que se han metido al pozo todos los tramos programados, además se debe dar la última circulación, la cual debe durar el tiempo necesario para desalojar el lodo del fondo hasta la superficie, esto es como una circulación mínima, ya que se debe circular hasta dejar el lodo con las mejores propiedades reológicas y evitar los recortes contenidos en éste. Una vez hecho lo anterior se procede a cementar la tubería de ademe.

Se bombea un bache de fluido separador, con el fin de evitar la contaminación del cemento con el fluido de perforación, inmediatamente después se bombea la cantidad de cemento previamente calculada para la primera etapa. Posteriormente se envía un tapón inferior que separará el cemento de la primera etapa y el fluido subsiguiente, este lo desplazará hasta llegar al asiento de hule, al llegar el tapón al asiento

existirá un incremento de la presión, la cual nos indicará el final de la primera etapa.

Después es recomendable purgar la presión del cemento en la superficie y medir el fluido de regreso, esta medición comprueba el funcionamiento de las válvulas de contrapresión (sistema de flotación) en el equipo de la primera etapa, y se usa más tarde para saber si el tapón de apertura está o no sentado en el cople de cementación múltiple.

Una vez concluida la primera etapa, se arroja el tapón de apertura para operar la camisa de apertura, se le dá el tiempo suficiente para que llegue al asiento en el cople de cementación múltiple (10 a 15 minutos aproximadamente por cada 300 m. de profundidad) antes de realizar la operación

Transcurrido el tiempo, se le aplica una presión aproximada de 56 a 84 kg/cm<sup>2</sup> para accionar la camisa interior inferior y así descubrir los orificios de cementación, para verificar que los orificios de cementación se han abierto se debe registrar una caída

de presión (se crea por el escape del fluido al e.a.) y una estabilidad de circulación del lodo. Si la presión se aproxima a la presión de cementación de la primera etapa, sin indicar que los orificios de cementación se han abierto, es conveniente purgar la presión y medir el volumen de fluido de descarga. Si el volumen medido es aproximado al de la primera etapa, indica que el tapón de apertura no se ha alojado sobre el cople de cementación múltiple, puesto que el fluido está regresando de más abajo del cople de cementación. Por lo tanto, es recomendable esperar un lapso de 15 minutos antes de repetir la operación para que el tapón se asiente.

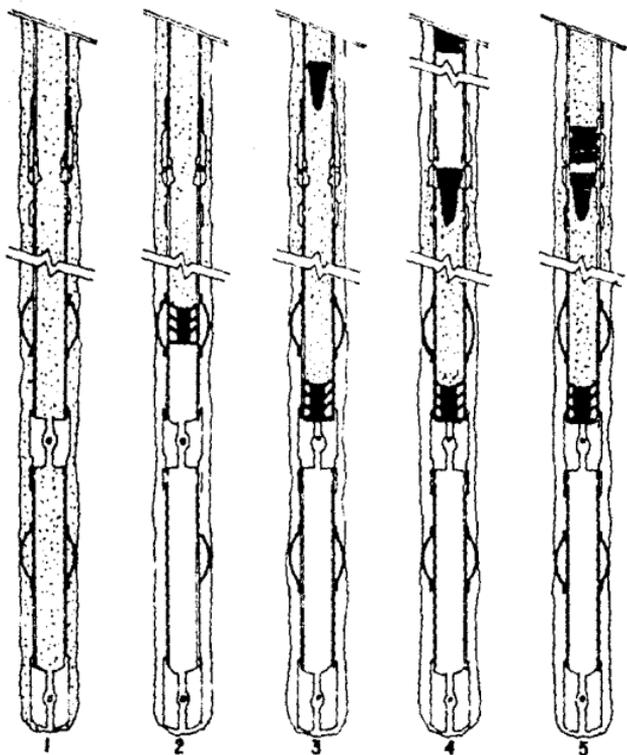
Si al purgar la presión, el volumen desalojado es menor que el de la primera etapa, el tapón de apertura se ha alojado en el cople de cementación múltiple. Posteriormente se circula y se espera el tiempo suficiente para el fraguado de la primera etapa.

Para la segunda etapa, con los orificios de cementación abiertos y fraguado el cemento de la prim

ra etapa, se procede a bombear el cemento calculado, desplazando este con el tapón superior o de cierre. Este tapon se desplaza hasta su asiento en el cople de cementación múltiple; de inmediato se observará un incremento repentino de presión, el cual deberá elevarse aproximadamente  $70 \text{ kg/cm}^2$  sobre la presión final de cementación de la segunda etapa (presión de circulación). Al llegar a este punto los orificios de cementación se cerrarán. Esto se debe realizar en una operación continua, sin bajar la velocidad de las bombas y mucho menos pararlas. Posteriormente se comprueba si el cople se a cerrado o no, para esto, se purga algo de la presión de la tubería de cementación y se observa el volumen regresado de fluido de descarga, si no ha cerrado, el flujo de descarga será excesivo y continuo, en este caso se recomienda incrementar la presión aproximadamente  $105 \text{ kg/cm}^2$  sobre la presión final de cementación y volver a comprobar el cierre del cople.

Fig. II.1.A.

## DIAGRAMA DE CEMENTACION EN DOS ETAPAS



- 1.- LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO HA SIDO CORRILA CON TODOS SUS ACCESORIOS COLOCADOS.
- 2.- LA PRIMERA ETAPA DE CEMENTACION ESTA A PUNTO DE TERMINARSE Y EL TAPON INFERIOR HA SIDO BOMBEADO.
- 3.- LA PRIMERA ETAPA HA SIDO TERMINADA Y EL TORPELO HA SIDO LANZADO.
- 4.- EL COCLE DE CEMENTACION MULTIPLE SE ENCUENTRA EN SU POSICION ABIERTA. LA CIRCULACION SE HA COMPLETADO E INICIADO LA SEGUNDA ETAPA DE CEMENTACION. SE ACERCA EL TAPON SUPERIOR AL COCLE.
- 5.- HA CONCLUIDO LA SEGUNDA ETAPA DE CEMENTACION. EL COCLE SE ENCUENTRA EN SU POSICION CERRADO.

FIG. II. I. A

## II.2. CEMENTACION EN TRES ETAPAS.

La cementación en tres etapas puede usarse cuando se desea colocar una columna grande de cemento sobre una formación débil. El cople de cementación múltiple para la segunda etapa se colocará a una distancia relativamente pequeña sobre la zona débil.

Para la primera etapa, se colocará suficiente cemento para elevar su nivel en el espacio anular hasta alcanzar la profundidad del cople de cementación múltiple para dos etapas. Este cople se abre luego con el tapón de apertura y se hace circular fluido desplazante por él mismo, hasta que haya iraguado el cemento de la primera etapa. Al ocurrir esto, el cemento de la primera etapa sirve de obturador sobre la zona débil. Las etapas restantes (segunda y tercera) se cementan entonces sin poner en peligro la zona débil.

La herramienta que se utiliza para dos etapas, está proyectada para usarse exclusivamente con el cople de cementación múltiple para tres etapas. En tales operaciones, la primera etapa se cementa a través

de la zapata de la T.R., de la manera convencional; la etapa media (segunda), es cementada a través de los orificios del cople de cementación múltiple para dos etapas como ya fue visto anteriormente, y la tercera y última etapa se cementa a través del cople de cementación múltiple para tres etapas.

Ya que el cople de cementación múltiple para la segunda etapa va colocado mas abajo que el cople de cementación para la tercera etapa, los tapones que accionan esta herramienta tienen que pasar por el cople correspondiente a la tercera etapa, por lo que, las camisas interiores de la herramienta para la segunda etapa deben ser de menor diámetro interior que el de las ramisas interiores de la herramienta para la tercera etapa y por ende el diámetro exterior de los tapones accionadores deben ser también menores, previendo que pase por la herramienta de la tercera etapa.

Hay que tener la precaución de no confundir los tapones correspondientes a cada etapa.

La operación en sí para la tercera etapa, se realiza de la misma forma que para la segunda etapa.

### 11.3. DESCRIPCION DEL COPLE DE CEMENTACION MULTIPLE.

Para llevar a cabo la cementación por etapas se requiere de la herramienta cople de cementación múltiple. Esta herramienta permite colocar con eficiencia más de una etapa de cemento, en el exterior de la misma sarta de T.R. en diferentes puntos seleccionados. Para esto, el equipo, cuenta con tapones que permiten la apertura y cierre controlados de los orificios de cementación.

La obturación se realiza por medio de un sistema de camisas deslizables y pernos de corte, que mediante la acción de presiones diferentes, permiten su cambio de posición relativa.

El cople de cementación múltiple consta de las siguientes partes principales :

a) CUERPO PRINCIPAL y dos camisas interiores perforables de aluminio, afianzadas en sus puestos por

pernos rompibles a una cierta presión, y una camisa obturadora sostenida en posición abierta por pernos rompibles y en posición de cierre por un anillo trabador. Fig. II.3.A.

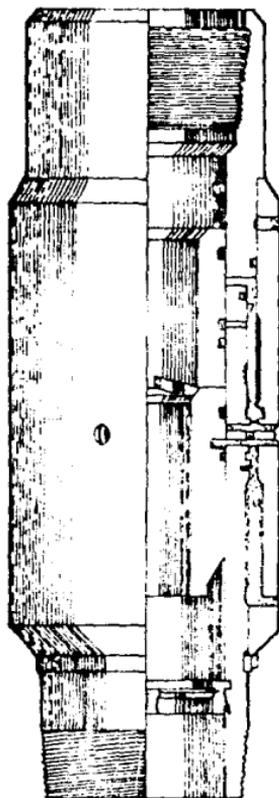
b) TAPON INFERIOR, este tapón está diseñado para desplazar y separar el cemento del fluido de perforación y también pasar a través de las camisas interiores del cople de cementación múltiple sin hacerlas funcionar, desplazando el cemento hasta el momento de centrar sobre la base de sello. Fig. II.3.B..

c) TORPEDO O TAPON DE APERTURA, con este tapón se opera la apertura de los orificios de cementación y simultáneamente dirige al cemento en la dirección adecuada. Este tapón asienta y sella en la camisa interior inferior del cople de cementación múltiple. Fig. II.3.C

d) TAPON SUPERIOR O DE CIERRE, tiene doble función: desplazar el cemento de la segunda etapa y posteriormente realizar la operación de cierre de los orificios de cementación, mediante el asentamiento y sello del

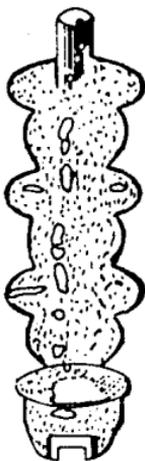
mismo sobre la camisa superior interior del cople de cementación múltiple. Fig. II.4.0..

e) ASIENTO DE HULE SELLANTE, va colocado sobre el cople flotador o cople diferencial y sirve de receptáculo del primer tapón desplazador y permite un sello efectivo que indica la terminación de la primera etapa.



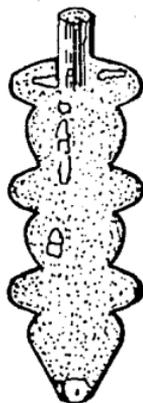
COPE DE CEMENTACION MULTIPLE

FIG. II. 3. A



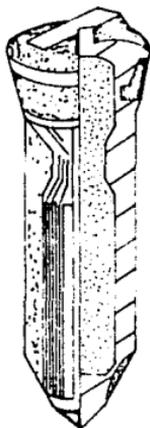
TAPON SUPERIOR O DE  
CIERRE

FIG. II, 4, D.



TAPON INFERIOR

FIG. II, 3, B.



TAPON DE APERTURA O  
TORPEDO

FIG. II. 3. C.

## CAPITULO III

### EMPACADOR INFLABLE.

Un problema que se puede presentar al cementar las tuberías de revestimiento en formaciones con bajo gradiente de fractura, es la pérdida de circulación, lo cual ocasiona que el cemento se introduzca hacia la formación y no cumpla con su objetivo que se busca al cementar una T.R..

La solución a este problema, se ha resuelto con la utilización de la herramienta llamada Empacador exterior para T.R. o comúnmente llamado Empacador inflable.

El efectuar una cementación adecuada de la T.R., evita gastos innecesarios en la etapa de terminación de un pozo, ya que no se requerirán de las cementaciones forzadas.

### III.1 DESCRIPCION.

El empacador inflable puede anclarse en agujero descubierta ó en T.R.. Se puede emplear en la mayoría de los tamaños de T.R., grados, roscas y pesos.

Este empacador está diseñado de tal modo que pueda expandirse un 70% o más de su tamaño original y sella o empaqa aún cuando se tengan altas presiones diferenciales.

También está diseñado para funcionar como parte integral de la T.R. y proporcionar un sello permanente y seguro entre la superficie exterior de ésta y la pared del pozo. Además de dar un sello permanente y sin fugas, físicamente centraliza la T.R. a medida que se infla, esto ayuda a realizar un buen trabajo de cementación, ya que evita la canalización de la lechada de cemento.

### III.2. ACCESORIOS.

Al empacador inflable lo constituyen las principales partes siguientes: (fig. III.2.A)

#### 1) PERNOS DE RUPTURA.

Estos pernos se utilizan para obstruir completamente el orificio de expansión de todas las fuentes de presión, hasta que se desee operar el empaque.

Estos pernos son de tamaño estándar y se instalan en todos los empacadores al momento de su fabricación. Los pernos más grandes para la cementación en dos etapas se pueden instalar en el campo.

En un trabajo de cementación convencional de un solo tapón de desplazamiento, los pernos se romperán al pasar el tapón de desplazamiento a través del acoplamiento de la válvula.

# EMPACADOR INFLABLE

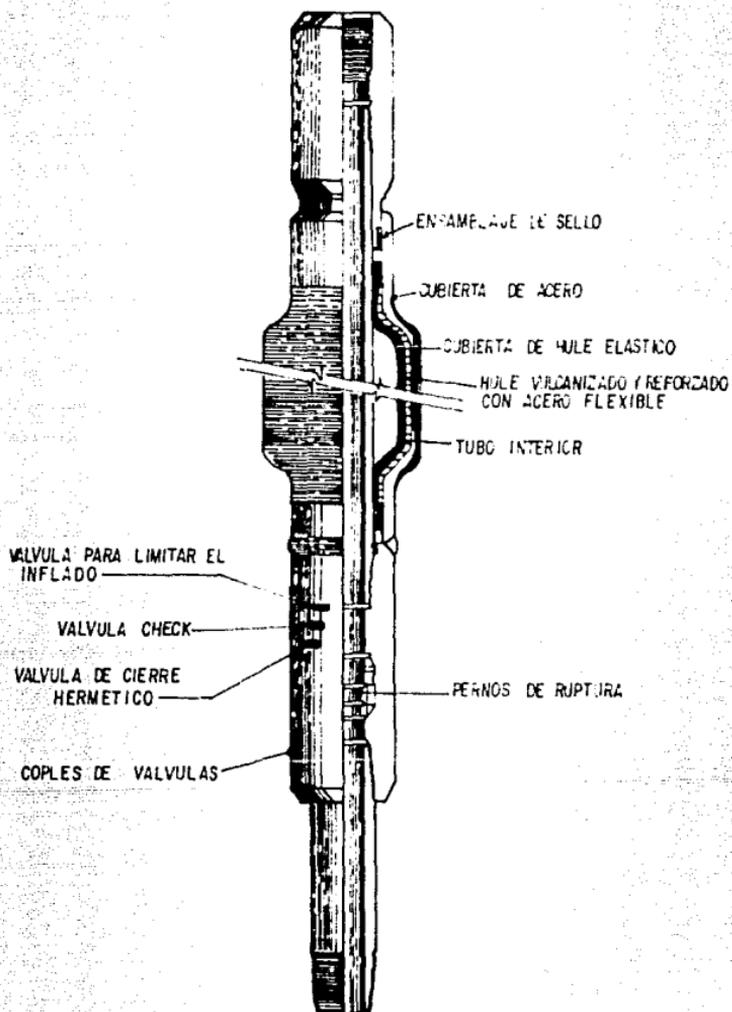


FIG. III. 2.A

Si el tapón de desplazamiento no se utiliza y no hay otro medio para romper estos pernos después de alcanzar la profundidad de operación, se tendrán que quitar los pernos, antes de instalar el empacador en la sarta de T.R..

## II) MANDRIL.

El mandril, es una tubería de revestimiento de corta longitud, la cual sirve como cuerpo principal del empacador inflable.

## III) ELEMENTO INFLABLE.

El elemento inflable, es el accesorio más importante del empacador, este es un instrumento de tipo diafragma, reforzado con acero flexible, este reforzamiento está vulcanizado en toda su longitud para permitir una fuerza positiva y concéntrica al inflarse, esto facilitará la concentración de la T.R. y además proporciona un sello seguro y adecuado cuando se tengan agujeros cavernosos o irregulares.

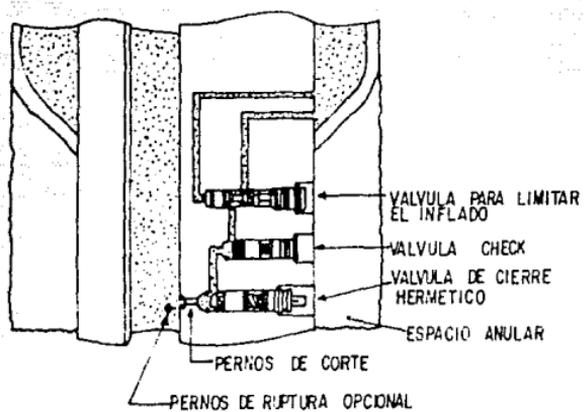
#### IV) COUPLE DE VALVULAS.

El cople de válvulas está constituido por tres válvulas, dos de retención y una de cierre hermético. Fig. III.2.8..

##### A) VALVULA DE RETENCION.

La válvula de retención, tiene como característica general, permitir el paso del flujo en un solo sentido y evitar que éste regrese.

En el empacador se usa una válvula check con doble sello, acondicionada por un resorte que se abre con una presión diferencial y cierra herméticamente cuando la presión de expansión sobre la T.R. disminuye.



## MECANISMO DE INFLADO

FIG. III. 2. B

## B) VALVULA DE CIERRE HERMETICO.

Esta válvula de cierre de seguridad tiene dos funciones:

1) Es una válvula de cierre con un mecanismo de "candado", que se engancha cuando la válvula cierra. Este mecanismo asegura permanentemente la válvula en la posición de cierre, con lo que se evita cualquier movimiento posterior de fluidos del interior de la T.R. hacia el empacador o inversamente.

La válvula de cierre de seguridad está diseñada para dar lugar a varias medidas de pernos de corte y que pueden cambiarse en el pozo.

El perno de corte a utilizar depende de las condiciones del agujero y de la aplicación del empacador.

En la tabla siguiente se mencionan los diámetros normales de los pernos de corte y su respectiva presión a ejercer sobre estos para su ruptura.

Diámetro [pg]	Esfuerzo de corte [lb/pg <sup>2</sup> ]
0.040	500
0.045	750
0.051	1000
0.057	1250
0.064	1600
0.072	2000
0.081	2600

Nota: los pernos de corte tienen un rango de +/- 15% del valor del esfuerzo de corte.

2) Es una válvula de contrapresión, diseñada para abrirse a una presión diferencial previamente establecida, esta presión se introduce en el interior de la T.R., la cual acciona un resorte que provoca que se cierre la válvula una vez que la presión disminuye. La válvula está asegurada con pernos de corte.

### III.3. FUNCIONAMIENTO DEL EMPACADOR INFLABLE.

Se utiliza un conjunto de instrumentos de protección para evitar que el empacador se infle antes de tiempo.

Dos pernos de ruptura previenen que cualquier fluido existente en el interior de la T.R. se introduzca en el elemento inflable, hasta que el tapón pase a través del empacador. Este tapón rompe los pernos antes de que el cemento alcance la zapata de la T.R.. Al llegar el tapón al cople diferencial, la presión se incrementará, provocando que el fluido abra las válvulas e infle el elemento de hule.

Se utiliza un perno de corte para abrir la válvula de cierre hermético, esto a una presión predeterminada. Esta válvula opera a una presión diferencial a favor de la T.R., cuando esta presión diferencial alcanza el máximo esfuerzo cortante, el perno seleccionado se romperá. La presión diferencial (presión de inflado) atrapada en el empacador, es la diferencia de la presión aplicada dentro de la tubería y la presión que existe dentro del empacador mientras se realiza el inflado.

El fluido de control abre las dos válvulas de retención, iniciándose el inflado del elemento de hule, una vez que el elemento de hule se ha inflado lo requerido, una pequeña disminución de la presión aplicada cerrará las tres válvulas, permitiendo retener la presión dentro del elemento inflable. Las válvulas de contrapresión también sellan contra una posible aplicación de presión posterior.

Las presiones de inflado varían entre 500 y 1500 lb/pg<sup>2</sup> (no se debe dejar tomar en cuenta que el fluido de inflado se encuentra atrapado dentro del elemento inflable y que ejerce una presión de colapso sobre el mandril más alta que las presiones ya existentes en el pozo. En términos generales, la presión hidrostática en el empacador más la presión de inflado, no deben exceder el rango de presión al colapso del mandril estando sujetas por la resistencia a la tubería y las condiciones del pozo.

Varios empacadores inflables pueden ser instalados como parte integral de la T.R. y cada uno puede ser inflado individualmente.

### III.4. APLICACIONES.

Las operaciones en las que se puede utilizar un empacador inflable son:

1) Separación de zonas de interés en el pozo (zonas de baja presión, acuíferos, intervalos con hidrocarburos, etc.).

2) Cementación de tuberías de revestimiento en una o dos etapas.

3) Cementación de tuberías cortas (liners) en dos etapas.

4) Cementación de tuberías de revestimiento en pozos desviados.

### III.5. VENTAJAS.

- a) Proteger las zonas débiles contra daños en el alrededor del pozo causados por la cementación.
- b) Elimina la canalización de la lechada al cementar tuberías de revestimiento.
- c) Elimina la comunicación entre zonas.
- d) Separa las zonas permeables.
- e) Proporciona la separación permanente entre zonas aún cuando el cemento se haya deteriorado.
- f) Centra de manera efectiva la I.R.

### III.6. PROCEDIMIENTOS GENERALES DE OPERACION.

Procedimiento ha seguir para realizar una cementación de tuberías de revestimiento en una y dos etapas con la utilización de empacadores inflables.

#### III.6.1. CEMENTACION EN UNA ETAPA.

- i) Comprobar circulación.
- ii) Bombear bache de fluido espaciador.
- iii) Bombear lechada de cemento.
- iv) Lanzar tapón de desplazamiento.

Estos pasos ya fueron explicados en el capítulo II.

v) Una vez que el tapón de desplazamiento esté por debajo del empacador inflable, es conveniente que se realice una pausa en el bombeo ó en caso neces

rio éste deberá suspenderse temporalmente antes de que el tapón llegue al cople diferencial y se halla registrado una lectura de presión diferencial estática que ha sido aplicada para colocar el cemento en el espacio anular.

vi) Al asentarse el tapón de desplazamiento en el cople diferencial, lentamente se aplicará presión en forma continua para abrir la válvula de cierre hermético e inflar el empacador, (cuando el tapón de desplazamiento pasa a través del empacador los pernos se rompen).

Aproximadamente se debe mantener la presión durante 15 minutos, ó sea, durante este intervalo no permitir que la presión sea menor que la presión mínima necesaria para el rompimiento de los pernos.

Si el empacador está en ó cerca del fondo de la T.R., la presión manométrica en la superficie necesaria para romper por esfuerzo el perno en el empacador, será la presión manométrica de la superficie necesaria para balancear el cemento en el espacio anular más el valor de la presión de corte del perno utilizado.

Consecuentemente se descargará totalmente la presión de la T.R. lo más rápido posible (esto cierra y asegura la válvula de cierre hermético).

Debido a que la calidad de los pernos varia ligeramente es una buena práctica incrementar la presión de corte 500 lb/pg<sup>2</sup> para compensar las variaciones del manómetro y asegurarse completamente que el empacador quedará inflado.

Para inflar el empacador, unicamente se necesitan dos ó tres emboladas de la bomba.

Para comprobar que el empacador se ha inflado se deben observar las emboladas de la bomba y el manómetro superficial según las especificaciones de corte de los pernos, se detectará un retraso en el ascenso continuo del indicador del manómetro, lo que indicará el inflado del empacador. Generalmente no se observa una súbita caída de presión en esta operación, ver figura III.6.A..

### III.6.2. CEMENTACION EN DOS ETAPAS.

Se procede de manera similar a la cementación en una etapa, hasta que el empacador es inflado. Posteriormente se procede a arrojarse el tapón que abrirá el cople de cementación múltiple y efectuar la segunda etapa de cementación por arriba del empacador inflable. Este tema se trató a detalle en el capítulo II (vea figura III.6.B.)

CEMENTACION DE T.R. EN UNA ETAPA UTILIZANDO  
EMPA C A D O R I N F L A B L E

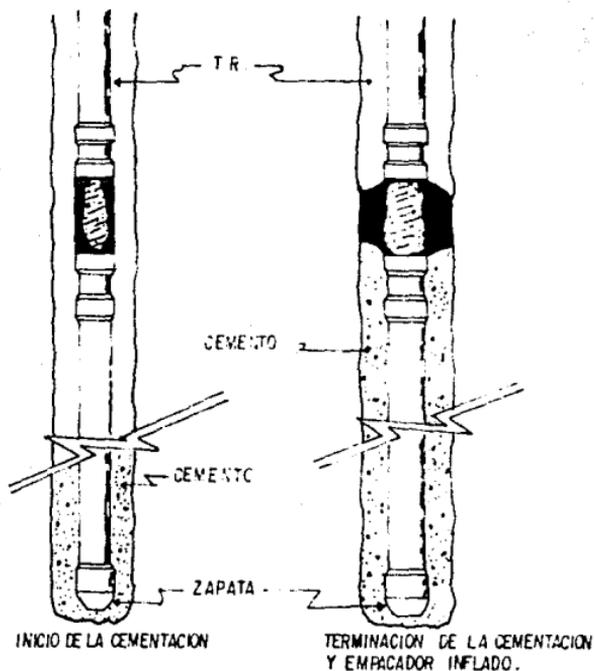


FIG. III. 6. 4

# CEMENTACION DE T.R. EN DOS ETAPAS UTILIZANDO EMPACADOR INFLABLE.

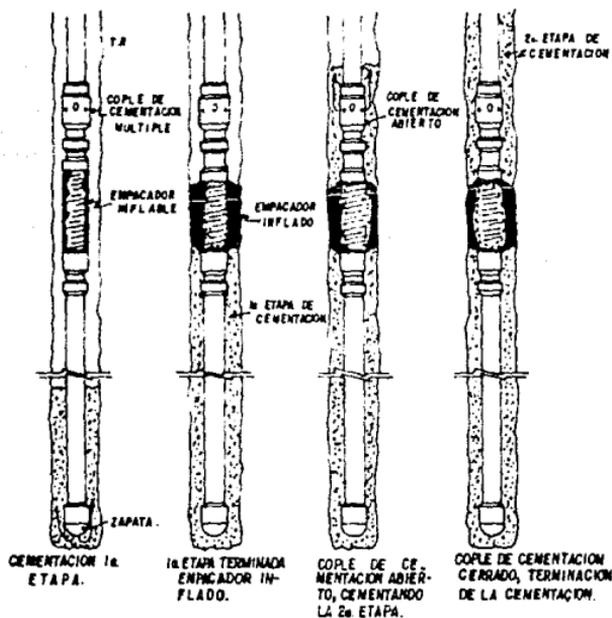


FIG.III. 6. B

## CALCULOS PARA LA OPERACION DEL EMPACADOR INFLABLE

Se mostrará la secuencia de cálculo para determinar la presión de inflado y el esfuerzo mínimo de los pernos de corte del empacador.

Para el inflado del empacador se determina la presión diferencial de la T.R. hasta el empacador, esta se resta al esfuerzo de corte máximo del perno y se suma la diferencia a la presión en la superficie. La diferencia que actúa sobre el perno de corte durante la cementación es mucho más alta en empacadores colocados cerca de la zapata que en los empacadores colgados cerca de la superficie.

Es necesario conocer los siguientes parámetros, para la determinación de los valores mínimos de ruptura de los pernos de corte:

- a) Densidad de la lechada de cemento.
- b) Profundidad total de la T.R.,
- c) Profundidad final del empacador.
- d) Densidad del fluido de desplazamiento.
- e) Diámetro promedio del agujero calibrado.
- f) Especificación de la T.R..

Con los datos anteriores se calculará:

- 1. Volumen de cemento que será bombeado.
- 2. Gradiente diferencial (peso del cemento comparado con el peso del fluido de desplazamiento).
- 3. Altura de la columna de cemento en la T.R..
- 4. Altura de la columna de cemento en el e.a..
- 5. Máxima presión diferencial estática generada por la columna de cemento en la T.R.. Esto ocurrirá cuando el frente de la columna de cemento alcance al empacador, la máxima presión que actúa sobre los empacadores colocados cerca del fondo de la T.R. ocurrirá cuando la lechada este dentro de la T.R. y no halla salido de la zapata.

6. Máxima presión diferencial estática generada por la columna de cemento en el espacio anular. Esto ocurrirá cuando la columna de cemento halla sido desplazada y se alcance la presión de balance, ó sea, es cuando el tapón de desplazamiento se aloja en el cople diferencial y se manifiesta como presión manométrica en la superficie.

7. La presión manométrica necesaria para tener seguridad de dejar el empacador inflado. Adicionandole una presión de  $500 \text{ lb/pg}^2$ , debido a la variación del rango de corte del perno y la variación del manómetro.

Se debe tener precaución de que la presión de la superficie no exceda la resistencia a la presión interna de las uniones superiores de la T.R..

### 8. El esfuerzo necesario para el mendril.

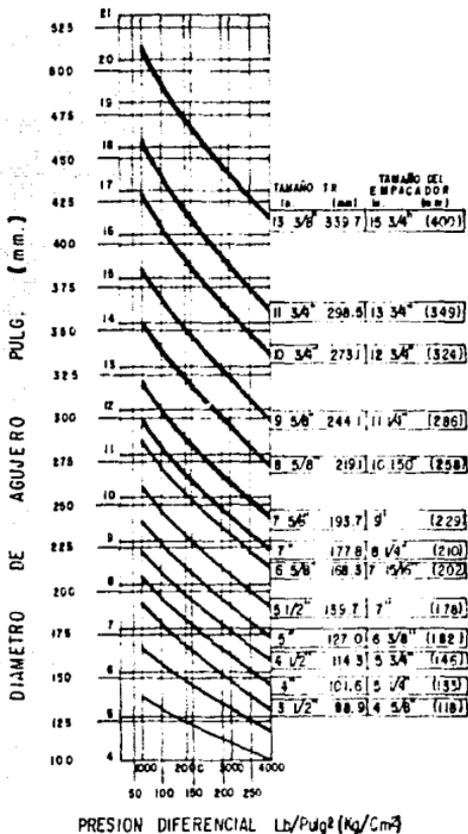
La sección corta de la T.R. que contiene el empacador tiene un mayor esfuerzo al colapso aplicado a él, debido a que está rodeado de un fluido atrapado a alta presión.

Dependiendo del diámetro del empacador inflable utilizado, varía la presión diferencial en la cual el elemento inflable va estar sometido.

La presión de colapso, la presión para inflar el empacador y la selección de los pernos de corte deberán ser basados en la aplicación específica para cada caso.

En la grafica III.6.1. se muestra la presión máxima de trabajo para diferentes presiones diferenciales que actúan en el elemento inflable para un diámetro determinado de agujero, ó sea, es la presión sobre el empacador contra la presión abajo de éste cuando está empacado. Esta gráfica no muestra la presión que deberá usarse para inflar el empacador.

# GRAFICA III.6.1 CURVAS DE PRESION DIFERENCIAL



### Ejemplo

Se requiere cementar una T.R. de 17 3/8" a la profundidad de 2146.0 m., en una zona con bajo gradiente de fractura, para esto, la cementación se realizará en dos etapas a través de un cople de cementación múltiple y utilizando un empacador inflable.

### DATOS:

T.R. de 13 3/8"; k-55; 68 lb/pie.

Profundidad = 2146.0 m.

Diámetro del pozo = 17 1/2".

Densidad del lodo = 1.20 gr/cc.

Temperatura de fondo = 120 °F.

Gradiente de fractura = 0.65 lb/pg<sup>2</sup>/pie.

Zona de bajo gradiente de fractura = 2030.0 m.

Capacidad T.R. 13 3/8"; 68 lb/pie = 78 lt/m.

Capacidad entre T.R. de 13 3/8" y 20" = 112 lt/m.

Capacidad T.R. 13 3/8" y agujero 17 1/2" = 64.5 lt/m.

Profundidad T.R. de 20" = 600.0 m.

Profundidad cople de cementación múltiple = 551.0 m.

Profundidad empacador inflable = 561.0 m.

Volumen de espaciador = 65 bls.

PRIMERA ETAPA:

Densidad del cemento 1 = 1.90 gr/cc

Densidad del cemento 2 = 1.60 gr/cc.

Altura del cemento 1 = 116.0 m.

Altura del cemento 2 = 580.0 m.

SEGUNDA ETAPA:

Densidad del cemento 3 = 1.90 gr/cc.

Densidad del cemento 4 = 1.60 gr/cc.

Altura del cemento 3 = 406.0 m.

Altura del cemento 4 = 145.0 m.

Rendimiento de la lechada de cemento 1 y 3 = 38 lt/sc.

Rendimiento de la lechada de cemento 2 y 4 = 82.96 lt/sc

A) CALCULO DEL VOLUMEN DE CEMENTO.

- PRIMERA ETAPA:

$$\begin{aligned} \text{VOL}_1 &= H_{\text{CMTO.1}} * \text{CAP.} \\ &= 116.0 \text{ m} * 64.5 \text{ lt/m} \end{aligned}$$

$$\text{VOL}_1 = 7482 \text{ lt}$$

$$\begin{aligned} \text{No. de sacos}_1 &= \text{VOL}_1 / \text{Rendimiento} \\ &= 7482 \text{ lt} / 38 \text{ lt/sc} \end{aligned}$$

$$\text{No. de sacos}_1 = 197 \text{ sacos}$$

$$\text{VOL}_2 = 580 \text{ m} * 64.5 \text{ lt/m}$$

$$VOL_2 = 37410 \text{ lt}$$

$$\text{No. de sacos}_2 = 37410 \text{ lt} / 82.96 \text{ lt/sc}$$

$$\text{No. de sacos}_2 = 451 \text{ sacos}$$

No. de sacos requeridos para la primera etapa = 648 sc

- SEGUNDA ETAPA

$$VOL_3 = 406 \text{ m} * 112 \text{ lt/m}$$

$$VOL_3 = 45472 \text{ lt}$$

$$\text{No. de sacos}_3 = 45472 \text{ lt} / 38 \text{ lt/sc}$$

$$\text{No. de sacos}_3 = 1197 \text{ sc}$$

$$VOL_4 = 145 \text{ m} * 112 \text{ lt/m}$$

$$VOL_4 = 16240 \text{ lt}$$

$$\text{No. de sacos}_4 = 196 \text{ sc}$$

No. de sacos requeridos para la segunda etapa = 1393 sc

B) CALCULO DE LA ALTURA DEL CEMENTO EN LA T.R. (arriba del empacador inflable).

I- Vol entre T.R.  $13 \frac{3}{8}'' = 561.0 \text{ m} * 78 \text{ lt/m} = 43758 \text{ lt}$

II- Vol de lechada de cemento (primera etapa) = 44892 lt

Como II > I

entonces  $H_{\text{CMTO}} = 561.0 \text{ m}$  (profundidad de colocación del empacador inflable).

C) CALCULO DE LA MAXIMA PRESION DIFERENCIAL ESTADICA actuando sobre el empacador dentro de la T.R.

Antes de inflar el empacador durante el bombeo del cemento de la primera etapa el punto más crítico sobre el empacador inflable ocurrirá, cuando el cemento de densidad de 1.90 gr/cc más el cemento de 1.60 gr/cc esten dentro de la T.R., ver fig. 1-P.

$$H_{CMT01} \text{ dentro de T.R.} = (197 \text{ sc} \times 38 \text{ lt/sc}) / 78 \text{ lt/m}$$

$$H_{CMT01} \text{ dentro de T.R.} = 96 \text{ m.}$$

$$H_{CMT02} \text{ dentro de T.R.} = (451 \text{ sc} \times 82.96 \text{ lt/sc}) / 78 \text{ lt/m}$$

$$H_{CMT02} \text{ dentro de T.R.} = 479.7 \text{ m.}$$

$$H_{TOTAL} = 575.7 \text{ m}$$

$$561 \text{ m} - 96 \text{ m} = 465 \text{ m} = H_{CMT02}$$

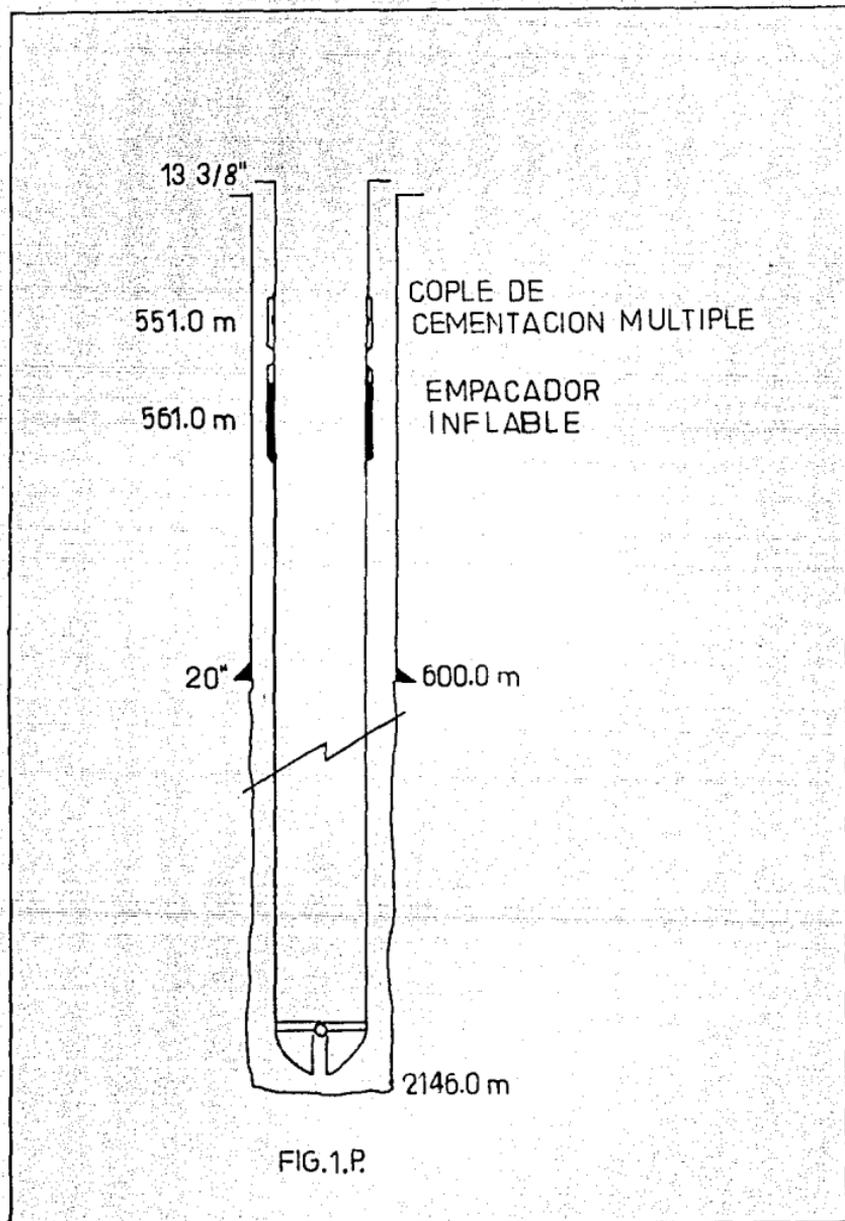
$$Ph_{CMT01} = 96 \text{ m} \times (3.28 \text{ pie} / 1 \text{ m}) \times 1.90 \text{ gr/cc} \times (0.433 \text{ lb/pg}^2)$$

$$Ph_{CMT01} = 259 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{CMT02} = 465 \text{ m} \times (3.28 \text{ pie} / 1 \text{ m}) \times 1.60 \text{ gr/cc} \times (0.433 \text{ lb/pg}^2 / 1 \text{ gr/cc})$$

$$Ph_{CMT02} = 1056.6 \text{ lb/pg}^2$$

$$Ph_{TOTAL} = 1315.6 \text{ lb/pg}^2 \text{ (dentro de la T.R.)}$$



$$P_{h_{\text{lodo}}} = 561 \text{ m} * 1.20 \text{ gr/cc} * (3.28 \text{ pie/m}) * (0.433 \text{ lb/pg}^2 / 1 \text{ gr/cc})$$

$$P_{h_{\text{lodo}}} = 956.10 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{\text{dif. est. max.}} = 359.5 \text{ lb/pg}^2$$

D) CALCULO DE LA ALTURA DEL CEMENTO EN EL ESPACIO ANULAR

$$H_{\text{CMTO 1}} = 197 \text{ sc} * 38 \text{ lt/sc} / 64.5 \text{ lt/m} = 116 \text{ m}$$

$$H_{\text{CMTO 2}} = 451 \text{ sc} * 82.96 \text{ lt/sc} / 64.5 \text{ lt/m} = 580 \text{ m}$$

E) MAXIMA PRESION DIFERENCIAL ESTATICA EN EL ESPACIO ANULAR (PRESION DE BALANCE).

$$P_{h_{\text{CMTO1}}} = 116 \text{ m} * 1.90 \text{ gr/cc} * 1.42 = 312.9 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{h_{\text{CMTO2}}} = 580 \text{ m} * 1.60 \text{ gr/cc} * 1.42 = 1317.7 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{h_{\text{lodo}}} = 1450 \text{ m} * 1.20 \text{ gr/cc} * 1.42 = 2470.8 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{h_{\text{TOTAL}}} = 4101.46 \text{ lb/pg}^2 \text{ (fuera de la T.R.)}$$

$$P_{h_{\text{lodo}}} = 2146.0 \text{ m} * 1.20 \text{ gr/cc} * 1.42$$

$$P_{h_{\text{lodo}}} = 3656.78 \text{ lb/pg}^2 \text{ (dentro de la T.R.)}$$

$$P_{\text{dif. est. max.}} = 4101.46 - 3656.78 = 444.67 \text{ lb/pg}^2$$

La presión disponible para romper el perno más cercano es  $1000 \text{ lb/pg}^2$  menos el 15%. Por lo tanto la presión mínima para romper el perno es de  $850 \text{ lb/pg}^2$  y

se puede concluir que el perno es el adecuado.

F) Presión manométrica requerida para asegurar el inflado del empacador.

$$\text{Presión para romper el perno} = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Factor de seguridad manométrica} = 500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión manométrica} = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

(presión máxima requerida para inflar el empacador).

Presión de inflado real - presión manométrica = presión de balance.

$$\text{Presión manométrica} = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de balance} = 0 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión de inflado} = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

NOTA: El empacador está colocado por encima del cemento de tal forma que no exista ninguna presión diferencial entre la T.R. y el espacio anular en ese punto. Por lo tanto, la presión de balance no es recomendable para calcular la presión de inflado.

G) El mandril debe ser capaz de resistir la presión al colapso actuando contra esta, después de que se ha colocado el empacador y la T.R. ha sido

cementada. Esta presión consiste en la presión de inflado más la presión hidrostática del lodo de perforación a la profundidad de colocación del empacador.

$$\text{Presión de inflado} = 1500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Phlodo} = 956 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Presión al colapso} = 2456 \text{ lb/pg}^2$$

Presión al colapso de la T.R. 13 3/8"; k-55; 68 lb/pie es de  $1950 \text{ lb/pg}^2$ .

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La colocación de las lechadas espumosas evitan columnas con alta presión hidrostática.

2. El cemento espumoso permite bajar la densidad todavía más que los sistemas comunes (0.48 a 1.32 gr/cc o sea 4 a 11 lb/gal) sin afectar tanto la resistencia a la compresión.

3. La preparación de la lechada espumosa es sencilla, el equipo necesario para realizar operaciones con cemento espumoso es el equipo normalmente utilizado, más el generador de espuma, bomba para medir y bombear espumante y estabilizador, un tipo de gas y medidor de flujo de este gas.

4. Las pérdidas de fluido son bajas.

La densidad se controla instantáneamente regulando el gasto de gas. Las propiedades físicas del cemento fraguado dependen de la densidad.

5. Antes de cada trabajo de cementación de T.R. se debe tomar un registro de calibración del agujero para poder calcular el volumen de cemento espumoso necesario para dicha cementación.

6. La máxima calidad de la espuma posible es del 52%.

La cementación por etapas, permite cementar

tuberías de revestimiento en formaciones con bajo gradiente de fractura, provocando una reducción de la presión hidrostática de la columna de cemento.

7. Si se va a trabajar en altas temperaturas, es mejor utilizar cemento tipo "C" y no los tipos "G" o "H" ya que proporcionan mejores resistencias a la compresión.

8. La cementación en etapas consiste en reducir el intervalo a cementar, con lo que se logra disminuir la presión hidrostática de la columna de cemento.

9. Para realizar una cementación en etapas, se utiliza el dispositivo llamado copie de cementación múltiple el cual forma parte de la tubería de revestimiento y se pueden utilizar uno ó dos coples dependiendo de las condiciones del pozo.

10. El empacador inflable se coloca en la tubería de revestimiento por arriba de la zona débil, la cual permite soportar la columna hidrostática generada por la columna de cemento.

11. Se pueden utilizar uno o dos empacadores inflables en la T.R., esto dependerá de las condiciones del pozo. Puede utilizarse en la cementación de T.R. en una o dos etapas.

12. Utilizar cementos espumosos en formaciones con

bajo gradiente de fractura ó fracturadas, siempre y cuando la temperatura no sobrepase los 110 °C (230 °F).

13. Cementar en etapas cuando se tengan intervalos muy grandes y la formación no sea capaz de soportar la columna de cemento.

14. Utilizar empacadores inflables combinados con la cementación en etapas, cuando se presenten zonas con bajo gradiente de fractura y en donde la cementación por etapas no es suficiente para evitar una pérdida de circulación.

## NOMENCLATURA:

CAP : Capacidad.

CCE : Calidad del cemento espumoso.

CMTO : Cemento.

CN<sub>2</sub> : Concentración de nitrógeno

Den : Densidad.

Den<sub>CE</sub> : Densidad del cemento espumoso.

Den<sub>LB</sub> : Densidad de la lechada base.

DenN<sub>2</sub> : Densidad del nitrógeno.

e.a. : Espacio anular.

h : Altura.

H<sub>CCE</sub> : Profundidad en el centro de la columna de  
cemento espumoso.

H<sub>CMTO</sub> : Altura de cemento.

H<sub>T</sub> : Haltura total.

N<sub>2</sub> : Nitrógeno.

Ph : Presión hidrostática.

Ph<sub>CMTO</sub> : Presión hidrostática del cemento.

Ph<sub>CE</sub> : Presión hidrostática del cemento espumoso.

Ph<sub>E</sub> : Presión hidrostática del espaciador.

Ph<sub>L</sub> : Presión hidrostática del lodo.

Ph<sub>T</sub> : Presión hidrostática total.

P<sub>dif. est. max.</sub> : Presión diferencial estática máxima.

$R_{CE}$  : Rendimiento del cemento espumoso.

sc : Sacos.

$S_{CB}$  : Sacos de cemento base.

$S_{CN}$  : Sacos de cemento normal.

T : Temperatura en el centro de la columna de cemento.

$T_F$  : Temperatura de fondo.

T.R. : Tubería de revestimiento.

VOL : Volumen.

$V_{AT}$  : Volumen anular total.

$V_p$  : Viscosidad plástica.

$Y_p$  : Punto de cedencia.

## BIBLIOGRAFIA

1. APPLICATION OF FOAM CEMENT  
FAUL M. McELFRESH AND VIRGILIO C. GO BONCAN  
SPE 11203, SEPTIEMBRE 1982.
2. FOAMED CEMENT:  
SOLVING OLD PROBLEMS WITH A NEW TECHNIQUE  
D.G. BENGE, L.B. SPANGLE AND C.W. SAUER, Jr.  
SPE 11204, SEPTIEMBRE 1982.
3. FOAMED CEMENT:  
A SECOND GENERATION  
N.R. LOEFFLER  
SPE 12592, MARZO 1984.
4. LOW-DENSITY FOAMED PORTLAND  
CEMENTS FILL VARIETY DE NEEDS  
R. MONTHAN, D.L. SUTTON, B.G. MODY  
OIL & GAS JOURNAL, JULIO 1982.
5. FOAMED CEMENT:  
A CEMENT WITH MANY APPLICATION  
DAVIES, DAVID R., JAN J. HARTOG  
AND CORBETT J.S.  
SPE 9598, MARZO 1981.

6. CEMENTING OF FRAGILE-FORMATION WELLS  
WITH FOAMED  
W.M. HARMS AND J.S. FERUS  
SPE 12755, ABRIL 1984.
7. CEMENTING JOB DESIGN AND EVALUATION MANUAL  
DOWELL SCHLUMBERGER.
8. APUNTES TERMINACION DE POZOS  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
FCO. GARAICOCHEA P. Y MIGUEL ANGEL BENITEZ H
9. CEMENTO ESPUMOSO  
ARMANDO YNOSTROZA L.  
HALLIBURTON DE MEXICO.  
15 DE AGOSTO DE 1975.
10. MANUAL DE OPERACION DE COPLES DE CEMENTACION  
MULTIPLE.  
EPN-GRAY  
JUNIO, 1984.
11. BAKER PACKERS  
1984 - 1985 CATALOG.