

9  
24



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

## CEMENTACION DE UNA TUBERIA DE REVESTIMIENTO CORTA COMO SOLUCION AL PROBLEMA DE RESTRICCIÓN DEL AGUJERO

### T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO PETROLERO

P r e s e n t a :

GAMALIEL GONZALEZ GORDILLO



México, D. F.

1982



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

"CEMENTACION DE UNA TUBERIA DE REVESTIMIENTO CORTA COMO SOLUCION AL  
PROBLEMA DE RESTRICCIÓN DEL AGUJERO"

I N D I C E

	Página No.
1. RESUMEN .....	1
2. INTRODUCCION.....	3
3. GENERALIDADES.....	4
4. APLICACIONES DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO CORTAS.....	22
5. PARTICULARIDADES EN EL DISEÑO Y CEMENTACION DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO CORTAS.....	28
6. DISEÑO Y CEMENTACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIEN- TO CORTA DE 9 5/8 pg. Y SU PROLONGACION A LA SUPER FICIE PARA EL POZO "TRIUNFO 101".....	46
6.1 Antecedentes del pozo.....	46
6.2 Planteamiento del problema que derivó la cemen tación de la Tubería Corta Intermedia.....	49
6.3 Diseño y cementación de la Tubería Corta de 9 5/8 pg....	53
6.4 Prolongación de la Tubería Corta a la superficie.....	87
7. RESULTADOS.....	107
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
9. BIBLIOGRAFIA.....	113

- - - - -

## R E S U M E N

La tesis a desarrollar tiene su origen en un problema que se presentó durante la introducción de la Tubería de Revestimiento Intermedia de 9 5/8 pg. (24.44 cm) de diámetro y que impidió llegar a la profundidad de 4200.00m, profundidad de asentamiento que señalaba el programa para esta tubería, en el pozo de exploración "Triunfo 101", localizado en el Estado de Tabasco y que pertenece al Distrito de Cd. Pemex, correspondiente a la Zona Sur de Petróleos Mexicanos.

Esta Tubería de Revestimiento se había proyectado cementar en una sola columna, esto es, 4200.0m de longitud de tubería, lo cual no fue posible realizar debido a las características de la formación que se encontraba en este pozo, compuesta en su mayoría por estratos de lutitas hidratables y una gran masa salina que comprendía los últimos 600.0m del agujero perforado. Fue a la profundidad de 2942.0m donde el comportamiento dañino de las lutitas obstaculizó completamente la introducción de la tubería, pues a esa profundidad el diámetro del agujero se encontraba reducido.

Ante esta situación se determinó, primeramente, un cambio de programa de la cementación para la mencionada tubería. Una vez hecho un análisis de las condiciones del pozo y de las medidas que se habían tomado para contrarrestar la disminución del diámetro del agujero, se pensó en un factor muy importante; esto es, en el tiempo en que el agujero conservaba un diámetro necesario que permitiera la introducción de la tubería; por lo que se concluyó que la mejor manera de aprovechar este limitado tiempo, era efectuar la cementación de la tubería intermedia en dos etapas, esto es, primero se revestiría el agujero descubierto cementando una tubería Corta, para después, en una segunda etapa, prolongar esta tubería hasta la superficie.

De estas dos etapas en que se dividió el programa de la cementación sobresale,

por su dificultad para ejecutarla, la primera; ya que para poder efectuarla fue necesario diseñar un sistema especial de herramientas auxiliares exigidas por las dimensiones de la tubería Corta. La finalidad de la presente tesis es precisamente exponer los aspectos más importantes concernientes a esta primera - etapa preferentemente, tanto en lo que se refiere a su diseño, realización, así como a sus resultados.

## 2. INTRODUCCION

La cementación de Tuberías de Revestimiento Cortas, conocidas también en el campo como "Liners", se ha convertido en una práctica común dentro del proceso de la perforación de pozos petroleros. Pero son contados los casos de cementación de Tuberías Cortas de diámetros grandes como lo es la de 9 5/8 pg. (24.44 cm) y aún más si ésta es de gran longitud. El problema que se presentó en el pozo "Triunfo 101" obligó a programar la cementación de la tubería intermedia del mencionado diámetro, primero como una tubería Corta, para después prolongarla hasta la superficie.

Las características hidratables de las lutitas y la gran plasticidad de la masa salina existentes en este pozo, provocaban constantemente la reducción del diámetro del agujero en un tiempo tal, que no era suficiente para permitir la introducción total de la sarta de tubería hasta el fondo. Contemplando la conveniencia de aprovechar este reducido tiempo, se determinó introducir parte de la sarta de tubería aplicando la técnica de la cementación de las tuberías Cortas, con lo cual lograríamos un ahorro significativo de tiempo en la introducción, ya que, como en todas las tuberías Cortas, ésta se descendería con tubería de perforación, la cual conectada en "triples" (conjunto de tres tramos) reduciría sustancialmente el tiempo total de introducción de la tubería Corta.

Siendo la tubería Corta de tal diámetro y estimando su considerable longitud, se requería de un confiable sistema de herramientas auxiliares que son útiles en este tipo de operaciones, entre las que destacan en importancia el conjunto de colgadores, responsables éstos de sujetar la tubería Corta dentro de la tubería superficial de 13 3/8 pg (33.97 cm) de diámetro.

Previo al desarrollo del tema es conveniente mencionar varios conceptos relacionados con la cementación de tuberías de Revestimiento en general y en especial de las Tuberías Cortas.

### 3. GENERALIDADES

#### OBJETIVOS DE UNA TUBERIA DE REVESTIMIENTO (TR)

Perforar en busca de petróleo y gas involucra dos objetivos primordiales; hacer la perforación hasta el yacimiento y sostener el agujero desde el mismo - hasta la superficie para llevar los fluidos producidos.

La Tubería de Revestimiento evita flujos desde y hacia las formaciones; se protege con cemento para garantizar una barrera de presión continua fuera del tubo y a través de la sección cementada.

#### FUNCIONES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO EN LA VIDA DEL POZO.

- Aislar estratos superficiales no consolidados y lograr circulación satisfactoria del fluido de perforación.
- Evitan derrumbes del pozo.
- Evitan contaminación de agua dulce en las zonas superiores por fluidos de zonas bajas.
- Evitan contaminación de los fluidos producidos por sustancias extrañas tales como arena, agua, etc.
- Evitan contaminación en la zona con problemas ( $H_2S$ , CO, Sal, etc.).
- Confinan la producción hacia la sección de flujo.
- Proporcionan un medio para controlar la presión interna, externa e intermedia del pozo.

Permite la explotación económica del yacimiento.

ducción del pozo.

- Sirven como vía de flujo para los fluidos producidos.

Junto con la Tubería de Producción, las Tuberías de Revestimiento representan un factor significativo en los costos de perforación y terminación de un pozo, en el orden del 15% al 18% del costo de pozo terminado y representa el gasto de capital simple más grande.

#### CLASIFICACION DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO EN BASE A SU FUNCION.

A medida que se va profundizando la perforación de un pozo, los requerimientos que una Tubería de Revestimiento debe cumplir, van siendo diferentes, esto hace que exista una clasificación entre ellas, a saber:

- a) Tubería de Revestimiento Conductora.
- b) Tubería de Revestimiento Superficial.
- c) Tubería de Revestimiento Intermedia
- d) Tubería de Revestimiento de Explotación.

A cada una de ellas se le atribuyen funciones específicas, como son:

- a) IR Conductora.- Cuya profundidad de descenso depende de la profundidad donde se encuentra la primera capa estable; por consiguiente su función fundamental es la de fijar la parte superficial del pozo para evitar su lavado por el fluido de perforación.
- b) IR Superficial.- Debe proteger y sellar las formaciones de agua, suministrar un ancla para el equipo preventor y dar apoyo en la superficie para las columnas de tuberías de revestimiento más profundas.
- c) IR Intermedia.- Tiene como función recubrir todas las complicaciones de carácter geológico que se presentan en la parte superior y asegurar la perforación del pozo hasta la profundidad proyectada. Esto es, sirve como un medio para controlar presiones anormales, tapar zonas de pérdidas de circulación y en -



ciertos casos, presiones de inyección.

d) IR de Explotación.- Se cementa para evitar la comunicación de fluidos producidos a otras zonas y formaciones, con lo que reducirían la producción del pozo.

Por lo general la Tubería de Revestimiento Corta entra en la clasificación de las tuberías de explotación y algunas veces cumple funciones de una tubería de revestimiento intermedia.

#### DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

Existen dos objetivos fundamentales en el diseño de un revestimiento para un pozo:

El primero es disminuir el número de sartas y la longitud de cada una de ellas. Aquí la toma de decisiones depende de las consideraciones geológicas.

El segundo consiste en disminuir el tamaño, peso y resistencia de cada sarta y optimizar el costo. Este procedimiento considera aspectos geológicos y especificaciones de secciones tubulares.

Existen muchas fuentes de información a donde podemos recurrir para tener conocimiento de aspectos geológicos, tales como: estudio de los recortes que se van obteniendo conforme transcurre la perforación; características del lodo de perforación, en especial de su densidad; pérdidas o flujos de lodo; cambios en la velocidad de perforación; y, una fuente muy importante la tenemos en los Registros Geofísicos de Exploración, los cuales confirmarán con más detalle algunos de los parámetros anteriores. Dentro de las aplicaciones que se le confieren a estos registros están la de revelar la naturaleza de los estratos perforados, los intervalos del yacimiento y las potencias de los horizontes petrolíferos y acuíferos, el grado de saturación petrolífera y las diferentes porosidades de las rocas, así como determinar también el diámetro del agujero, ya que en las zonas de rocas arcillosas el agujero tiene frecuentemente un diámetro mayor que el diámetro de la barrena con la que se perforó, o también, puede ocu -

mir que el agujero pueda tener una sección menor que el diámetro de la barrenadora en las zonas de las rocas duras, porosas y permeables, como resultado de la pérdida de agua del lodo, formando un revoque en las paredes del pozo. El estrechamiento del pozo ocurre a veces como resultado de la expansión de las rocas arcillosas que se "hinchan" cuando la presión en el pozo es menor que la presión en la capa y cuando tiene lugar una pérdida grande de agua de lodos de poca calidad o al perforar con agua. La calibración de los pozos, tiene como objetivo el de revelar el perfil del corte interior del pozo, para determinar la cantidad de lechada de cemento que necesitamos para llenar el espacio anular hasta la altura programada.

Todo lo anterior servirá, en principio, para determinar la profundidad de asentamiento de la Tubería de Revestimiento, esto es, la profundidad donde quedará la zapata. La formación que quedará frente a ésta deberá ser competente, es decir, consistente, con el fin de lograr una buena adherencia entre la formación y el cemento, asegurando con esto una buena cementación en esta zona tan importante.

En lo referente a secciones tubulares, son necesarios tres criterios técnicos primarios para un diseño: Colapso, Reventón y tensión.

Las presiones de colapso se presentan cuando la presión fuera de la tubería es mayor que la presión interna de la misma.

Los reventones ocurren cuando la presión interna de la tubería es mayor que la presión externa, con tendencia a expandir el tubo hasta su punto de explosión.

Las cargas de tensión sobre la tubería crean un esfuerzo axial. Por lo que la junta superior debe resistir el peso de todas las secciones de tubería debajo de ella, eliminando sustancialmente el esfuerzo de tensión en una sección única.

Hay ocasiones en que deberán de considerarse otros tres criterios secundarios durante el diseño: el esfuerzo de curvatura, compresión axial y la torsión.

Resumiendo, tenemos que los criterios para un diseño de TR son, en primer lugar el conocimiento de la profundidad de los mantos perforados y las necesidades del peso del lodo; propiedades físicas de la tubería y conexiones para calcular y obtener la capacidad de presión para deformación interna; prueba hidrostática de presión, presión de colapso y cabezal hidrostático del pozo; factor de flotación, reducción de la capacidad de presión de colapso debida a la carga de tensión y diseño de los factores para reventones, colapso y tensión.

El problema de un diseño es esencialmente la selección de los grados y pesos más económicos, que pueden operar sin fallar debido a las tres fuerzas a las que está sujeta. Dado que las fuerzas no son uniformes, sino que varían con la profundidad, es posible diseñar una sarta combinada; considerando que el costo de la TR es la principal inversión en un pozo, la selección de grados y pesos unitarios más adecuados constituyen un problema económico y de ingeniería.

Existen muchos métodos para diseñar sartas de TR, de los cuales el más conocido y de amplio uso actualmente, es el Método Gráfico de la Youngstown.

#### ACCESORIOS PARA TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

Para lograr una buena cementación y para facilitar su operación, la columna de revestimiento se equipa con ciertos accesorios, como los que a continuación se mencionan:

- Zapatas de Cementación.- Entre las que hay: zapata guía, zapata flotadora, zapata diferencial y zapata empacadora.
- Coples de Cementación.- Se distinguen dos tipos, los empleados en una cementación primaria convencional y los utilizados en las cementaciones por etapas. De los primeros existen tres tipos: cople de retención, cople flotador y cople diferencial.
- Tapones de Cementación.- De éstos tenemos: el tapón inferior o limpiador y el tapón superior o de desplazamiento.
- Centradores.
- Canastas de cemento.
- Raspadores o limpiadores de pared.

Debemos tomar en cuenta además, que cuando se usa cualquier tipo de herramienta flotadora pensemos en el efecto que podríamos provocar en la formación al estar introduciendo la TR, ya que al no existir comunicación entre el interior de la TR y el espacio anular, se presenta el fenómeno de "pistoneo", el cual aynado a una rápida introducción de la TR, podría provocar el rompimiento de la formación y por ende pérdidas de fluidos.

En cuanto a centradores, anteriormente existían fórmulas para calcular el número de centradores que llevaría una columna de TR, pero posteriormente se comprobó que dichas fórmulas no eran funcionales, por lo que ahora se diseñan en base al tipo de formación, al espesor de los estratos donde se requiera una mejor adherencia, a la desviación del pozo, así como a la profundidad a la que se cementará la TR.

En la actualidad se ha eliminado el uso de raspadores por considerar que no eran muy efectivos y en lugar de ellos se ha venido utilizando productos químicos, los cuales se circulan como un "colchón" lavador, antes de circular la lechada de cemento. Estos fluidos lavadores tienen propiedades químicas que disuelven el enjarre que dejó el lodo de perforación en las paredes del agujero y por consiguiente lograr un barrido eficiente, permitiendo así el libre contacto del cemento con la formación y así lograr una buena adherencia.

#### CEMENTACION DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

El objetivo básico de la cementación de una TR es la colocación de una lechada de cemento en el espacio anular, entre la tubería y el agujero, de tal manera que se logre un sello efectivo e impermeable entre la formación y la tubería.

Con la cementación de un pozo se consigue lo siguiente:

- Adherir y fijar la Tubería de Revestimiento.
- Limitar el movimiento de fluidos entre las formaciones ayudando a evitar, por ejemplo, la contaminación de las zonas de agua dulce por hidrocarburos o agua salada.
- Debido a su rápido fraguado, el cemento ayuda a evitar los reventones que pue

- Proteger la tubería de revestimiento contra la corrosión de aguas minerales de la superficie y electrólisis del exterior.
- Proteger la tubería de revestimiento contra el choque de cargas cuando se perfora a mayor profundidad.
- Sellar la pérdida de circulación en zonas ladronas.

Esta cementación que cumple con los anteriores objetivos se le denomina cementación primaria.

Otro tipo de cementaciones que generalmente se usa para reparaciones, o bien cuando falla la cementación primaria, se le conoce como cementación secundaria. La operación de cementación secundaria más común es la cementación forzada. Proceso donde se aplica una presión hidráulica para forzar o comprimir la lechada de cemento dentro del vacío de la formación o contra una zona porosa.

El constituyente principal de la mayoría de los materiales de cementación, es el cemento Portland. Es el cemento ordinario que ha sido usado para la industria de la construcción. Sin embargo, para su aplicación a la cementación de las tuberías de revestimiento en los pozos petroleros, debido a la necesidad de bombeabilidad o más altas temperaturas y presiones, fue necesario variar las especificaciones y propiedades.

Se han producido aditivos que cambian las especificaciones del cemento Portland para adaptarlo al uso de cementaciones en pozos petroleros.

Para que un cemento utilizado en pozos petroleros, desempeñe satisfactoriamente la tarea que se le asigne, debe llenar ciertos requisitos.

- a) La lechada de cemento debe ser capaz de colocarse en la posición deseada, por medio de equipo de bombeo desde la superficie.
- b) Después de colocado, debe adquirir suficiente fuerza en un tiempo razonablemente corto, para que el tiempo de "espera de fraguado" pueda reducirse al mínimo.

- c) El cemento debe hacer un sello positivo entre la tubería de revestimiento y la formación.
- d) Debe de tener fuerza suficiente para evitar fallas mecánicas.
- e) Debe ser químicamente inerte a cualquier formación o fluido con el que se puede poner en contacto.
- f) Debe ser suficientemente estable para no deteriorarse, descomponerse o de alguna otra forma perder sus cualidades.
- g) Debe ser suficientemente impermeable para que los fluidos no se filtren a través de él cuando ha fraguado.

#### PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO

Las propiedades de la lechada de cemento se determinan en función de las características de las formaciones y del tiempo de cementación requerido según la técnica de diseño seleccionada.

Propiedades y características que se deben controlar en la lechada de cemento.

Densidad.- La cual deberá permitir la cementación sin exceder el gradiente de fractura de la formación. Se recomienda que la densidad de la lechada de cemento sea mayor que la densidad de lodo de perforación ( con una diferencia mínima de 0.25 gr/cc), esto es con el fin de mejorar el desplazamiento del lodo del espacio anular.

Pérdida de agua.- La pérdida de agua se controla a fin de evitar la deshidratación de la lechada, sobre todo cuando se presume la presencia de formaciones muy permeables o de baja presión. Lechadas de cemento con pérdidas apreciables de agua originan: incremento en la densidad, reducción de la bombeabilidad, reducción en el área efectiva del espacio anular y por lo tanto un incremento en las pérdidas de presión por fricción.

Tiempo de espesamiento.- Este tiempo deberá permitir el desplazamiento de la lechada de cemento, hasta el lugar predeterminado, teniendo en cuenta que el espesamiento se acelera con: el incremento de la temperatura, presiones mayores de 350 Kg/cm<sup>2</sup>, la presencia de componentes inorgánicos y la pérdida de agua.

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

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

Aditivos.- Los aditivos tienen la finalidad de modificar las propiedades de las lechadas de cemento. Sin embargo, su uso requiere un control riguroso, porque al modificar alguna propiedad en particular puede alterar otras, tales como la resistencia a la compresión, viscosidad, pérdida de agua, etc.

Los aditivos más utilizados en el diseño de lechadas de cemento y sus funciones básicas son:

Aditivos livianos.- Son aditivos que permiten preparar lechadas de cemento de baja densidad.

Aditivos de peso.- Se usan con el fin de aumentar la densidad de la lechada de cemento, en especial de los pozos profundos, en los que se desea que el peso del cemento sea cercano al del lodo de perforación al momento de cementar, para así controlar las zonas de alta presión del pozo.

Retardadores de fraguado.- Son aditivos muy necesarios para obtener el tiempo adecuado de espesamiento, sin embargo, deben evitarse los tiempos excesivos y los abusos de estos retardadores. Se requieren principalmente para pozos con elevadas temperaturas de fondo.

Aceleradores de fraguado.- Su uso se requiere en operaciones donde es neces-

rio acelerar la resistencia de las lechadas de cemento, como son: casos donde se requiere ahorrar tiempos de espera de un equipo con el fin de economizar su costo; en climas fríos actúa de anticongelante en la preparación de la lechada; colocación de puentes de cemento para desviar con menos tiempo de espera de fraguado, etc.

Aditivos para baja pérdida de agua.- Son aditivos usados para evitar la rápida deshidratación de la lechada de cemento, principalmente en zonas de permeabilidad elevada. Al agregar este aditivo se forma una costra que limita la pérdida de agua de la lechada de cemento bajo presión.

Aditivos para pérdida de circulación.- Son materiales que se usan para reducir la pérdida de circulación o restaurar la circulación durante la cementación de un pozo. Estos productos son de estructura granular, en polvo o fibrosa y la mayoría de ellos son inertes en los compuestos de cementación.

Aditivos reductores de fricción.- Tienen tres objetivos principales al mezclarlos con cemento. (1) Se puede aumentar el gasto de bombeo para obtener flujo turbulento. (2) A menor presión requerida contribuyen a controlar las pérdidas de fluido de la lechada; y (3) pueden emplearse para densificar la lechada, disminuyendo la proporción agua/cemento.

Aditivos antiespumantes.- Se utilizan para absorber las burbujas de aire en suspensión originadas durante el mezclado de la lechada y así poder obtener una densidad más correcta y exacta de la misma.

Aditivos dispersantes.- Aditivo que actúa en la mezcla de cemento con agua, separando las partículas de cemento y suspendiéndolas uniformemente en el agua de mezcla. Esta separación de las partículas dan como resultado una mínima resistencia de flujo y una gran movilidad de las partículas, además de un efecto de lubricación, que a su vez provee un considerable descenso de la viscosidad de la lechada, permitiendo así originar flujo turbulento a reducidos gastos de bombeo.

Aplicaciones de los fluidos lavador y espaciador dentro del proceso de la ce -



mentación.

Fluido lavador.- Son usualmente fluidos de base petróleo o agua que contienen surfactantes, diluyentes y materiales limpiadores de productos indeseables y en algunos casos, aditivos para pérdida de fluido. Son de gran ayuda para remover efectivamente el lodo de perforación del espacio anular y permitir reemplazarlo por cemento. La contaminación de lodo en lechadas de cemento es perjudicial.

Fluido espaciador.- Por lo regular son fluidos viscosos que forman una barrera entre la lechada de cemento y el lodo de perforación mientras se cementa un pozo. Este fluido es usado principalmente para crear un efecto pistón en el desplazamiento del lodo por delante del cemento.

Los fluidos lavadores y espaciadores, están hechos para compatibilizar tanto con el cemento como con el lodo de perforación.

#### DISEÑO DE LA LECHADA DE CEMENTO

Para diseñar debidamente una lechada de cementación, es particularmente importante analizar toda la información pertinente a la geología de la formación, características y datos obtenidos durante la perforación, como presión de ruptura o gradiente de fractura. En un pozo exploratorio, debe conservarse un registro de la descripción litológica de cada formación que se atraviesa al ir perforando. Esta información aún cuando no sea muy minuciosa, tendrá un gran valor en la perforación de pozos subsecuentes en la misma área.

Muchos factores deben analizarse para determinar si la formación es una arenisca consolidada limpia, una formación degradable, una caliza fracturada, o una calcarenita dolomita.

Los gradientes de fractura varían aún y cuando muchas formaciones sean improductivas; deben tomarse en consideración en el diseño y composición de la lechada de cemento. Este perfil deberá ser complementado con todos los datos de presión disponible de otros pozos en el área, como gradientes de fractura, pérdidas de circulación donde se conocía con exactitud la densidad del lodo de perforación.

presiones de inyección en estimulaciones, cementaciones forzadas, etc.

Con esta información y los parámetros de flujo de la lechada se puede calcular la máxima densidad de ésta que una formación puede soportar. El gradiente de fractura más bajo será el factor determinante, sin embargo, debe recordarse que la presión ejercida sobre la formación es la suma de la presión hidrostática - más la presión perdida por fricción.

Un método de diseño de lechadas para pozos con una gran variación en gradientes de fractura es graficar un perfil de gradientes en relación a la profundidad. Los perfiles deben indicar un gradiente de circulación del lodo e incluir presiones de pérdida por fricción. Estos perfiles de gradientes no solo ayudan en el diseño de lechadas, sino que determinan también donde deben colocarse los co pl es para cementaciones múltiples. Desde luego que es preferible efectuar una cementación en una sola etapa con una lechada de menor densidad, sin embargo, esto no siempre es posible.

Se tendrá en cuenta que no todos los pozos, aún en el mismo campo presentan la misma geología. Pozos perforados en estructuras con graves echados pueden no tener la misma columna estratigráfica o los mismos espesores y por lo tanto de berá cambiar totalmente su programa de cementación.

Otro problema algo diferente se presenta con yacimientos profundos con muy altas temperaturas y presiones. Muchas areniscas con permeabilidades menores de 1.0 md. pueden estar interdigitadas con lutitas plásticas que pueden o no ser afectadas por agua dulce. Pruebas de laboratorio y experiencias de campo indi can que éstas lutitas pueden fracturarse a presiones inferiores, a la que re quiere la matriz de la arenisca y ocasionar pérdidas de circulación.

Al terminar de preparar el perfil de gradientes, el diseño del programa de cementación se convierte en un problema básico de hidráulica. Conociendo la máxima presión que soportará cada formación, se pueden calcular la densidad y las pérdidas por fricción del fluido de perforación, así como de la lechada de cemento para evitar el fracturamiento de alguna formación.

La composición de la lechada debe ser diseñada especialmente para cada pozo. Las

pruebas y diseños de laboratorio para lechadas de cemento pueden ser de poco valor si no se complementan con un programa de procedimiento para introducir y cementar las tuberías de revestimiento.

Al diseñar la composición de una lechada deben considerarse los siguientes factores:

1o. Régimen de flujo.- Pruebas de laboratorio indican que se obtiene una mayor eficiencia de desplazamiento del lodo utilizando una lechada en flujo turbulento; sin embargo, existen condiciones que no tolerarían la turbulencia. En estos casos tal vez se recomendaría una lechada densa y viscosa y el desplazamiento sería en un flujo de tipo laminar.

2o. Tiempo de espesamiento.- Exceso de retardador en las lechadas pueden ser causa de cementaciones primarias defectuosas. Las lechadas de cemento deberán de diseñarse con un tiempo de espesamiento apropiado pero nunca excesivo. Si la cementación de una tubería puede efectuarse en menos de 2 horas, generalmente el tiempo máximo de espesamiento recomendado no debe ser más de 3.5 horas. Cuando se requieren de 4 ó 5 horas para mezclar y desplazar, un factor de seguridad de 60 a 90 minutos debe ser suficiente en la mayoría de los casos.

3o. Temperaturas de fondo.- Un factor importante en el diseño de lechadas para alta temperatura es conocer con exactitud la temperatura de fondo del pozo. Los registros de temperaturas no siempre son muy confiables, ya que un pequeño error en la temperatura de circulación de fondo, puede alterar notoriamente el tiempo de espesamiento de la lechada.

4o. Control de pérdida de fluido. - La permeabilidad de la formación, es un factor muy importante para determinar el punto necesario de control de pérdida de fluido, para evitar una deshidratación prematura del cemento durante la colocación de la lechada, disminuyendo así su movilidad y causando tal vez obstrucciones en el espacio anular. La obtención de datos exactos sobre la permeabilidad de una formación es difícil si no se cuenta con los correspondientes análisis de núcleos. Permeabilidades extremadamente bajas como las que se encuentran generalmente en calizas y dolomitas requieren menos control de la pérdida de fl

trado, sin embargo, existen algunas formaciones de este tipo altamente fracturadas que requieren un control especial. Areniscas con alta permeabilidad también requieren lechadas con baja pérdida de fluidos. Aún cuando la mayoría de los aditivos para controlar la pérdida de fluido en las lechadas generalmente se usan en cementaciones forzadas, experiencias de campo comprueban que son también una parte esencial en las composiciones de la lechada en cementaciones primarias.

#### TECNICAS DE DESPLAZAMIENTO PARA LA LECHADA DE CEMENTO

Las limitaciones principales que se tienen al efectuar una cementación primaria son: capacidad del equipo superficial y presión de fractura de la formación. La presión de fractura de la formación no debe excederse, ya que de hacerlo, se inducirían fracturas que facilitarían la pérdida de fluidos. El diseño queda concluido cuando la técnica probada es factible de llevarse a cabo con el equipo disponible y sin dañar la formación.

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

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

Las técnicas comunmente empleadas en los trabajos de cementación primaria son: cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, cementación primaria bajo un régimen de flujo laminar y cementación primaria por etapas.

Técnica de cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento.- Cuando se utiliza un régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo en el espacio anular, lográndose por consiguiente, una mayor adherencia entre el cemento y la pared del agujero. Sin embargo, debido a altas presiones requeridas para obtener flujo turbulento, la aplicación de esta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de presión de fractura es mayor que

el gradiente de presión de cementación, así como a la posibilidad de equipo - con capacidad suficiente para llevar a cabo la operación.

El hecho de establecer flujo turbulento durante la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular, no garantiza una buena eficiencia de desplazamiento; a pesar de que se tomen las medidas necesarias en cuanto a movimiento de la TR y colocación de raspadores y centradores.

Para establecer el diseño de una cementación primaria bajo un régimen de flujo turbulento, es necesario determinar la máxima presión de fondo bajo las condiciones de operación más favorables y compararla con la presión de fractura de las formaciones existentes, con el propósito de definir si es posible aplicar esta técnica. Posteriormente se cuantifican, la potencia requerida en el equipo superficial de bombeo, el volumen de lechada y el tiempo de desplazamiento. Finalmente se calcula el tiempo de contacto que se define como, "el intervalo de tiempo en que un punto de la pared del pozo permanece en contacto con la lechada de cemento, la cual está siendo desplazada bajo un régimen de flujo turbulento".

Técnica de cementación primaria bajo un régimen de flujo laminar. En esta técnica se efectúa el desplazamiento de la lechada de cemento al espacio anular - en régimen de flujo laminar. Se utiliza cuando se requiere cementar tuberías a través de intervalos grandes, formaciones incompetentes o depresionadas; así como en la cementación de tuberías cortas a gran profundidad; o bien, cuando - las características de las formaciones y equipo disponible no permiten emplear la técnica de flujo turbulento.

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

Esta técnica se utiliza para cementar tuberías de gran longitud a través de formaciones cuyo gradiente de presión de fractura varía en forma irregular o cuan-

do no es posible efectuar la cementación en una sola etapa. También se recomienda su uso para aislar formaciones cuya distancia entre sí no permite efectuar la cementación en una sola etapa.

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

#### TRABAJOS DE PREPARACION PARA EL DESCENSO DE LAS COLUMNAS DE REVESTIMIENTO Y SU DESCENSO.

El éxito del descenso de la columna de revestimiento se determina por la preparación de los tubos de revestimiento, accesorios, la preparación de la torre de perforación, las herramientas auxiliares y por la correcta organización y ejecución del proceso de descenso de la columna.

Preparación de los tubos de revestimiento.- Al realizar la revisión de los tubos es necesario prestar atención a la curvatura, deformación del diámetro, el cuerpo del tubo y el estado de las roscas. Para su calibración se introduce, a través de cada tubo, un calibrador que tiene un diámetro ligeramente menor que el diámetro interior de la TR.

En cada tubo revisado con el calibrador es necesario anotar:

- a) Número de orden del tubo
- b) Grado de acero
- c) Espesor de pared y longitud del tubo
- d) Número de fábrica
- e) Fecha de fabricación

Antes de descender las columnas de revestimiento, es necesario realizar la prueba de cada tubo con una presión media mayor que la esperada al final de la cementación.

Las uniones de roscas de los tubos deben limpiarse cuidadosamente y lavarse; después de limpiarse se les pone su anillo protector.

Para el caso de tubos defectuosos, es necesario tener tubos de reserva para - cada sección de la columna (50 m de tubo por cada 1000m de columna). Pevio al inicio del descenso de la columna es necesario verificar la presencia y el buen estado del equipo auxiliar de descenso, así como los accesorios.

Es necesario revisar y si hay necesidad, reparar todos los mecanismos del equi po de perforación. Estado del cable, estado de la torre, malacate, sistema de frenos, motores y bombas de lodo. Se controla la verticalidad de la torre.

Acondicionamiento del pozo y el lodo de perforación.- Consiste en dejar el pozo libre de recortes y eliminar cualquier resistencia que pudiera obstruir el paso de la IR. En cuanto al lodo de perforación, éste debe circularse el tiem po necesario hasta dejarlo en condiciones óptimas para efectuar la introducción de la IR.

Introducción de la IR.- Una vez que se le han instalado los arietes correspon dientes al preventor, conforme al diámetro exterior de la tubería, se procede a su introducción. Para comprender la importancia de esta operación, debe te nerse presente que las presiones instantáneas desarrolladas en el fondo del po zo al bajar la tubería, pueden originar pérdidas de circulación de fluidos y - que la tubería se pegue debido a la sedimentación de las partículas sólidas.

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

Programa de circulación.- Durante la introducción de la IR, es necesario cir cular periódicamente con la finalidad de homogeneizar la columna de lodo de - perforación dentro del pozo. Se recomienda circular cada vez que se introduz

lación, la zapata de la tubería quede frente a zonas densas. Con esto, se reduce la posibilidad de inducir pérdidas de lodo frente a zonas permeables, ya que si se tienen zonas permeables a profundidades mayores, el lodo que se encuentra en estado gelatinoso amortiguará la presión comunicada a los fluidos al iniciar la circulación. Por otra parte, la existencia de zonas permeables arriba de la zapata no presentará dificultad alguna, en vista de que a esas profundidades la columna de lodo ya ha sido homogeneizada y fluye fácilmente.

Una vez alcanzada la profundidad a la que se llevará a cabo la cementación se procede a efectuar la última etapa de circulación, imprimiéndole simultáneamente a la tubería un movimiento vertical alternado, con el propósito de que actúen los raspadores. Esta etapa se prolongará el tiempo necesario para dejar al lodo limpio de residuos desprendidos de la pared del agujero por acción de los raspadores.

Después de homogeneizada la columna de fluido de perforación, se procederá a efectuar la cementación de la forma acostumbrada.



#### 4. APLICACIONES DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO CORTAS.

Durante la perforación de un pozo se cementan tuberías de revestimiento cuyos diámetros varían de más a menos de acuerdo a su profundidad. Así tenemos que se cementan tuberías conductoras, superficiales, intermedias y de explotación, las cuales cumplen con diferentes funciones. Cuando se programan las tuberías intermedias y de explotación, deberá considerarse la posibilidad de cementar - las como Tuberías Cortas, ya que ésta alternativa permite obtener, además de - ventajas técnicas, económicas, que nos reducirán el costo total del pozo.

Una Tubería Corta es una sección de tubería de revestimiento, que se colocará generalmente en agujero abierto abajo de la zapata de la última IR que se tenga cementada y no es continua hasta la superficie, en ocasiones también se usará en agujeros entubados para reparar daños en tuberías de mayor diámetro.

Las Tuberías Cortas se cementarán básicamente como tuberías intermedias y de - explotación. A continuación se enlistan, las razones básicas que se conside - ran para tomar la decisión de usar Tuberías Cortas.

- a) Insuficiencia de un equipo de perforación en cuanto a capacidad de carga.
- b) Aislar zonas de presión anormal.
- c) Controlar lutilas plásticas y deleznales.
- d) Por economía.
- e) Facilitar la reparación de tuberías intermedias usando Extensiones o Comple -  
mentos.
- f) Evitar el daño de las tuberías intermedias por los viajes de la tubería de  
perforación con barrena.
- g) Disminuir el peso y el grado en la Tubería de Complemento.
- h) Disminuir la carga sobre el terreno en que está instalado el equipo de per -  
foración.
- i) Proteger el agujero descubierto restante en caso de que la IR se pegue an -  
tes de llegar a la profundidad programada.

Para una mejor comprensión de estas aplicaciones, a continuación se amplían - cada una de ellas.

a) Insuficiencia de un equipo de perforación en cuanto a capacidad de carga.

Dado que en los últimos años la búsqueda de hidrocarburos nos ha llevado a explorar a grandes profundidades y que en mucho de estos casos se han utilizado equipos de perforación con limitada capacidad de carga, se ha planteado la necesidad de disminuir los grandes esfuerzos de tensión a que son sometidos; una de las etapas de la perforación en donde se manifiestan con mucha intensidad estos esfuerzos, es durante la introducción de tuberías - de revestimiento a profundidades considerables, en donde el equipo se ve - bastante forzado por el peso de la IR: es precisamente a partir de este tipo de situaciones que surge la idea de cementar la IR en dos etapas, esto es, primeramente como una tubería Corta, para después completar el programa cementando un complemento de la tubería Corta, de esta manera conseguimos - que el equipo no soporte el peso total de toda la columna de IR. Aún cuando en la mayoría de los casos que se perfora un pozo profundo y que se utiliza un equipo de perforación adecuado para esa profundidad, deberá tenerse presente la posibilidad de hacer uso de una tubería Corta, pues ésta ayudará a no fatigar demasiado al equipo, con el consiguiente aumento de vida útil del mismo.

b) Aislar zonas de presión anormal.- Durante la perforación de un pozo se presentan condiciones muy difíciles que impiden materialmente su perforación, siendo una de las más frecuentes la existencia de zonas de presión anormal: éstas zonas son detectadas ya sea por flujos de fluidos o por pérdidas del lodo de perforación principalmente y no siempre se logran controlar con tan sólo modificar las características del lodo, ni modificando la técnica al - perforar. Puede ser que se logren perforar dichas zonas, pero en la mayoría de los casos los problemas de flujos o pérdidas en esta zona continúan, por lo que resulta imposible proseguir con la perforación. Es aquí donde nuevamente aplicamos la técnica de la cementación de tuberías Cortas para aislar esta zona y así poder seguir profundizando la perforación del pozo.

c) Controlar lutitas plásticas y deleznales.- Uno de los problemas bastante -

frecuentes y difíciles que se presentan al perforar un pozo, es la inconsistencia y la plasticidad de los estratos lutíticos que se atraviesan con la barrena; tales características de las lutitas traen como consecuencia numerosos perjuicios como son: alteración de las características del lodo por la adición de sólidos en suspensión; atascamiento de la barrena con la consiguiente disminución de su eficiencia; resistencia al paso de la barrena por estrechamiento del diámetro del agujero; atrapamiento de la tubería de perforación por asentamiento de recortes provenientes de esta zona, en caso de suspender la circulación por alguna falla en el bombeo teniendo la tubería de perforación en el fondo; y en ocasiones, pérdidas de circulación por el lavado de esta zona. Todos estos problemas pueden solucionarse utilizando un lodo de perforación adecuado, pero una de las formas más seguras y eficientes de controlar éstas formaciones lutíticas, es cementando una tubería Corta para aislarlas completamente.

- d) Per economía.- Esta situación se presenta principalmente en los pozos de exploración, pues en tales casos no existe la seguridad de que el pozo sea productor; anticipándose a esta posibilidad se trata de economizar tubería y para lograr esto, se cimenta parte de la columna de la IR de explotación como tubería Corta y una vez efectuadas las pruebas correspondientes al contenido comercial de hidrocarburos en los posibles estratos productores, se determina si se prolonga o no la tubería Corta a la superficie.

También por economía porque puede no prolongarse, aún cuando el pozo sea productor (pozo de desarrollo), siempre y cuando se sepa de antemano las características del pozo, también desde luego, que la tubería Corta de explotación cumpla con las especificaciones adecuadas, esto es, que ofrezca seguridad, además de que permita la instalación de las herramientas de terminación y producción.

Considerando que el costo de la IR es alto, ya que buena parte de la inversión total en la perforación de un pozo se destina para tales tuberías, es razonable la cementación de tuberías cortas.

e) Facilitar la reparación de tuberías intermedias usando extensiones o complementos.

La necesidad de reparar daños especialmente en tuberías intermedias como roturas, desprendimientos, desgastes horadaciones, fugas, etc. en pozos del área de Villahermosa, han hecho de las Tuberías Cortas una solución bastante efectiva para estos casos. Una de las tuberías de revestimiento que mayormente están expuestas a una constante abrasión es la tubería intermedia; es pues la abrasión la principal causa de los daños que sufre una tubería y que obligan a efectuar una reparación en dicha tubería. En Villahermosa este tipo de operaciones se llevan a cabo en pozos que ya tienen cementada una Tubería Corta de producción de 5 pg. (12.7cm) de diámetro, colgada en la IR de 7 5/8 pg. (19.36 cm.) de diámetro. Si el daño que hay que reparar se encuentra cercano a la Tubería Corta ya cementada, la solución será cementar una "Extensión", esto es, otra Tubería Corta de 5 pg. sobre la ya existente; la longitud de ésta "Extensión" dependerá de la distancia que habrá entre la primera Tubería Corta y el sitio donde se haya localizado el daño. Si por el contrario, el daño se encuentra a una distancia considerable de la primera Tubería Corta, o bien, cercano a la superficie, convendrá mejor cementar un Complemento de la Tubería Corta, esto es, se llegará hasta la superficie.

f) Evitar el daño de las tuberías intermedias por los viajes de la tubería de perforación con barrena.- Esta aplicación de las Tuberías Cortas, surge de la experiencia que se han tenido de pozos que han sufrido daños en la tubería de revestimiento intermedia, sobre todo a causa de las innumerables ocasiones en que pasa la sarta de perforación a través de dicha tubería, con el fin de cambiar la barrena de perforación principalmente. Debido a que la barrena tiene un diámetro cercano al diámetro interior de la IR, al igual que los lastrabarrenas y los estabilizadores, constantemente están en contacto dichas herramientas con la IR, lo que provoca un desgaste continuo de la misma al grado de que en ocasiones llegan a horadarla, lo que trae como consecuencia graves problemas.

Pero si anticipadamente a que ocurra el daño se cementa una Tubería Corta, la cual, además de cubrir el agujero descubierto que se ha perforado hasta

ese momento, nos permitirá continuar la perforación usando diámetros menores tanto de la herramienta como de la barrena, con lo que el daño a la tubería intermedia disminuirá considerablemente. Por otro lado, una vez cementada la Tubería Corta, nos facilitará la reparación de un futuro daño en la tubería intermedia cementando ya sea una extensión o bien un complemento de la Tubería Corta.

g) Disminuir el peso y el grado en la Tubería de Complemento.- Otra de las aplicaciones de las Tuberías Cortas, es la posibilidad que nos concede de usar tubería de revestimiento de menor peso unitario y de un grado de no muy alta calidad, para complementar la Tubería Corta hasta la superficie. Lo que significa que si tenemos un programa inicial de cementar una columna de IR del fondo a la superficie y queremos economizar tubería en lo posible, podemos optar por cementar primero una Tubería Corta, logrando así aislar el agujero descubierto, con lo que tendríamos un pozo completamente controlado ya que estará entubado en su totalidad. Esta condición facilita la siguiente operación de cementación del complemento, pues se estará trabajando con márgenes de seguridad muy amplios. De aquí se deriva que una de las medidas que se lleven a cabo antes de complementar la Tubería Corta, sea la de disminuir la densidad del lodo de perforación hasta donde sea posible. Esta medida así adoptada nos permite utilizar en el complemento tubería de menor resistencia al colapso sobre todo, o lo que es lo mismo, de menor peso unitario y por supuesto de menor grado, con lo que estaremos economizando en cuanto a costo de IR, pues como es sabido, el peso y el grado de una IR aumenta en proporción directa al costo de la misma.

h) Disminuir la carga sobre el terreno en que está instalado el equipo de perforación.- En ocasiones un equipo de perforación ya instalado en su localización ("pera"), sufre desnivelación debido a varias causas, siendo una de ellas las enormes cargas de tensión que tiene que soportar un equipo durante operaciones muy específicas, como puede ser durante una operación de pesca, o bien, durante la introducción de largas y pesadas columnas de IR. Una de las formas de disminuir el peso de toda una columna de IR es cementándola en dos etapas, aplicando para esto la técnica de cementación de las Tuberías Cortas para la primera etapa. Posteriormente se prolongaría a la su-

- i) Proteger el agujero descubierto restante en caso de que la IR se pegue antes de llegar a la profundidad programada.- Esta situación se presenta en el momento mismo de estar introduciendo una columna de IR, la cual llega a "pegarse" a una profundidad que dista mucho de la programada y en donde finalmente se cementa. Para cumplir con el programa referente a esta IR, se cementa una Tubería Corta con el fin de proteger el agujero descubierto restante. Desde luego se pretenderá que el diámetro exterior de esta Tubería Corta sea lo más cercano posible al diámetro interior de la IR en la que habrá de colgarse, con objeto de no alejarse demasiado del programa original de diámetros del pozo. Lo anterior se logra utilizando tubería de revestimiento sin coples.

## 5. PARTICULARIDADES EN EL DISEÑO Y CEMENTACION DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO CORTAS.

### Diseño de una Tubería Corta.

Dentro de los factores y variables que tendrán que considerarse para diseñar y seleccionar una sarta de Tubería Corta y que además coinciden con los de otros diseños de tuberías de revestimiento, encontramos los siguientes:

- a) Diámetro y condiciones del agujero en el cual se introducirá la Tubería Corta.
- b) Claros máximos y mínimos deseados u obtenibles. El claro entre la parte exterior de la tubería y las paredes del agujero es usualmente un compromiso, entre cual es el deseado y cual es el económicamente realizable.
- c) Esfuerzos a los cuales la Tubería Corta va a ser expuesta.
  - c.1) La presión interna durante la introducción, cementación y subsecuente perforación, estimulación y operaciones de producción.
  - c.2) Presiones de Colapso durante la introducción, cementación y subsecuente perforación, estimulación y operaciones de producción. El esfuerzo de colapso se diseñará considerando la alta presión que puede quedar atrapada atrás de la tubería.
  - c.3) Los esfuerzos de tensión y/o compresión durante la introducción, cementación y subsecuente perforación, estimulación y operaciones de producción.
- d) La naturaleza de los fluidos corrosivos a los cuales la Tubería Corta va a ser expuesta, tanto interna como externamente durante la vida de ésta.
- e) Selección de las juntas de la Tubería Corta.

- e.1) Para algún diámetro y peso, la tubería con cople es menos dilatante que la tubería con junta integral.
- e.2) La tubería con cople proporciona algún efecto centrante en el agujero.
- e.3) La tubería con juntas integrales aumenta el claro entre el diámetro exterior de la tubería y las paredes del agujero.
- e.4) Para cierta tubería de algún diámetro y peso, algunas conexiones de junta integral son diseñadas y provistas a más presión efectiva de sello que la conexión con cople.

De los factores privativos más decisivos en el diseño de una Tubería Corta tenemos los siguientes:

- 1) La IR en la cual el colgador de la tubería corta es colocado, debe ser capaz de alojar la carga impuesta por la Tubería Corta.
- 2) La selección del colgador, con mecanismo de anclaje ya sea mecánico o hidráulico, tipo rotativo o no rotativo.
- 3) Medida del agujero que será perforado abajo de la Tubería Corta.
- 4) Dimensiones de la herramienta y equipo que va a ser usado a través de la Tubería corta.
- 5) Longitud de traslape.
- 6) Herramientas y accesorios que se utilizan en la introducción y cementación de una Tubería Corta.
- 7) Las "patas de perro" y otras posibles obstrucciones que presenta el agujero.

Cada uno de estos últimos siete incisos son ampliados a continuación.

- 1) La IR en la cual el colgador de la Tubería Corta es colocado debe ser capaz de alojar la carga impuesta por la Tubería Corta.- Existen dos factores importantes que rigen la capacidad de carga de la IR de anclaje y son: el estado de la cementación de dicha IR y el grado de desgaste que haya sufrido de su interior. En caso de que la cementación de la IR de anclaje fuera defectuosa, existirá la posibilidad de que se presente un desprendimiento de dicha IR, debido al peso de la Tubería Corta que estará soportan



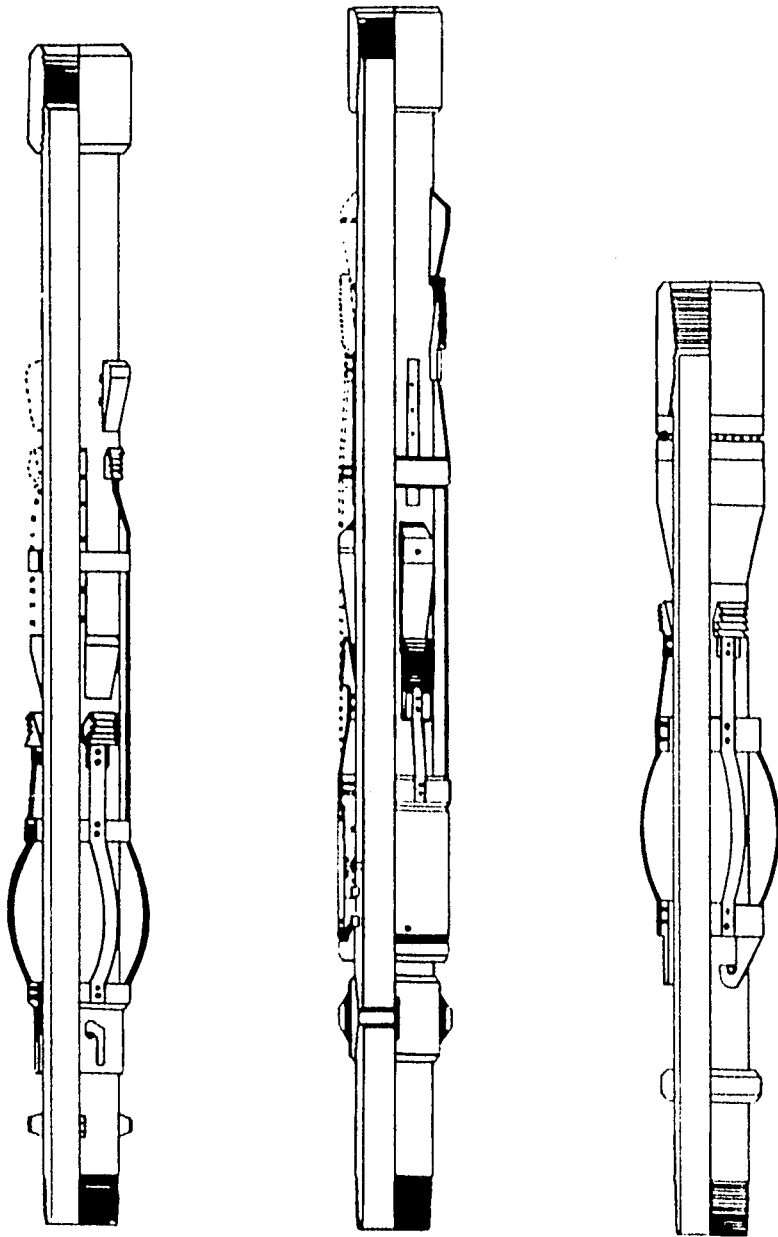
do, ya que no tendrá el apoyo necesario de una eficiente cementación en su parte externa. Así también, si la IR ha sufrido un notable desgaste de su diámetro interior, causado por la abrasión que ha provocado el con tínuo paso de la sarta de perforación, podrá ser un factor determinante en un insuficiente afianzamiento de las cuñas del colgador.

- 2) La selección del colgador.- Antes de tratar lo relacionado con la selec ción del colgador, es necesario mencionar una breve descripción de ellos, así como su mecanismo de anclaje.

Los colgadores de Tuberías Cortas constan básicamente de un juego de cuñas y de unos conos sobre los que se deslizan las cuñas, hasta afianzarse contra las paredes de la IR de la cual se colgará la Tubería Corta. Ver figura 5.1

Los colgadores por su mecanismo de anclaje podrán ser me cánicos e hid rául i cos:

- a) Colgador Mecánico.- Este colgador se opera con la tubería de perforación, girándola a la izquierda (si el candado es de tipo "J"), ó levantándola - (si es de tope) para liberar las cuñas y que se deslicen sobre los conos al aplicar peso. Este tipo de colgadores es uno de los más usados cuando se trata de cementar Tuberías Cortas de diámetros pequeños y de poca longitud.
- b) Colgador Hidráulico.- El anclaje de este colgador se efectúa aplicando pre sión en la tubería de perforación, con lo que una camisa que lleva las cuñas se desliza sobre los conos, posteriormente se carga peso para que la Tubería Corta quede completamente colgada. Este colgador es útil cuando no se tiene fondo a donde apoyarse o bien, como un auxiliar cuando el peso de la Tubería Corta es excesivo para un solo colgador.
- c) Colgador Mecánico Rotatorio. - Este colgador permite que la Tubería Corta una vez que se ha anclado se le pueda dar rotación durante la cementación, con lo cual podrán obtenerse mejores adherencias. Básicamente el colgador



(a)

COLGADOR MECANICO  
CON SEIS CUÑAS

(b)

COLGADOR HIDRAULICO  
CON SEIS CUÑAS

(c)

COLGADOR ROTATORIO  
CON TRES CUÑAS

FIG 5.1 COLGADORES PARA TUBERIAS CORTAS

tendrá una unión giratoria situada inmediatamente arriba del cono de afianzamiento de las cuñas y consta de un cojinete con bolas de rodamiento que permiten la rotación de la Tubería Corta estando anclada.

De lo anterior se deduce que uno de los factores más importantes que se toman en cuenta para la selección de uno u otro tipo de colgador, es el peso de la Tubería Corta, ya que si éste es alto se optará por un hidráulico: - éste presenta además facilidad en su anclaje. Por otra parte, si la tubería Corta no es de un peso excesivo podemos escoger entre mecánico simplemente, o que además sea rotativo con lo que conseguiremos una mejor cementación.

Hay ocasiones en que se trata de operar con los mayores márgenes de seguridad, por lo que se decide usar dos colgadores, ya sea de un sólo tipo o bien combinados. Por otro lado, deberá tenerse presente que la demanda de alguno de estos tipos de colgadores provoca que estos se agoten, por lo que el diseño de la Tubería Corta debe hacerse con el colgador que se tenga en existencia.

- 3) Medida del agujero que será perforado abajo de la Tubería Corta.- Resulta también primordial en el diseño de una Tubería Corta este aspecto, dado - que éste nos definirá el diámetro interior de dicha Tubería; diámetro que deberá permitir sobre todo, el paso de la barrena previamente programada - que habrá de continuar con la perforación.
- 4) Dimensiones de la herramienta y equipo a usar a través de la Tubería Corta. Este aspecto resalta la importancia que tiene para el diseño de una Tubería Corta, el diámetro interior de la misma, ya que de esto depende la correcta introducción y operación de diversas herramientas que habrán de utilizarse en subsecuentes operaciones en el pozo. Así, para el caso de una Tubería Corta de explotación, su diámetro interior deberá permitir la instalación de empacadores, tapones mecánicos o retenedores de cemento, o bien herramientas usadas en los Registros Geofísicos de Exploración, entre otras diversas herramientas. Ahora bien, si se trata de una Tubería Corta Intermedia, el diámetro interior de ésta, deberá permitir, además de la introducción y operación de las herramientas antes mencionadas, la introducción de

la siguiente TR, o sea la de explotación y, si ésta es cementada como tubería Corta, será capaz también de alojar en su interior al colgador.

- 5) Longitud de traslape.- Esta longitud se refiere a la longitud de tubería Corta que quedará dentro de la TR en la cual va a ser colgada. De las razones primordiales que determinan la longitud de traslape están: conseguir un suficiente aislamiento de presiones provenientes de la formación, ya que entre más largo sea el traslape será mayor la cantidad de cemento que habrá en él y por lo tanto el aislamiento también será mejor; otra de las razones es lograr una firme unión con cemento entre tuberías, pretendiendo con esto que el peso de la tubería Corta sea soportado por esta unión, consiguiendo así aligerar en parte la carga sobre el colgador. Depende también la longitud del traslape, del intervalo mejor cementado de la TR que servirá de sostén para la tubería Corta. También podríamos considerar, al determinar la longitud del traslape, el hecho de que la TR en la que se colgará la tubería Corta, pudiera estar dañada en su parte inferior, para lo cual trataríamos de cubrir tal daño con la misma tubería Corta, con sólo aumentar la longitud del traslape según fuera necesario.

Las longitudes de traslape más usadas en la actualidad oscilan entre los 50 m y los 150 m.

- 6) Herramientas y accesorios que se utilizan en la introducción y cementación de una tubería Corta.- Haciendo a un lado a los colgadores, anteriormente mencionados, las herramientas auxiliares y accesorios comúnmente usados en la introducción y cementación de las tuberías Cortas, son:

Zapatas.- Pueden utilizarse la flotadora o la de llenado automático. La primera proporciona seguridad en la operación de cementación y la segunda permite reducir los tiempos de introducción y el "efecto de émbolo" por lo que su uso se recomienda en pozos donde las presiones de fractura son críticas.

Las zapatas flotadoras son las que se usan más frecuentemente y pueden ser de varios tipos: de tipo "V" que tiene 4 orificios laterales y uno central

para poder circular donde se tenga mucho asentamiento de formación en el fondo. Ver Fig. 5.2 (a). La zapata flotadora tipo "K" se diferencia por tener una sola válvula de contrapresión y generalmente se usa en pozos poco profundos donde se esperan bajas presiones diferenciales. Otro tipo de zapatas para tuberías Cortas es la tipo "I" que se emplea en tuberías que no sientan en el fondo; su diferencia con la tipo "V" es que no lleva orificios laterales.

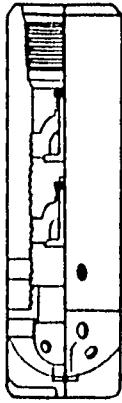
Coples de Retención.- Estos coples generalmente se instalan uno o dos tubos arriba de la zapata y tiene como función, servir de asiento al tapón de desplazamiento del cemento, mismo que lleva en su parte inferior un candado, el cual al terminar el desplazamiento del cemento, queda conectado y asegurado en el cople de retención formando así una válvula de contrapresión, lo cual evita que el cemento regrese hacia el interior de la tubería. Ver fig. 5.2 (b).

Unión Giratoria.- Esta herramienta es introducida abajo del colgador de la Tubería Corta facilitando la rotación en la colocación del colgador. Como su nombre lo indica, sirve para permitir el giro de la Tubería Corta sin que la herramienta soltadora se mueva por efecto de ese giro, con lo que se evitará que se suelte la Tubería Corta previamente. Si la tubería Corta es atascada o dificulta su rotación, la unión giratoria tiene un embrague que permite poner en libertad la herramienta soltadora. Ver fig. 5.2 (c)

Esta herramienta deberá eliminarse si se usa colgador mecánico rotatorio, o un colgador hidráulico.

Receptáculo Pulido (PBR).- Es una herramienta que cumple con tres funciones diferentes; su longitud así como su acabado interior, deberá tener las características necesarias para cumplir con dichas funciones.

El receptáculo que va unido a la parte superior de la camisa soltadora y sirve para recibir el vástago de la TR complementaria, tendrá una longitud de 1.80 m a 3.0 m y su interior será pulido. Otro tipo de receptáculo es el que se utiliza arriba de los colgadores hidráulicos y sirven para que -



(a)  
ZAPATA FLOTADORA  
TIPO "V"



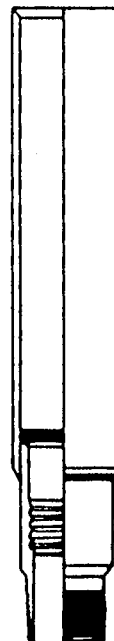
(b)  
COPLE DE RETENCION



(c)  
UNION GIRATORIA



(d)  
RECEPTACULO PULIDO



(e)  
CAMISA SOLTADORA  
CON EXTENSION

FIG. 5.3. ACCESORIOS Y HERRAMIENTAS PARA TUBERIAS CORRIENTES

los sellos de la herramienta soltadora queden alojados en su interior, sin el riesgo de obturar los orificios de la camisa deslizante del colgador hidráulico; su longitud estará en función de la longitud del soltador.

Existe un tercer tipo de receptáculo el cual se utilizará en tuberías Cortas de explotación, su interior será pulido y recubierto con teflón; será colocado abajo de la camisa soltadora. Su función será la de alojar a los sellos que llevará en su extremo inferior el aparejo de producción, además de permitir el movimiento de dicho aparejo. Ver fig. 5.2 (d)

Camisa Soltadora (C-1) y Extensión de la camisa (C-2).- La camisa soltadora, también llamada Manga de Fijación ó C-1, va colocada arriba del receptáculo Pulido en la mayoría de los casos y sirve para unir la Tubería Corta a la herramienta soltadora por medio de una rosca izquierda "ACME" que se afloja fácilmente por rotación derecha una vez situada y colgada la Tubería Corta, recuperando así la herramienta soltadora. La rosca "ACME" tiene de 4 a 6 hilos por pulgada (2.54cm) y requiere de 8 a 15 vueltas a la derecha para desconectar la herramienta soltadora de la rosca. La camisa soltadora deberá soportar el peso de la Tubería Corta.

La extensión de la camisa soltadora C-2, es un cople que está colocado sobre la camisa soltadora, la cual permite ensamblarse en la parte superior de la Tubería Corta, a) a un punto más distante arriba de la boca de la Tubería Corta (Extensión de la Tubería Corta) y b) a la superficie (complemento de la Tubería Corta). El diámetro interior de la C-2 para el ensamble está pulido interiormente; la longitud más utilizada oscila entre 0.90 m a 1.05 m. La parte superior de la extensión de la camisa C-2 deberá ser cónica o biselada para que permita la fácil entrada de otras herramientas. Ver fig. 5.2(e)

Herramienta Soltadora.- Esta herramienta se emplea para soltar y cementar Tuberías Cortas, por lo que también se le conoce como herramienta cementadora. La componen tres elementos primordialmente. Una unión giratoria, un piñón con rosca cuadrada tipo "ACME" y un juego de copas de hule o bien de sellos Multi "V". En su extremo inferior lleva conectado mediante un perno de corte, un tapón de hule y bronce que servirá para desplazar la lechada de ce

mento del interior de la Tubería Corta.

La cementación se efectúa después de operar el colgador y desenroscar la herramienta soltadora de la camisa C-1.

Al hacer la cementación, el juego de copas forma un sello muy efectivo entre la herramienta y la Tubería Corta impidiendo el paso del cemento hacia el interior de la TR.

Debe usarse con el sistema de tapones (limpiador y superior), para lo cual se le ensambla en su conexión inferior el tapón limpiador. Este tapón se desprende al unírsele el tapón superior, el cual incrementa la presión, rompiendo los prisioneros de corte.

Después de efectuada la cementación se recupera la herramienta soltadora con sólo subir la tubería de perforación, pues ya soltó a la Tubería Corta cuando se giró a la derecha. Esta herramienta puede utilizarse en muchas cementaciones con sólo cambiarse las copas de hule cuando se hayan deteriorado.

En resumen, las funciones que la herramienta soltadora debe cumplir son: a) conexión de la tubería de perforación en la operación de la sarta y la Tubería Corta, b) formar una presión con la conexión apretada por un empacador de copas adaptado al extremo inferior de la tubería; c) soportar el peso de la Tubería Corta, y d) conseguir o proveer un tapón limpiador para la Tubería Corta. Ver fig. 5.3 (a)

Tapón de desplazamiento de la Tubería Corta (Tapón limpiador).- Este tapón es usado en cementaciones, en combinación con el tapón superior. Se introduce al pozo, fijado a la conexión inferior de la herramienta soltadora, por medio de unos pernos de corte y permite el paso del cemento hasta que le alcanza el tapón superior, ensamblándose y formando un tapón sólido que es empujado por presión limpiando de cemento las paredes de la Tubería Corta.

La construcción de este tapón es a base de hule y bronce. Ver fig. 5.3 (c)



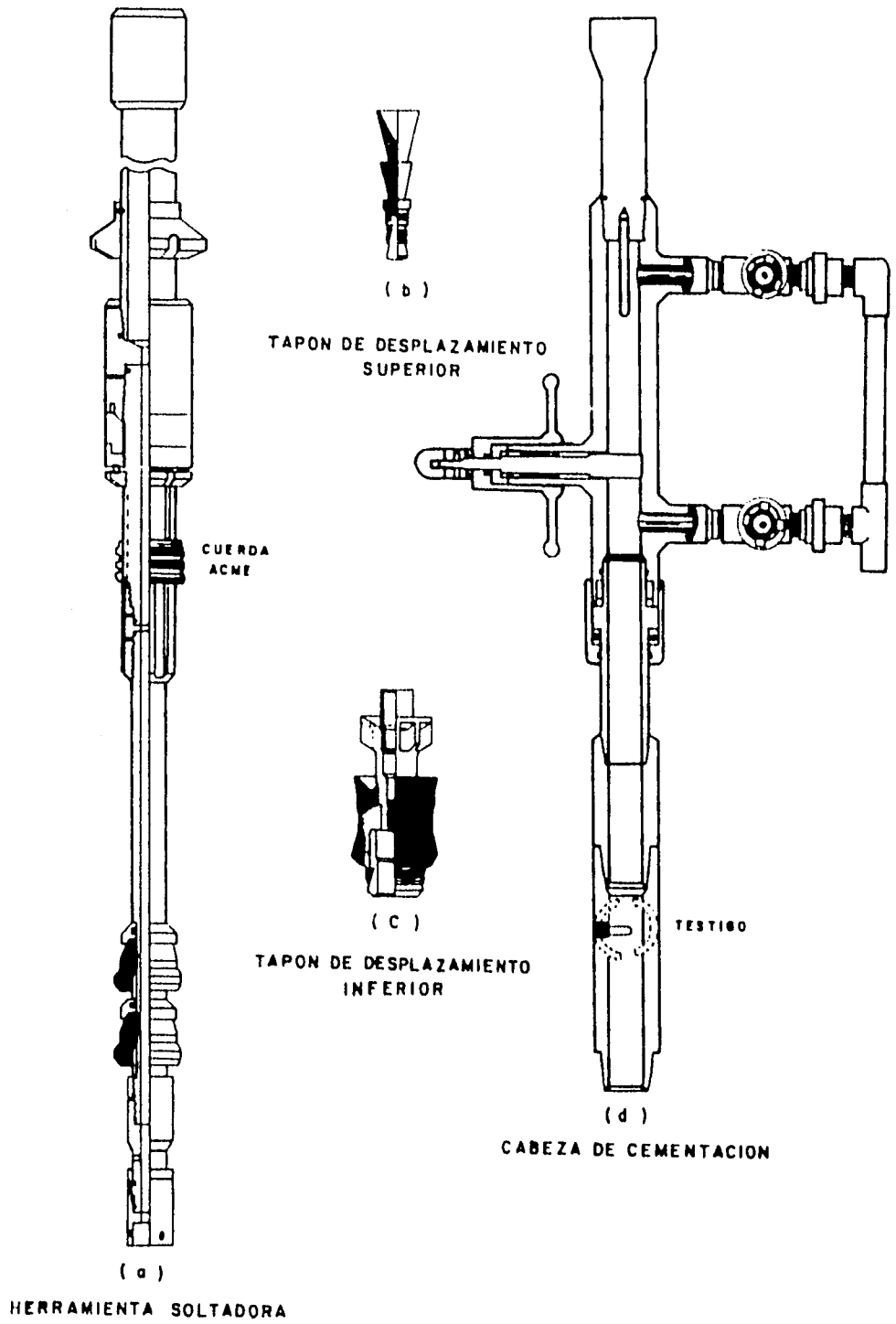


FIG. 5.3 HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS PARA TUBERIAS CORTAS

Tapón de desplazamiento de la tubería de Perforación (Tapón superior). El tapón superior se introduce al pozo inmediatamente después del cemento, separando a éste del lodo con el que se desplaza, a la vez que va limpiando - las paredes interiores de la tubería de perforación y cuando llega donde es tá el tapón limpiador, se acopla en éste por medio de un candado de bronce con dientes tipo cuña, formando un tapón sólido que empuja al cemento por - el interior de la tubería Corta sin permitir que se mezclen el cemento y el lodo con el que se está bombeando. Tiene una serie de 3 ó 4 diámetros exte riores de hule diseñados para limpiar la superficie interior de la tubería de perforación. Ver fig. 5.3 (n)

En lo que se refiere al programa de centradores y raspadores, se sigue el - mismo criterio que en las demás tuberías de revestimiento, aunque el número de centradores es mayor para tuberías Cortas, debido a que éstas se cementan en toda su longitud e incluso se procura centrar también el traslape entre - tuberías.

Cabeza de cementación para tuberías Cortas.- Este equipo está diseñado para proveer los medios de bombeo dentro de la tubería de perforación usada en la operación. El tapón limpiador de la tubería de perforación es también rete- nido aquí mientras se bombea el cemento. Mientras esto sucede el fluido es dirigido abajo del tapón y una vez bombeado el total de cemento, el fluido - desplazante es dirigido arriba del tapón. En su parte inferior se encuentra un "testigo", el cual nos indicará que el tapón ya salió de la cabeza de ce- mentación. Ver fig. 5.3 (d)

- 7) Las "patas de perro" y otras posibles obstrucciones que presenta el agujero.- Las "patas de perro" es una forma que adquiere el pozo cuando éste ha sufrido una desviación, la cual posteriormente es corregida para volver el pozo a la vertical, produciendo una trayectoria angular del pozo. Estas "patas de pe- rro" y otras posibles obstrucciones pueden dictaminar cambios en el diseño - de una tubería Corta. La presencia de obstrucciones muy severas pueden es- torbar y regular la velocidad de introducción de la tubería. Las obstruccio- nes y "patas de perro" también pueden dictaminar si o no puede moverse la tu- bería Corta durante la operación de cementación.

Muy importante es también el proyecto de la colocación de la Tubería Corta en un punto, pues éste será cuidadosamente considerado; prefiriendo que el punto de colocación sea en agujero calibrado y en una formación competente e impermeable. Si el agujero perforado no tiene medida adecuada o la formación acepta fluidos, estos puntos podrán ser considerados en el diseño, el material y el procedimiento a usar.

#### Cementación de una Tubería Corta.

Cada pozo tendrá características especiales las cuales indicarán o determinarán las propiedades y funciones de la lechada de cemento. Un cuidado y control de esas características es esencial en el diseño de la lechada y de la cementación. El objetivo es pues, diseñar una mezcla de cemento económica para que ésta pueda ser colocada bajo condiciones excelentes en el pozo, en el cual después desarrollará y retendrá las propiedades necesarias para aislar zonas, soportar y proteger la tubería.

Así pues, en la cementación de tuberías Cortas se seguirán los mismos criterios usados para las demás tuberías en cuanto a diseño de la lechada de cemento. Desde luego, se habrá de considerar que, dado que generalmente las Tuberías Cortas son cementadas en un pozo cuando éste ya se encuentra en sus etapas finales de su perforación, en donde por lo regular los diámetros tanto del agujero como de las tuberías son pequeños, se tiene la limitación del pequeño espacio anular entre tubería y agujero, lo cual afecta primordialmente al desplazamiento de la lechada de cemento, sobre todo porque se incrementan las pérdidas de presión por fricción; es por esto que tanto la densidad como la viscosidad, son parámetros de gran interés en el diseño de una lechada de cemento, pues ambas son determinantes en la eficiencia de barrido, la presión de bomba y la movilidad de la lechada de cemento.

Se debe de tener en cuenta además, que las propiedades físicas y químicas de los fluidos en el pozo, en el momento de que la Tubería Corta es cementada, podrán ser aprovechables. Las muestras de agua usadas para el mezclado de la lechada de cemento, serían aprovechables como prueba piloto en el diseño de la lechada de cemento. Por otro lado, estos fluidos pueden tener efectos

contrarios en la colocación de la lechada de cemento.

Estos y otros factores como son tiempo de espesamiento, resistencia del cemento, control del filtrado de la lechada, temperatura, deberán ser considerados también en el diseño de lechadas de cemento para Tuberías Cortas.

Métodos de cementación para una Tubería Corta.- Existen dos métodos que pueden ser utilizados para obtener una buena cementación de una Tubería Corta. Estos métodos se conocen como el de "La primera etapa" y el de "La cementación forzada planeada"; tienen como objetivo primordial el de obtener un sello efectivo en el traslape, región que es importante que quede bien cementada debido a que regularmente ahí se presentan flujos provenientes de la formación.

El método de la cementación de "la primera etapa", requiere utilizar el 30% de exceso en el volumen del cemento sobre el calculado para llenar el espacio anular. Si el volumen anular es calculado usando el diámetro nominal de la barrena, un exceso del 40% en volumen de cemento podrá ser utilizado. Este volumen es suficiente para asegurar una completa circulación de la Tubería Corta y la colocación de un exceso de cemento arriba de su extremo superior. Después de que el cemento es colocado, la tubería de perforación es levantada unos cuantos metros arriba de la Tubería Corta y el exceso de cemento es desalojado por circulación inversa de la cima de la tubería.

El método de "la cementación forzada planeada" necesita de un volumen aproximadamente igual al 70% del calculado para llenar el espacio anular. Se requiere una calibración del agujero para calcular el volumen del cemento. Después de que el cemento es colocado en el espacio anular por circulación, se baja un cementador y se empaca arriba del extremo superior de la Tubería Corta y el cemento es forzado alrededor del traslape. El volumen de cemento usado en la operación forzada puede ser calculado sumando, el volumen anular de la cima del cemento (localizada por un registro de temperatura) al extremo superior de la Tubería Corta, más un 30% de exceso y el volumen necesario para llenar el espacio de la Tubería Corta al cementador.

Algunas desventajas inherentes al método de "la primera etapa" son:

- a) Posibilidad de pegadura de la tubería de perforación si el cemento fragua antes de que la operación haya terminado.
- b) Imposibilidad de afinar el cálculo del exceso del cemento por utilizar. Si el cálculo del cemento es subestimado, la circulación completa no es acertada. Si el volumen del cemento es sobrestimado, el exceso posteriormente debe ser perforado para sacarlo.

Algunas desventajas del método de "cementación forzada planeada" son:

- a) La técnica requiere un viaje extra más, el cual aumenta el costo del equipo.
- b) Si logra quedar un vacío entre la cima del cemento circulado y el fondo del cemento forzado, una porción de la tubería Corta puede ser expuesta a una - alta presión y variación de temperatura.

De los métodos anteriores, el de "la primera etapa" es el que se usa actualmente en la totalidad de las cementaciones de Tuberías Cortas.

Los siguientes son algunos factores que contribuyen a obstaculizar un satisfactorio trabajo de cementación de una Tubería Corta:

- a) El espacio anular tan pequeño, en la mayoría de los casos entre el agujero y la Tubería Corta, favorecen a una contaminación del cemento. Este factor, aunado a zonas de pérdida de circulación, hacen de la colocación rápida del cemento una operación peligrosa. Un desplazamiento lento de la lechada de cemento produce un flujo laminar en el anular, incrementando - así la posibilidad de afectar el desplazamiento satisfactorio del fluido de perforación.
- b) En agujeros desviados y espacios cercanos entre la Tubería Corta y las paredes del agujero, puede ser difícil la centralización de la tubería, si - no es que imposible.

- c) Falta de movimientos de la tubería durante la operación de cementación.
- d) Penetración de gas en el cemento evita una buena colocación del mismo.

Estos y otros factores pueden ser eliminados con una buena planeación y ejecución de la introducción y cementación de una tubería Corta. La siguiente sección presenta un bosquejo que puede ser usado como una referencia en la planeación y ejecución de un trabajo exitoso de cementación de una tubería Corta.

Así, para la introducción de la Tubería Corta, podemos optar por el siguiente procedimiento:

- 1o. Circular con lodo y acondicionar el agujero con barrena hasta el fondo.
- 2o. Sacar la tubería de perforación; y una vez en la superficie introducir un calibrador dentro de la misma y comprobar un claro adecuado para más tarde permitir el paso del tapón al ser bombeado.
- 3o. Antes de introducir en el agujero cada componente del ensamble de la Tubería Corta, deberá verificarse haciéndole pasar un calibrador y asegurar que el diámetro interior permita la introducción del equipo subsecuente.
- 4o. El apriete de la rosca del equipo de flotación y el primer tramo de la Tubería Corta se hará en conjunto.
- 5o. Bombear a través del primer tramo de tubería para checar el equipo de flotación.
- 6o. Apretar e introducir los tramos restantes de la Tubería Corta en el agujero. Introducir la Tubería a una velocidad de 2 minutos por tramo en agujero entubado y 2 ó 3 minutos por tramo en agujero descubierto.
- 7o. Si no se usa equipo de flotación con llenado automático, llenar la Tubería Corta con la bomba cada 200 metros aproximadamente.

- 8o. Posteriormente fijar la parte superior de la Tubería Corta y conectar las distintas herramientas auxiliares como son, unión giratoria, colgador mecánico, receptáculo pulido, camisa y herramienta soldadora.
- 9o. Introducir la Tubería Corta con la tubería de perforación a velocidades ya mencionadas. Circular en el fondo con la cabeza de cementación instalada.
- 10o. Circular con lodo hasta que todos los recortes sean removidos del agujero.
- 11o. Circular en el fondo con un ritmo controlado tratando de que la velocidad en el espacio anular entre la Tubería Corta y el agujero descubierto, sea igual a la velocidad de desplazamiento usada durante las operaciones de perforación.
- 12o. Parar el bombeo y anclar la Tubería Corta a 1 metro aproximadamente del fondo y soltarla. Dejar un peso de 5 toneladas sobre la Tubería Corta después de haberla soltado.

En lo que respecta a la operación de cementación de la Tubería Corta, se sugiere el siguiente procedimiento:

- 1o. Tener la certeza de que el agua para el mezclado sea la misma que se usó para las pruebas de laboratorio para diseñar la lechada y realizar una lechada adecuada, así como también se procurará tener suficiente volumen de agua para toda la operación.
- 2o. Colocar una unidad de cementación más en el caso de una emergencia debido a demoras.
- 3o. Bombear un volumen suficiente de fluido de lavado adelante del cemento. El agua puede ser usada como fluido lavador si el lodo es de base agua. Si es de base aceite se usará diesel.

40. Mezclar y bombear correctamente la lechada de cemento. El ritmo de bombeo programado para la cementación de la tubería Corta deberá guiarse en lo siguiente:
- a) Establecer circulación y bombear el fluido de prelavado con un ritmo equivalente al ritmo de circulación de lodo durante las operaciones de perforación.
  - b) Un bombeo adecuado de la mezcla de la lechada de cemento a un ritmo de bombeo suficiente, mantiene una mínima presión positiva.
  - c) A medida que la presión efectiva que ejerce el cemento en el espacio anular llega, un control del ritmo de bombeo previene el desarrollo de una presión en el espacio anular, lo cual podría exceder la presión de fractura de la formación previamente calculada.
50. Las velocidades de cementación en el espacio anular controlará la eficiencia del bombeo de la lechada y la fricción anular. El ritmo de bombeo deberá ser suficiente para producir un flujo turbulento en el espacio anular, si el resultado de la presión anular no excede de la presión de ruptura de la formación. En la cementación de una Tubería Corta profunda, las presiones de fondo son críticas y no deben exceder de la presión de fractura de la formación.
60. Se recomienda disminuir la velocidad cuando el tapón superior está próximo al final de la tubería de perforación y cuando va a llegar al cople de retención. Debemos observar también el aumento de presión cuando el tapón superior toca al tapón inferior para romper los pernos. Si la presión no aumenta, podemos determinar el rompimiento de los pernos por medio de volumen.
70. Cuando se haya terminado el desplazamiento del cemento, se levanta la tubería de perforación y la herramienta soltadora, checando nuevamente el peso de la tubería de perforación en el indicador de peso. Sacar el número de tramos suficientes lo más rápido posible. El volumen de cemento calculado que podría quedar arriba del extremo superior de la Tubería Corta, podrá decidir cuantos tramos son sacados. En ocasiones es conveniente -



dejar cierta presión sobre el cemento para ayudar a prevenir la migración de fluidos, sobre todo de gas. Si no se deja presión sobre el cemento se podrá sacar toda la tubería de perforación junto con la herramienta soltadora.

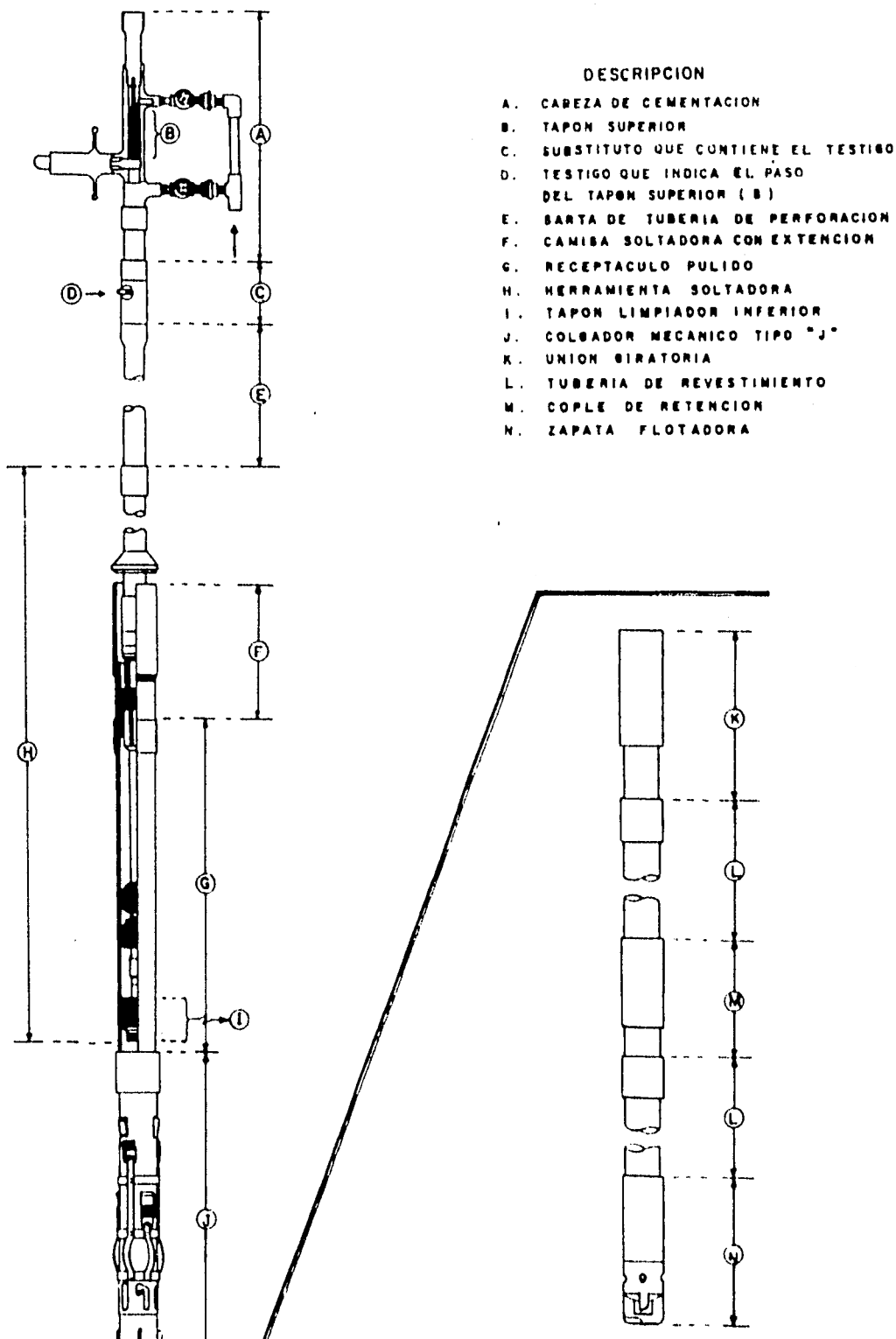
- 8o. Es conveniente llenar el agujero mientras se saca la tubería de perforación y la herramienta soltadora. Un abatimiento en el nivel del fluido en el agujero puede ser el resultado de un decremento de la presión anular, Permitiendo así que queden gas o fluidos de la formación y penetren en el cemento inestable, lo cual arruinaría la cementación.

A continuación se expone un PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO PARA LA CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA CORTA ampliamente utilizado en la actualidad, así como la figura 5.4 muestra un esquema de uno de los aparejos más usados para cementar una Tubería Corta.

- I. Primeramente se conecta la zapata flotadora (letra "N" de la fig. 5.4) a la parte inferior de la tubería Corta;
- II. dos tramos arriba de la zapata se conecta el cople de retención (M);
- III. Se continúan conectándose los siguientes tramos de tubería hasta completar la longitud programada de la Tubería Corta.
- IV. En el último tramo se conecta la unión giratoria (K) y arriba de ésta se conecta el colgador mecánico (J)
- V. en la parte superior de éste se enrosca el receptáculo pulido (G) y - después se conecta, arriba de éste, la camisa soltadora junto con su extensión (F).
- VI. Se introduce la herramienta soltadora (H) provista del tapón limpiador inferior (I) y se conecta a la camisa soltadora por medio del dispositivo de rosca izquierda.

Es preciso aclarar que debido a que en la localización donde se encuentra el pozo se carece del equipo necesario para la correcta conexión de cada una de las herramientas auxiliares en la cementación de Tuberías Cortas, como es la unión giratoria, el colgador, el receptá

FIG. 5.4 APAREJO PARA CEMENTAR UNA TUBERIA CORTA



DESCRIPCION

- A. CAREZA DE CEMENTACION
- B. TAPON SUPERIOR
- C. SUBSTITUTO QUE CONTIENE EL TESTIGO
- D. TESTIGO QUE INDICA EL PASO DEL TAPON SUPERIOR (B)
- E. BARTA DE TUBERIA DE PERFORACION
- F. CAMISA SOLTADORA CON EXTENSION
- G. RECEPTACULO PULIDO
- H. HERRAMIENTA SOLTADORA
- I. TAPON LIMPIADOR INFERIOR
- J. COLGADOR MECANICO TIPO "J"
- K. UNION GIRATORIA
- L. TUBERIA DE REVESTIMIENTO
- M. COPLE DE RETENCION
- N. ZAPATA FLOTADORA

culo pulido, la camisa soltadora y la herramienta soltadora, éstas son ensambladas previamente en talleres especiales y llegan al pozo ya como un sólo conjunto.

VII Una vez conectadas todas estas herramientas auxiliares a la Tubería Corta, se procede a unir la herramienta soltadora a la tubería de perforación (E), la cual servirá para terminar de introducir la Tubería Corta hasta la profundidad programada.

VIII Estando la Tubería Corta en el fondo se levanta aproximadamente de 0.50 m a 1.0 m arriba del fondo, se le da media vuelta a la izquierda para desenganchar el candado tipo "J" que tiene el colgador mecánico y posteriormente se baja nuevamente la tubería de perforación unos centímetros para que las cuñas del colgador se afiancen perfectamente dentro de la TR de anclaje.

IX En seguida se hace girar la sarta de perforación con 12 a 15 vueltas a la derecha, para obligar a que la rosca que tiene la camisa soltadora suelte a la tuerca flotante de la herramienta soltadora, quedando así suspendida la Tubería Corta por el colgador y pudiendo ser izada la herramienta soltadora sin ningún obstáculo hasta unos 60 cm., para comprobar realmente que ha quedado desconectada, notando además en el indicador de peso una disminución del peso inicial de la Tubería Corta junto con la tubería de perforación.

X Una vez comprobado lo anterior, se baja nuevamente la sarta de perforación apoyándola sobre el colgador con un peso aproximado de 5 toneladas del peso de la tubería de perforación. Se conecta la cabeza de cementación (A) junto con el substituto que contiene el testigo (C) e inmediatamente se inicia la operación de la cementación de la manera siguiente:

- 1o. Se prueban a presión las conexiones superficiales.
- 2o. Se bombea el fluido lavador.
- 3o. Se bombea la cantidad de lechada de cemento.
- 4o. Se saca el pasador de la cabeza de cementación (A) y se suelta el tacón

da. Mientras esto sucede, concentraremos nuestra atención en los manómetros, pues cuando el tapón superior se acopla al tapón inferior se notará un incremento de presión y si ésta aumenta hasta  $50 \text{ Kg/cm}^2$  sobre la presión de circulación, se romperán los prisioneros de corte que unen al tapón inferior con la herramienta soltadora, bajando ambos tapones a través de la tubería Corta, forzando a subir el cemento en el espacio anular a través de la zapata flotadora, la cual tiene un juego de válvulas de contrapresión que impiden la regresión del cemento.

Al llegar los dos tapones al cople de retención se afianzan en él mediante un candado de anillo que tiene el tapón inferior y forman una válvula adicional de contrapresión. Cuando esto sucede, en la superficie se nota un gran incremento en la presión de circulación, lo cual indica que ha terminado la operación de cementación.

Finalmente se levanta la tubería de perforación junto con la herramienta soltadora hasta una altura previamente establecida y se procede a circular en forma inversa para desalojar el exceso de cemento. En caso de no ser necesario dejar presión sobre el cemento, se continúa sacando la sarta de perforación junto con la herramienta soltadora hasta la superficie.

Después de un tiempo en que se considera que fraguó completamente el cemento, se baja una barrena de un diámetro adecuado y se verifica la cima de cemento, así mismo se perfora éste hasta tocar el extremo superior de la tubería Corta. Posteriormente con una barrena de menor diámetro se limpiará de cemento el interior de la parte superior de la tubería Corta, así como se verificará la profundidad interior de la misma, esto es, la profundidad del cople de retención.

Para comprobar si la cementación ha sido satisfactoria se efectuarán pruebas con presión, tanto en el extremo superior de la tubería Corta, como en la profundidad interior de la misma.

6. DISEÑO Y CEMENTACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO CORTA DE  
9 5/8 pg. Y SU PROLONGACION A LA SUPERFICIE PARA EL POZO  
" TRIUNFO 101 "

6.1 ANTECEDENTES DEL POZO.

La exploración en esta estructura se inició con el pozo "Triunfo 1" hacia el año de 1953, el cual llegó a la profundidad de 2,462.86 m y fue perforado - con el objeto de probar las posibilidades productoras de petróleo y/o gas en el Terciario, especialmente el Mioceno y en el posible Oligoceno de la parte Oriental de la Cuenca Sedimentaria de Macuspana, en la parte Oriental del Estado de Tabasco. Su localización en el Sistema Punta Gorda tiene las siguientes coordenadas:  $X = 106,928.09$  m y  $Y = - 46,150.00$  m.

Las principales manifestaciones encontradas en este pozo, pertenecen a las - formaciones Amate Superior y Amate Inferior. Al estudiar el Registro de hidrocarburos, algunas manifestaciones de gas en el lodo que resultaron ser fuera de escala y en algunas ocasiones hasta 10 veces más de lo normal, a pesar del peso excesivo del lodo que en ocasiones llegó a 1.8 gr/cc, indican que - existen presiones anormales en estos horizontes.

Aunque este pozo no haya resultado en producción comercial, se logró comprobarse su localización dentro de una estructura factible de producir comercialmente.

Se continuó la exploración de dicha estructura en 1965 con el pozo "Triunfo 2" producto de nuevas interpretaciones de datos obtenidos en la perforación anterior, los cuales indican que la estructura está afectada por una falla que la divide en dos bloques, de los que el Sureste se supone más alto. Por lo tanto, el objetivo fue investigar los desarrollos arenosos del Mioceno Inferior que aparecieron invadidos por agua salada en el pozo "Triunfo 1" y que se esperan encontrar más altos estructuralmente.

Este pozo quedó localizado a 2100.00 m S 29°58'E del pozo "Triunfo 1". Dadas las pruebas de producción realizadas en varios intervalos en los que solamente se obtuvo agua salada y gas de baja permeabilidad, se decidió taponarlo.

A finales de 1970 se perforó el pozo "Triunfo 3" en bloque alto, sobre el flanco oriental de la estructura y tuvo como objetivo las arenas del Mioceno Inferior que en los pozos "Triunfo 1 y 2" mostraron manifestaciones de gas, así como la posibilidad de encontrar hidrocarburos en las calizas del oligoceno que tuvieron manifestaciones en otros pozos cercanos.

Su localización quedó a 3540.0 m N78°30'E del pozo "Triunfo 1". La perforación de este pozo atravesó una columna constituida por grandes cuerpos de lutita con pequeñas intercalaciones de arenas y areniscas; la cima de la caliza se encontró a 1652.0 m y se prolonga hasta 1756.0 m en un solo cuerpo; a partir de esta profundidad hasta la total del pozo, la columna la constituyen grandes cuerpos de lutita con intercalaciones de caliza. Llevando a cabo unas correlaciones con el pozo "Triunfo 2" en las cimas de la caliza, este pozo se encuentra 234.0 m más abajo.

Este pozo quedó clasificado como productor incosteable de gas, pues las pruebas de producción hechas sólo obtuvieron agua salada, con excepción de la que se hizo en el intervalo 700.0 - 703.0 m, en el que se obtuvo gas seco, pero las presiones fueron muy bajas.

El pozo que siguió a estos tres es el "Triunfo 101", pozo al cual se refiere esta tesis. Teniendo por objeto alcanzar las rocas del Mesozoico en una región que, hasta hoy, ha sido productor de gas en arenas del Mioceno.

Los últimos trabajos sísmicos en esta área que pertenece a la franja marginal del borde de la plataforma de Yucatán y que se ubica inmediata a la falla regional Macuspana, produjeron información que va de buena calidad en el Norte a mediana y pobre en el Sur.

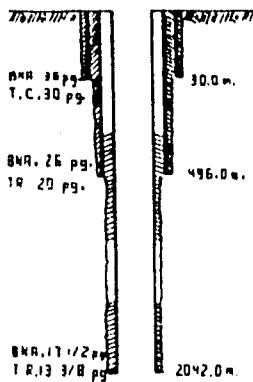
Esta información señala la presencia de reflectores profundos que han sido interpretados como expresión de las rocas mesozoicas, que se encuentran a pro -

fundidades alcanzables por la barrena.

En el plano sísmológico estructural del Cretácico, construido con información que va de mediana a pobre, la estructura "El Triunfo" muestra una forma de tipo dómico o anticlinal corto, con un flanco Noreste, pronunciado y bien definido; hacia el Noroeste la estructura cierra contra la falla regional Macuspana; hacia el Suroeste presenta un cierre reducido en parte debido a buzamiento y en parte a una posible falla normal. La localización de este pozo se ubica en el lado alto de la falla, próxima a la zona creстал de la estructura. Se tiene como objetivo encontrar acumulación comercial de hidrocarburos en las rocas carbonatas del Cretácico y explorar el Jurásico.

Este pozo quedó localizado a 1199.98 m al N57°00'W del pozo "Triunfo 3". Sus coordenadas en el Sistema Punta Gorda son:  $X = 188,391.95$  m y  $Y = -44,008.0$  m.

En abril de 1979 se inició la perforación de este pozo y el estado mecánico del pozo hasta la profundidad de 2,050.0 m es el siguiente:



INTERVALO 0.00 - 30.0 m  
Se perforó con lodo bentonítico

INTERVALO 30.0 - 503.0 m  
LODO: Bentonítico con densidad de 1.15 gr/cc a 1.20 gr/cc  
LITOLOGIA: Lutitas suaves con intercalaciones de areniscas.

INTERVALO 503.0 - 2,050.0 m  
LODO: C.L.S.E. de 1.40 gr/cc hasta 1.74 gr/cc  
LITOLOGIA: Lutitas arenosas, plásticas y lutitas calcáreas.

Hasta esta etapa de la perforación todo se desarrolló con más o menos normalidad, pero fue en la siguiente etapa en que empezaron a presentarse problemas en la perforación, que culminarían con el cambio de programa de cementación de la Tubería de Revestimiento de 95/8 pg. (24.44 cm) de diámetro y que sirvió de base para desarrollar esta tesis.

El plano estructural de la página siguiente muestra la estructura "El Triunfo" y las localizaciones de los pozos que se han perforado en ella.

## 6.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA QUE DERIVO LA CEMENTACION DE LA TUBERIA CORTA INTERMEDIA.

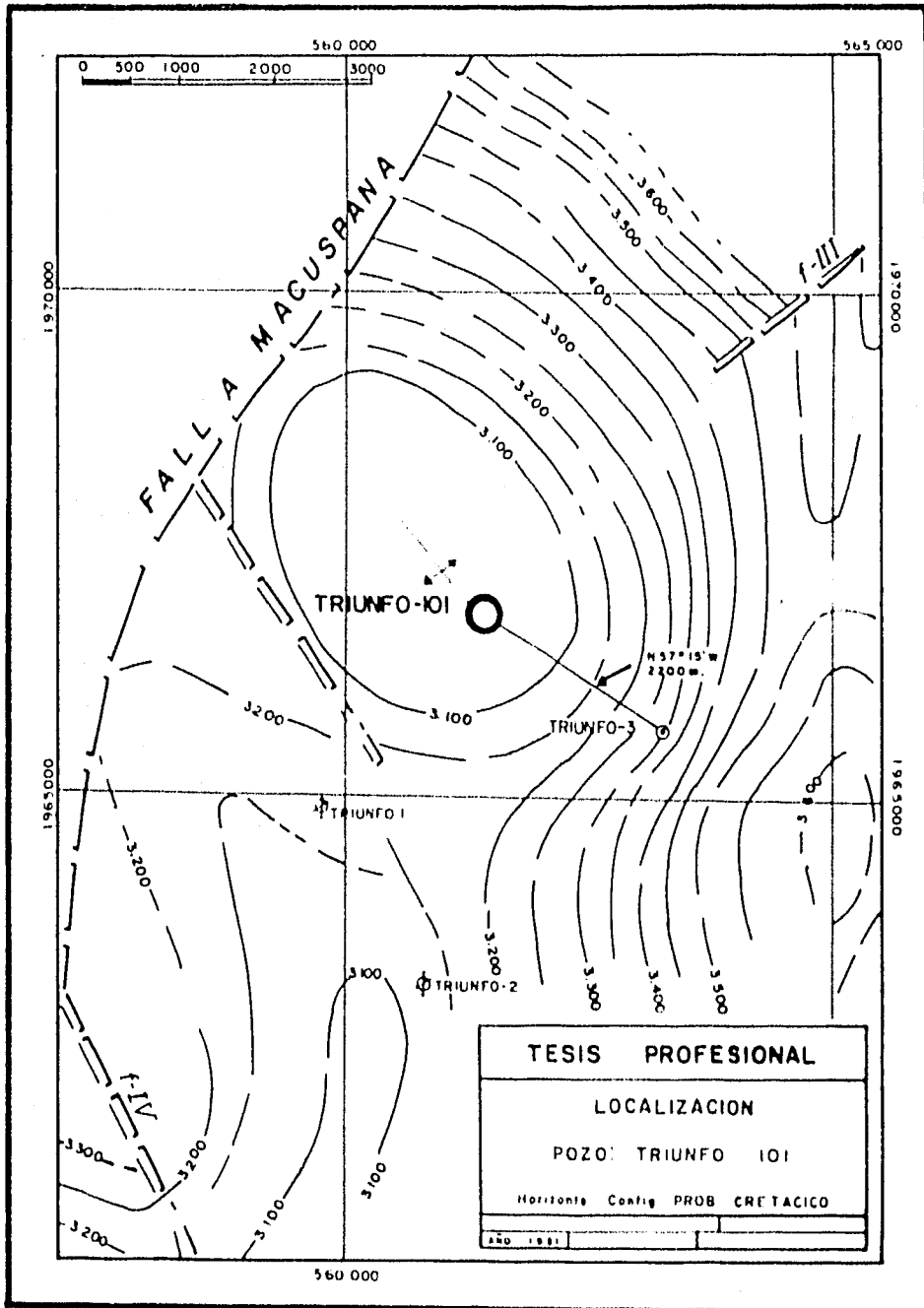
Previendo la posibilidad de seguir perforando formaciones lutíticas y con grandes posibilidades de encontrar sal (según resultados de estudios sísmológicos), se determinó utilizar el lodo de Emulsión Inversa como fluido de control para continuar la perforación del intervalo que comprendía, de la profundidad de 2042.0 m hasta 4200.0 m; profundidad ésta en la cual quedaría la zapata de la IR Intermedia de 95/8 pg. (24.44 cm) de diámetro.

Antes de abordar el problema directamente, es menester mencionar algunas particularidades del comportamiento de la lutita y sobre todo de la sal dentro del pozo, cuando éstas son perforadas y desde luego, hacer notar la forma en que el lodo de emulsión inversa actúa sobre ellas para contrarrestar la restricción del diámetro del agujero.

Refiriéndonos en principio a la lutita, sabemos que tiene la característica de hidratarse y al sucederle esto sufre un aumento en su volumen, esto es, se "hincha", lo cual provoca una disminución del diámetro del agujero; por otro lado, esta hidratación transforma a la lutita en una lutita inconsistente y por consiguiente ocasiona que el agujero se derrumbe.

En lo que respecta a la sal, ésta se vuelve bastante plástica cuando se encuentra a profundidades considerables en donde las presiones y temperaturas son altas. Este comportamiento plástico hará que la sal fluya reduciendo frecuentemente el diámetro del agujero, ocasionando fricciones, resistencias y muchas veces atrapamientos de la tubería de perforación.





Para una mejor comprensión de este comportamiento de la sal, a continuación se mencionan algunas generalidades al respecto:

Las sales no tienen las mismas propiedades estructurales de las rocas. La sal es plástica, se deforma y fluye por recristalización (formación de nuevos minerales).

En zonas de presión normal, la estructura rocosa soporta un poco más de la mitad de la presión de sobrecarga, aproximadamente  $0.123 \text{ Kg/cm}^2/\text{m}$  del total que es  $0.230 \text{ Kg/cm}^2/\text{m}$ . El complemento que es  $0.107 \text{ Kg/cm}^2/\text{m}$  es soportado por los fluidos contenidos en las rocas.

La sal no tiene estructura rocosa, transmite su carga igualmente en todas direcciones. La presión en un punto cualquiera dentro de una reacción masiva de sal es igual a la presión de sobrecarga ( $0.230 \text{ Kg/cm}^2/\text{m}$ ).

Los estratos salinos a profundidades apreciables, presentan problemas por laseudoplasticidad de la sal, causada por altas temperaturas y efectos de presión.

Las presiones y temperaturas necesarias para iniciar la transformación plástica de la sal, son relativamente bajas. Con una sobrecarga de 1000.0 m y un espesor de sal de 305 metros, es suficiente para iniciar el proceso de flujo. Otros reportes indican que las condiciones de flujo uniforme pueden ser aproximadamente a temperaturas mayores de  $204^{\circ}\text{C}$ .

El movimiento de la sal puede llegar a ser significativo con una sobrecarga de 2133 metros, también puede ocurrir flujo continuo a profundidades de 2745 a 3350.0 m. El gradiente geotérmico sería un factor que influenciará en cualquier caso a temperaturas más altas.

Haciendo referencia al lodo de Emulsión Inversa, se considera el más apropiado por las siguientes razones: en virtud de que el filtrado de este tipo de fluido es aceite, puede utilizarse en la perforación de formaciones tales como lutitas o arcillas hidratables; esto es, no las hidrata, con lo que garan-

tiza una mayor efectividad en la calibración del agujero, evitando por consiguiente los derrumbes.

La fase dispersa (agua), de los lodos de emulsión inversa puede saturarse con una sal dada antes de penetrar una sección de sal o puede saturarse durante el proceso de la perforación. Consecuentemente casi la mayoría de los lodos de emulsión inversa que contienen agua salada saturada como fase dispersa, no disuelven la sal por tanto no se agrandan los diámetros del agujero.

Debido a su estabilidad en altas temperaturas, pues estos lodos se han usado satisfactoriamente a temperaturas de 290°C y con densidades de aproximadamente 2.04 gr/cc, es recomendable para pozos profundos.

El resultado que se obtuvo usando este lodo fue aceptable, pues se logró controlar dichas formaciones, ya que las ocasiones en que el agujero redujo su diámetro se debió a que éste permaneció mucho tiempo sin el control de la barrera, esto es, con el lodo estático.

A continuación se presenta un resumen de los aspectos más importantes de la manera como se perforó este intervalo.

Intervalo: 2042.0 m - 2250.0 m

Lodo: Emulsión Inversa; Densidad = 1.74 - 1.90 gr/cc; Viscosidad = 95 - 110 seg. (Marsh)  
Litología: Lutita suave arenosa gris claro.

Observaciones: Ligero flujo de lodo a 2247.0 m

Intervalo: 2250.0 m - 2700.0 m

Lodo: Emulsión Inversa; Densidad = 1.95 gr/cc; Viscosidad = 125 seg.

Litología: Lutita semidura gris oscura ligeramente calcárea.

Observaciones: Gasificación a 2451.0 m bajando la densidad del lodo a 1.84 gr/cc.

Pérdida parcial del lodo ( $12 \text{ m}^3$ ) a 2451.0 m

Intervalo: 2700.0 m - 3450.0 m

Lodo: Emulsión Inversa; Densidad = 1.97 gr/cc; Viscosidad = 120 seg.

Litología: Lutita compacta gris oscura ligeramente calcárea. A partir de 3400.0m, 70 % de lutita gris oscura y 30% de caliza criptocristalina café crema.

Observaciones: Aumento de la velocidad de perforación a 2795.0 m, de 25 min/m a 4 min/m; a 3008.0 m de 65 min/m a 12 min/m y a 3158.0 m de

25 min/m a 10 min/m.

Gasificación a 3070.0 m, bajando la densidad del lodo a 1.88 gr/cc

Ligero flujo de lodo a 3336.0 m y a 3446.0 m.

Intervalo: 3450.0 m - 4200.0 m

Lodo: Emulsión Inversa; Densidad = 2.00 gr/cc; Viscosidad = 120 seg.

Lotología: De 3450.0 m a 3480.0 m, 50% lutita compacta y 50% caliza dolomitizada.

De 3480.0 m a 3500.0 m, lutita gris oscura ligeramente calcárea.

De 3500.0 m a 3600.0 m, marga suave gris con trazas de lutita calcárea.

De 3600.0 m a 3650.0 m, 80% marga gris oscura y 20% lutita gris.

De 3650.0 m a 3670.0 m, 60% lutita arenosa con trazas de marga gris y 40% lutita gris.

De 3670.0 m a 3700.0 m, 40% lutita arenosa, 40% creta café y 20% sal blanca

De 3700.0 m a 3750.0 m, 50% sal blanca y 50% yeso suave con trazas de lutita.

De 3750.0 m a 4200.0 m, 90% sal y 10% yeso.

Observaciones: Aumento de la velocidad de perforación a 3169.0 m de 30 min/m a 7 min/m y a 3677.0 m de 60 min/m a 17 min/m.

El tiempo en que se perforó este intervalo fue de 97 días, el cual ya es de consideración, pero no es más que el reflejo de los problemas que se presentaron durante la perforación y entre los que sobresalen las reparaciones hechas al equipo y las resistencias al paso de la barrena que presentaba el agujero y que era necesario vencer; esta situación ocurría, ya sea después de un cambio de barrena, o bien, por cualquier otro motivo que implicara dejar el agujero con el control del lodo únicamente, el cual lógicamente estaría estático.

Durante la realización de los Registros Geofísicos de Exploración se manifestaron con mayor intensidad las restricciones del agujero. Esto se explica por el excesivo tiempo que se invirtió en la ejecución de cada uno de los Registros y durante el cual no hubo un control continuo del diámetro del agujero excepto por el lodo de perforación. El referido tiempo invertido en la realización de los Registros fue de 10 días, dedicando buena parte de ellos a reparar fallas del equipo de Geofísica.

Después de los Registros hubo otro tiempo de espera, debido a que el cemento

aún no se encontraba completo en la localización, por lo que fue necesario - introducir la barrena hasta el fondo constantemente para mantener en buenas condiciones el lodo así como la calibración del agujero, con el fin de efectuar de la mejor manera posible la cementación de la IR Intermedia de 9 5/8 pg, que para ese momento aún persistía el programa de introducirla en una sola columna y cementarla en dos etapas a través de un cople de cementación múltiple. Con estos viajes de la barrena al fondo se comprobó nuevamente que las restricciones del agujero seguían presentándose.

Una vez que se tuvo en el pozo todos los elementos necesarios tanto para la introducción como para la cementación de la IR, se procedió a la introducción de la misma, aunque con cierta lentitud debido a la inexperiencia del personal en este tipo de operaciones, todo se desarrolló dentro de la normalidad - hasta la profundidad de 2942.0 m, en donde la IR definitivamente ya no pudo - bajar por encontrar fuerte resistencia y por si esto fuera poco, con la tendencia a quedarse pegada, por lo que fue necesario tensionarla hasta con 40 - toneladas logrando despegarla; ante esta situación no quedaba otra alternativa que sacar la IR, mientras se pensaba en otra posibilidad para poder introducir la hasta el fondo. Fue aquí donde nació la idea de aplicar la técnica - de cementación de Tuberías Cortas, para lograr llegar hasta el fondo en un - tiempo mucho menor que si se introdujera en una sola columna, considerando des - de luego al tiempo como factor decisivo en esta operación, pues se había ob- - servado que el pozo reducía su diámetro gradualmente conforme avanzaba el tiem- - po en el cual permanecía con control único del lodo. Al optar por esta técni- - ca se pretendería cubrir primero la zona problema, esto es, el agujero descu - bierto, introduciendo una Tubería Corta en un tiempo que se estimaba menor en un 50%, del que se emplearía en introducir toda la columna hasta el fondo. Pos- - teriormente en una segunda etapa se prolongaría la Tubería Corta hasta la su - perficie, operación que no presentaría mayor problema debido a que el pozo es - taría completamente aislado de la formación.

### 6.3 DISEÑO Y CEMENTACION DE LA TUBERIA CORTA DE 9 5/8 pg.

Después de analizar el problema era necesario elaborar un diseño de tubería de revestimiento que cumpliera con tan especiales condiciones que presentaba el po-

- a) Alta Presión Hidrostática; producto de la elevada densidad del lodo y la gran profundidad; ésta presión estaría actuando durante la introducción de la tubería, pero se incrementaría durante e inmediatamente después de la cementación, debido a la densidad de la lechada de cemento; densidad que por lo menos sería igual a la del lodo.
- b) La Profundidad; factor que influirá notablemente en el peso de la TR.
- c) El estrato salino; siempre con la tendencia a fluir junto con una posible cementación defectuosa, podría convertirse en un peligroso agente corrosivo.
- d) En menor grado, pero de tomarse en consideración, es la alta temperatura

De lo anterior se deduce que la tubería de Revestimiento resultante del diseño, debería poseer entre las principales características, las siguientes:

- a) Alta Resistencia a la Presión de Colapso.
- b) Alta Resistencia a la Carga Axial.
- c) Alta Resistencia de sus juntas a los esfuerzos de tensión.
- d) Alta Resistencia a la presión interna.
- e) Resistente a los ataques de agentes corrosivos, en especial de la sal.
- f) Así también, la calidad del acero debería resistir el efecto de la temperatura para evitar la posibilidad de una disminución en las demás resistencias de la TR.

Para elaborar un diseño de TR con las condiciones anteriormente mencionadas, el método que más se utiliza actualmente en nuestra industria que es el Método Gráfico de la Yountown, no es útil para este caso, ya que dichas gráficas están elaboradas tomando en cuenta la tubería con que se cuenta actualmente en nuestra industria. Aún así resulta difícil, si no es que imposible, obtener un diseño, pues las condiciones que presenta el pozo son drásticas. Es por esta razón que se seguirá un procedimiento analítico para tratar de diseñar una sarta de TR adecuada, considerando desde luego la tubería que tenemos existente en nuestra industria.

Sin duda el factor que regirá este diseño es definitivamente la presión de -

colapso. Partiendo de este factor buscaremos, en principio, la tubería de mayor resistencia al colapso.

En nuestra industria, la tubería de mayor resistencia al colapso con que se cuenta es la de grado V-150, de peso unitario de 70 Kg/m (47lb/pie), con rosca cuadrada (Buttress); luego entonces, es ésta tubería la que analizaremos, pero con condiciones muy especiales, las más favorables para nuestro diseño y en caso extremo, tomando condiciones lo más reales posibles.

Es importante recordar antes que, según el programa original para esta TR intermedia, esto es, antes de presentarse el problema anteriormente expuesto, ésta tubería se diseñó pensando en introducirla en una sola columna, por lo que en la localización se tenía disponible suficiente tubería de grado V-150 de 70 - Kg/m (47 lb/pie) y tubería de grado P-110 del mismo peso unitario. A partir de dicho diseño se había proyectado cubrir el intervalo desde el fondo hasta 900.0 m de profundidad aproximadamente, con tubería de grado V-150 y los restantes 900.0 metros con tubería de grado P-110. Por consiguiente, lo que a continuación se presenta es una Revisión Analítica de Esfuerzos y Resistencias de la Tubería Corta, que estará constituida totalmente por tubería de grado - V-150.

Revisión Analítica del Diseño de la Tubería Corta.-

CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE 95/8", V-150

DIAMETRO EXTERIOR	PESO UNITARIO	DIAMETRO INTERIOR	TIPO DE JUNTA	RESISTENCIA A LA PRESION DE COLAPSO	RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA	RESISTENCIA A LA TENSIÓN	RESISTENCIA DE LA JUNTA A LA TENSIÓN	RESISTENCIA MINIMA A LA CEDENCIA
9.625 PG	41 LBS/PIE	8.681 PG	B C N BUTTRESS	6128 LBS/PG <sup>2</sup>	14 711 LBS/PG <sup>2</sup>	2 025 000 LBS	1 998 000 LBS	150 000 LBS/PG <sup>2</sup>
24.447 CM	70.072 KG/M	22.049 CM	ROSCA CUADRADA	431,549 KG/CM <sup>2</sup>	1035.98 KG/CM <sup>2</sup>	920 454.54 KG	908 181.81 KG	10563.38 KG/CM <sup>2</sup>

Factores de seguridad a usar:

Factor de seguridad al colapso = 1.125

Factor de seguridad a la presión interna = 1.25

Factor de seguridad a la tensión = 1.8

ESFUERZOS A QUE SE SOMETERA LA TUBERIA CORTA DENTRO DEL POZO.

Presión Máxima de Colapso durante la introducción (Pmc<sub>1</sub>)

$$Pmc_1 = \frac{\text{Prof. (m)} \times \text{Densidad del lodo (gr/cc)}}{10} = \frac{4200.0 \text{ m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} = 856.80 \text{ Kg/cm}^2$$

$$Pmc_1 = 856.80 \text{ Kg/cm}^2$$

Tensión máxima durante la introducción (Tm<sub>1</sub>)

Tm<sub>1</sub> = Long. total de la tubería (m) × Peso unitario de la tubería (Kg/m) × Factor de flotación.

$$Tm_1 = 2250.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times \left( 1 - \frac{2.04 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}} \right) = 116\ 669.88 \text{ Kg.}$$

En esta etapa de la introducción no se consideran los esfuerzos de Presión - Interna, pues es muy difícil de llegar al caso de levantar altas presiones - dentro de la Tubería Corta.

Presión Máxima de Colapso durante la cementación (Pmc<sub>2</sub>) - Para el cálculo de esta presión se considera la densidad de la lechada de cemento que se encontrará en el exterior de la Tubería Corta; para efectos de cálculo se supondrá una densidad promedio de 2.10 gr/cc.

$$Pmc_2 = \frac{2250.0 \text{ m} \times 2.10 \text{ gr/cc} + 1950.0 \text{ m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} = 870.3 \text{ Kg/cm}^2$$



Tensión máxima durante la cementación ( $T_{m_2}$ ), En este caso la tubería "flotará" en el seno de cemento.

$$T_1 = 2250.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/cm}^2 \times \left( 1 - \frac{2.10 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}} \right) = 115,408.58 \text{ Kg.}$$

A esta tensión habrá que sumarle la que surge debido a la presión final de desplazamiento. Para conocer la magnitud aproximada de esta tensión, suponemos una presión final de desplazamiento. La presión supuesta será de  $350 \text{ Kg/cm}^2$ , considerada ésta entre las más críticas de alcanzar en este tipo de operaciones. A partir de esta presión obtenemos la tensión que buscamos.

Partiendo de una expresión muy conocida,  $\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$ ; de aquí despeja-

mos la variable que nos interesa,  $\text{Fuerza} = \text{Presión} \times \text{Area}$ . El área interior de la tubería la obtenemos de la siguiente manera:

$$\text{Area} = \frac{\pi \times (\text{Diám. Int. de la tubería})^2}{4} = \frac{3.1416 \times (22.049)^2}{4} = 381.828 \text{ cm}^2$$

Por consiguiente, la tensión producto de la presión final será:

$$T_2 = 350 \text{ Kg/cm}^2 \times 381.828 \text{ cm}^2 = 133\ 639.8 \text{ Kg}$$

Finalmente la Tensión Máxima durante la cementación será:

$$T_{m_2} = T_1 + T_2 = 115\ 408.58 \text{ Kg.} + 133\ 639.8 \text{ Kg} = 249\ 048.38 \text{ Kg}$$

$$T_{m_2} = 249\ 048.38 \text{ Kg}$$

Máxima Presión Interna durante la cementación ( $P_{im_1}$ ).- Esta presión se manifestará primordialmente al finalizar el desplazamiento de la lechada de cemento, pero que difícilmente será mayor de  $350 \text{ Kg/cm}^2$ , por lo que para efectuar esta revisión analítica se considerará los  $350 \text{ Kg/cm}^2$  como presión interna - máxima aplicada en la superficie.

$$P_{im_1} = 350 \text{ Kg/cm}^2$$

REVISIÓN DE RESISTENCIAS DE LA TUBERÍA CORTA AFECTADOS POR FACTORES DE SEGURIDAD Y ESFUERZOS A QUE SE SOMETERÁ DENTRO DEL POZO.

Revisión al Colapso en la etapa de introducción. - Esta revisión se hará en dos puntos, esto es, en el fondo y en el extremo superior de la tubería Corta, ya que en este último su resistencia al colapso disminuirá por efecto de la tensión.

Así tenemos que la resistencia al colapso ( $Rc_1$ ) de la tubería en el fondo será:

$$Rc_1 = \frac{\text{Resistencia Nominal}}{\text{Factor de Seguridad}} = \frac{431.549 \text{ Kg/cm}^2}{1.125} = 383.599 \text{ Kg/cm}^2$$

$$Rc_1 = 383.599 \text{ Kg/cm}^2$$

Si comparamos esta resistencia con la presión de colapso en el fondo vemos que la presión de colapso es mayor que la resistencia al colapso ( $P_{mc_1} > Rc_1$ ), o sea  $856.80 \text{ Kg/cm}^2 > 383.599 \text{ Kg/cm}^2$ .

Ahora bien la resistencia al colapso ( $Rc_2$ ) de la tubería a la profundidad de - 1950.0 m, que es la profundidad aproximada en donde quedará el último tramo de tubería y que estará soportando el peso de toda la tubería Corta, la obtenemos con el procedimiento siguiente:

- 1o. Obtenemos el área de la sección transversal ( $At$ ) de la tubería de 9 5/8 pg (24.44 cm):

$$At = \frac{\pi}{4} \left[ (\text{Diám. ext.})^2 - (\text{Diám. int.})^2 \right] = \frac{\pi}{4} \left[ (24.44)^2 - (22.049)^2 \right] = 87.570 \text{ cm}^2$$

- 2o. Obtenemos el cociente de la carga de tensión (peso de la tubería Corta en

el lodo) y el área de la sección transversal de la tubería; a este cociente se le llamará Esfuerzo de Tensión (ET):

$$ET = \frac{\text{Carga de Tensión}}{At} = \frac{116\ 669.88\ \text{Kg}}{87.570\ \text{cm}^2} = 1332.304\ \text{kg/cm}^2$$

3o. Obtenemos el porcentaje de este Esfuerzo de Tensión (ET) con respecto a la Resistencia Mínima a la cedencia:

$$P = \frac{ET}{R\ \text{mín. ced.}} = \frac{1332.304\ \text{Kg/cm}^2}{10\ 563.38\ \text{Kg/cm}^2} \times 100 = 12.6\ \%$$

4o. Con este valor entramos al Monograma de la Elipse de Esfuerzos Biaxiales (Fig. 6.1), para obtener el porcentaje que se aplicará a la resistencia al colapso de la tubería y así conocer su resistencia efectiva a esa profundidad:

El porcentaje leído es 92.50 %

5o. Multiplicamos este porcentaje por la resistencia al colapso de la tubería,

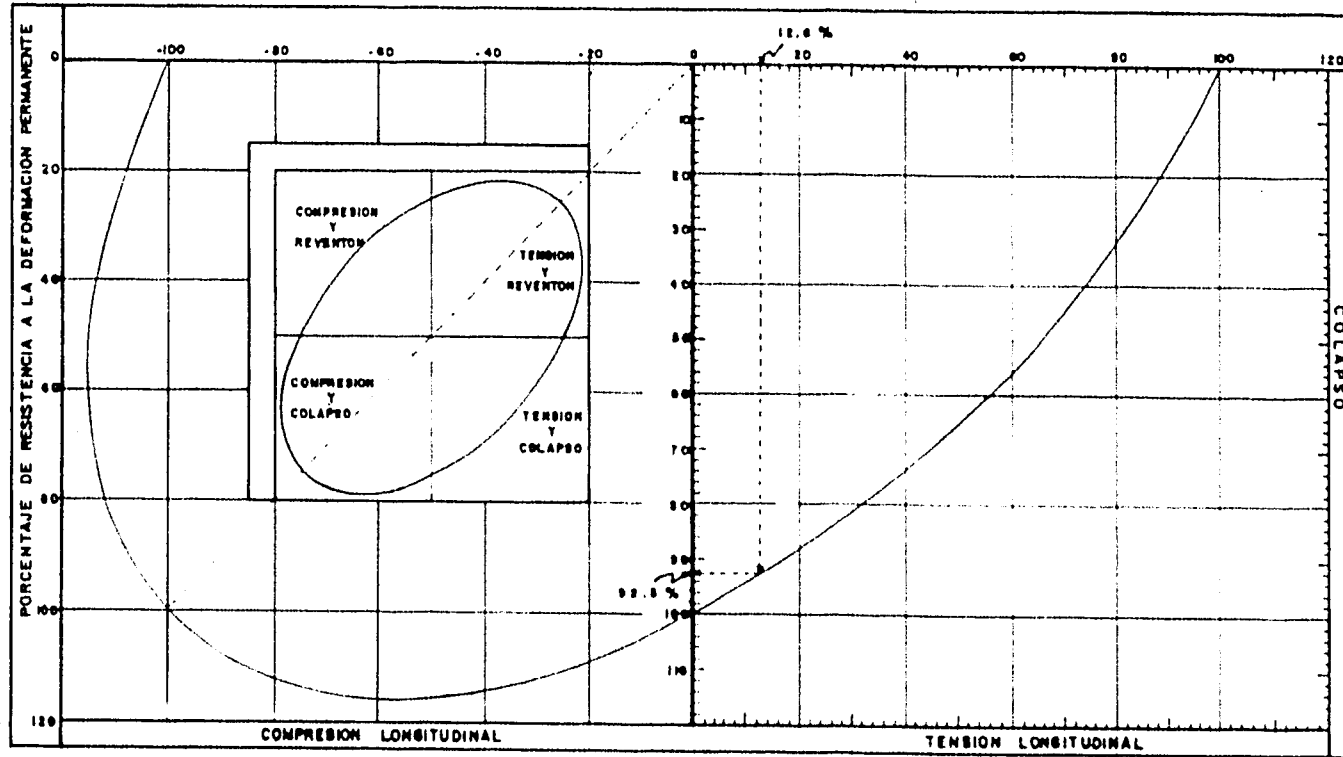
Resistencia al colapso corregida por tensión ( $RL_2$ ) =  $383.599\ \text{kg/cm}^2 \times 0.9250 = 354.829\ \text{kg/cm}^2$ ; será pues esta resistencia la que tendrá la tubería a 1950.0 m en donde la presión de colapso ( $PC_1$ ), será.

$$PC_1 = \frac{1950.0\ \text{m} \times 2.04\ \text{gr/cc}}{10} = 397.8\ \text{kg/cm}^2$$

Como se puede apreciar, también a esta profundidad la presión de colapso resulta ser mayor que la resistencia de la tubería. es decir  $397.8\ \text{kg/cm}^2 > 354.829\ \text{kg/cm}^2$ .

Revisión a la Tensión en la etapa de introducción.- La Resistencia a la Tensión ( $Rt_1$ ) de esta tubería será:

FIG. 6.1 ELIPSE DE ESFUERZOS BIAXIALES A LA DEFORMACION PERMANENTE



$$Rt_1 = \frac{\text{Resistencia Nominal a la Tensión}}{\text{Factor de seguridad}} = \frac{920\,454.54 \text{ Kg.}}{1.8} = 511\,363.63 \text{ Kg}$$

Esta resistencia corresponde al cuerpo del tubo, que, comparada con la tensión Máxima que estará actuando sobre el último tramo (116 669.88 Kg), vemos que es mucho mayor, es decir,  $Rt_1 > Tm_1$  o lo que es lo mismo, 511 363.63 Kg > 116 669.88 Kg.

Respecto a la resistencia de la junta a la tensión ( $Rt_2$ ) tenemos:

$$Rt_2 = \frac{908,181.81 \text{ Kg}}{1.8} = 504,545.45 \text{ Kg.}$$

como se observa, también la resistencia a la tensión de la junta es mucho mayor que la Tensión Máxima ( $Rt_2 > Tm_1$ ).

Revisión a la Presión Interna en la etapa de introducción.- Esta tubería tiene una Resistencia a la Presión Interna ( $Rpi$ ) de:

$$Rpi = \frac{\text{Resistencia Nominal a la Presión Interna}}{\text{Factor de seguridad}} = \frac{1035.98 \text{ Kg/cm}^2}{1.25} = 828.784 \text{ Kg/cm}^2$$

En esta etapa de la introducción no es usual que se requieran de altas presiones de circulación que pudieran afectar la resistencia de esta tubería, por lo que no es necesaria una comparación de esfuerzos y resistencias.

Revisión al colapso en la etapa de cementación.- Como es lógico suponer en esta etapa los esfuerzos de colapso que existirán dentro del pozo serán más críticos que durante la introducción, debido a la densidad de la lechada de cemento. De los cálculos antes realizados se deduce que la presión de colapso que habrá en el fondo del pozo, será mucho mayor que la resistencia al colapso de la tubería; tendremos entonces que  $Pmc_2 > Rc_1$ , que en cantidades sería, - - - 870.3  $\text{Kg/cm}^2 > 383.599 \text{ Kg/cm}^2$ .

A la profundidad de 1950.0 m la resistencia al colapso de la tubería cambiará con respecto a la resistencia al colapso calculada durante la introducción a esa misma profundidad. Esta variación se debe a que el peso de la tubería Cor-

ta disminuirá aún más al estar en el seno del cemento y por otro lado, la carga de tensión se incrementará notablemente al actuar la presión final; la resistencia al colapso de la tubería, calculada con estas condiciones para la profundidad de 1950.0 m será:

1o. Area de la sección transversal de la tubería;  $A_t = 87.570 \text{ cm}^2$

2o. Obtenemos el Esfuerzo de Tensión.

$$ET = \frac{\text{Carga de Tensión}}{A_t} = \frac{249\,048.38 \text{ Kg}}{87.570 \text{ cm}^2} = 2843.992 \text{ Kg/cm}^2$$

3o. Porcentaje de Esfuerzo de Tensión con respecto a la Resistencia Mínima de Cedencia:

$$P = \frac{ET}{R \text{ min. Ced.}} = \frac{2843.992 \text{ Kg/cm}^2}{10\,563.38 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 26.9 \%$$

4o. Del Monograma de la fig. 6.1 obtenemos el siguiente porcentaje, 83.3 %

5o. La Resistencia Efectiva al colapso ( $RC_3$ ) corregida por tensión será:

$$Rc_3 = 383.599 \text{ Kg/cm}^2 \times 0.833 = 319.537 \text{ Kg/cm}^2$$

Lo que significa que las posibilidades de colapso para la parte superior de la tubería Corta aumentan en la etapa de cementación, es decir, la presión de colapso a 1950.0 m es mayor que la resistencia al colapso a esa misma profundidad ( $PC_1 > RC_3$  ó  $397.8 \text{ Kg/cm}^2 > 319.537 \text{ Kg/cm}^2$ ).

Revisión a la Tensión en la etapa de cementación. - Para esta etapa de la cementación el balance de esfuerzos y resistencias a la tensión es el siguiente:

Con respecto a la Resistencia a la tensión del cuerpo de la tubería tenemos que ésta es mayor a la Tensión Máxima que ocurrirá en el pozo ( $Rt_1 > Tm_2$ , ó  $511\,303.63 \text{ Kg} > 249\,048.38 \text{ Kg}$ .)

Algo similar ocurre con la Resistencia a la Tensión de la junta, es decir  $Rt_2 > Tm_2$ , o sea,  $504\,545.45 \text{ Kg} > 249,048.38 \text{ Kg}$ .

Revisión a la Presión Interna en la etapa de cementación.- Anteriormente ya se determinó la resistencia a la presión interna de esta tubería, la cual es muy difícil de alcanzar en esta etapa de la cementación, además hay que tener presente que la Tubería Corta estará protegida en su totalidad por una presión exterior, que evitará permanentemente que se establezca una presión diferencial que pudiera afectar la resistencia interna.

Después de realizada la Revisión Analítica correspondiente al diseño de la Tubería Corta, se concluye que son grandes las posibilidades de que dicha tubería se colapse. Según esta revisión, determina que la tubería de grado V-150, 70 Kq/m (47 lb/pie) no es la adecuada para esta operación, pues se demostró analíticamente que sufrirá deformaciones por colapso en toda su longitud.

Dado que la disponibilidad en cuanto a tubería de revestimiento de mayor resistencia que la de grado V-150, 70 Kq/m, es definitivamente nula, no queda otra alternativa que la de utilizar dicha tubería, decisión que nos deja irremediamente al margen de la verdadera concepción de lo que es ingeniería de diseño. Desde luego esta decisión se basa en una situación mucho muy extrema, pero no por ser tal se considera inexistente. La situación a que se hace referencia, surge de considerar el hecho de que la Tubería Corta se encontrará siempre en un aparente equilibrio de presiones, esto es, que la presión que habrá afuera de la tubería ( espacio anular ) será la misma que existirá adentro, ya que la densidad del lodo será igual en ambas partes, condición existente preferentemente en la etapa de introducción. Lo anterior establece que la Tubería Corta no sufrirá esfuerzo alguno que pudiera provocar su aplastamiento y menos aún una explosión.

En la etapa de la cementación y sobre todo al finalizar el desplazamiento de la lechada de cemento, este aparente equilibrio de presiones se romperá parcialmente, debido a que la presión en el espacio anular será mayor que la presión en el interior de la tubería, esto se explica por ser la densidad de la lechada de cemento mayor que la densidad del lodo. lo cual lógicamente favorecerá la posibilidad de que ocurra el colapso de la tubería.

Verificación de la Resistencia a la tensión de la Tubería de Perforación.-

Otro de los elementos determinantes en las operaciones de cementación de Tuberías Cortas, es la tubería de perforación, la cual desempeñará un papel muy importante en la etapa de su introducción, por tal motivo, una característica principal que deberá poseer es una alta resistencia a la tensión, ya que además de sostener su propio peso, resistirá el peso de la Tubería Corta.

Para esta operación se dispuso de tubería de perforación de 5pg(12.7 cm) de diámetro, grado X-95 y peso unitario de 29 Kg/m (19.5 lb/pla), clasificada en su mayoría como nueva, por lo que su resistencia a la tensión es de 227 727 Kg. La carga de tensión total que esta tubería sostendrá será,

Tensión total = Peso de la Tubería Corta ( $I_{m_1}$ ) + Peso de la Tubería de Perforación ( $I_{tp}$ )

El valor de  $I_{m_1}$  ya se calculó anteriormente, sólo resta determinar el peso de la tubería de perforación.

$$I_{tp} = 1950.0 \text{ m} \times 29 \text{ Kg/m} \times 0.74 = 41\ 847 \text{ Kg.}$$

Sustituyendo valores, obtenemos la Tensión total,

$$\text{Tensión total} = 116\ 669.88 \text{ Kg} + 41\ 847 \text{ Kg} = 158\ 516.88 \text{ Kg.}$$

Por lo tanto se concluye que la Resistencia a la tensión de la tubería de perforación es mayor que la tensión total a la que estará expuesta dentro del pozo, esto es,  $227\ 727 \text{ Kg} > 158\ 516.88 \text{ Kg}$

De lo anterior se deduce que se estará operando con un factor de seguridad a la tensión, para la tubería de perforación, igual a,

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{227\ 727 \text{ Kg}}{158\ 516.88 \text{ Kg}} = 1.43$$



Herramientas Auxiliares y Accesorios usados en la Cementación de la Tubería Corta de 9 5/8 pg.- La figura 6.2 muestra el aparejo de herramientas y accesorios usados en esta operación.

Como se mencionó desde un principio, no es usual la cementación de Tuberías Cortas de tales dimensiones en nuestro País y lo es esporádicas en otros países, por tal razón al encontrarnos ante este caso, tratamos de operar con las márgenes de seguridad más favorables que nos sean posibles; de ahí que al analizar las condiciones del caso, nuestra atención se concentre en un factor - muy importante y que es el peso de la Tubería Corta. Este factor es decisivo en la selección del tipo de colgador que habrá de usarse para esta operación. Es pues esta herramienta la que destaca en importancia sobre las demás, en el caso particular de esta operación, ya que dicha herramienta será la responsable de mantener colgada la Tubería Corta de 9 5/8 pg. (24.44 cm) dentro de la TR superficial de 13 3/8 pg (33.99 cm)

Los tipos de colgadores con que se contaban en ese momento, dada la premura - de la operación, eran los equipados con seis cuñas únicamente, tanto mecánicos como hidráulicos. Respecto al mecanismo de anclaje se seleccionó un COLGADOR HIDRAULICO, por considerar que su anclaje es mucho más sencillo que los de tipo mecánico, pues no hay que olvidar que la carga de tensión que soportará será grande. Otra razón más que apoya esta selección, son las experiencias satisfactorias de operaciones anteriores en que el peso de la tubería Corta ha sido excesivo.

Según especificaciones de la casa fabricante de estas herramientas, cada cuña del colgador es capaz de soportar alrededor de 15 000 Kg. de peso. Ahora bien, razonando acerca del peso de la Tubería Corta calculado anteriormente, que fue de 116,669.88 Kg., inmediatamente pensamos en la posibilidad de utilizar dos colgadores hidráulicos, con el fin de tener un margen de seguridad mayor que si se usara uno, ya que tendríamos una resistencia a la carga de tensión de hasta 180,000 Kg., suponiendo desde luego que trabajen el total de las doce cuñas en conjunto, aunque lo más probable es que únicamente trabajen las seis cuñas del colgador inferior, debido a que este anclará primero. Por otra parte, al utilizar dos colgadores, se estará dando una alternativa de solución a un -

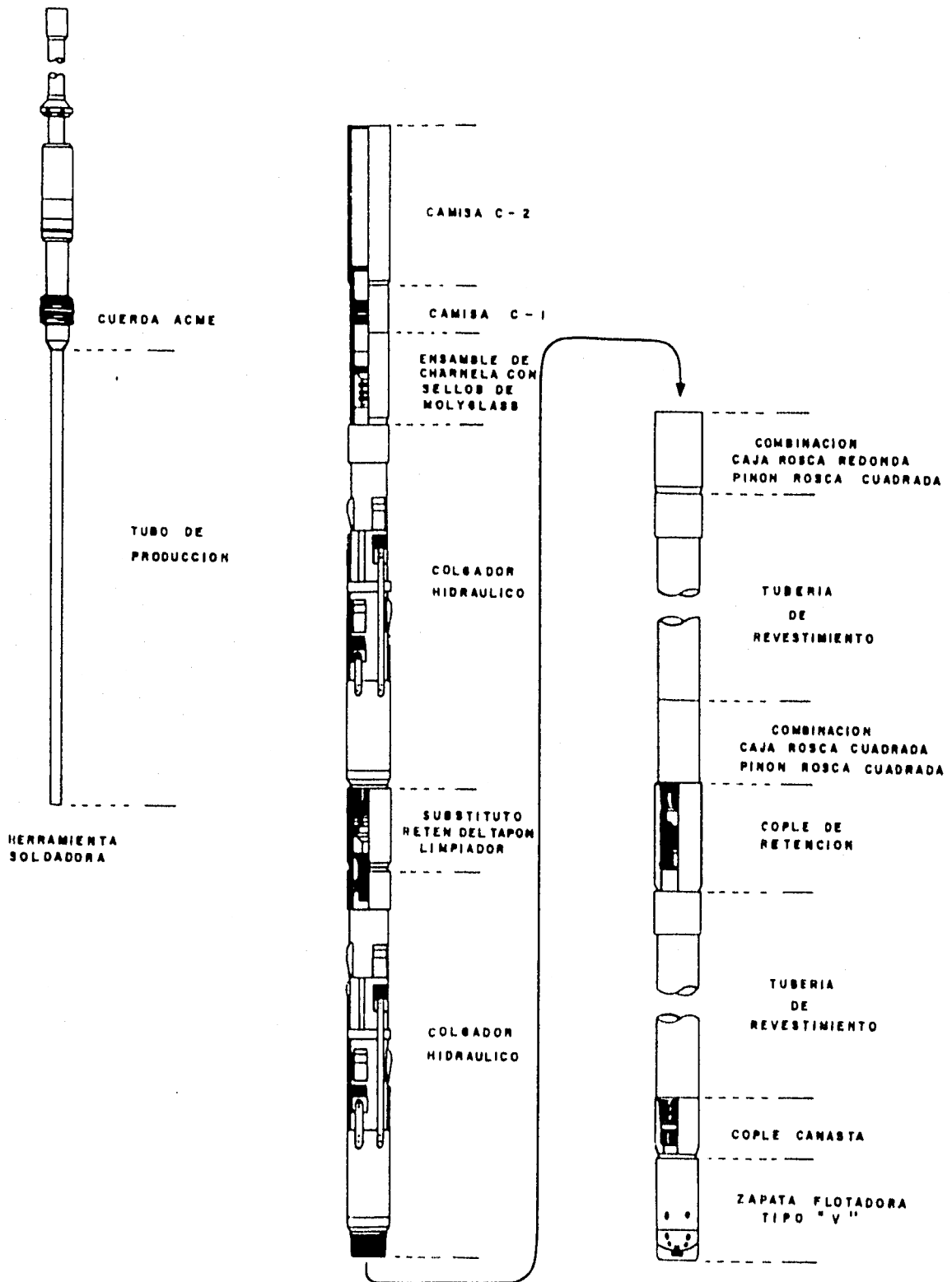


FIG. 6.2 APAREJO USADO EN LA CEMENTACION DE LA TUBERIA CORTA DE 9 5/8"

probable problema que pudiera presentarse, como es una posible falla de uno de los colgadores, ya sea por deslizamiento de cuñas o por un ineficaz anclaje de uno de ellos.

Hacia la parte superior de los colgadores va colocada la CAMISA SOLTADORA ó C-1 que, junto con la extensión de la camisa ó C-2, forman una sola pieza.

En la parte media de estas dos herramientas, colgador y camisa, va colocado un ENSAMBLE DE CHARNELA CON SELLOS DE MOLIGLASS, que no es más que un sustituto que aloja en su interior unos sellos de tipo anillo y que tendrán la función de lograr un sello entre el tubo inferior de la herramienta soltadora y la Tubería Corta, con el objeto de no permitir el paso del cemento hacia la parte superior de la misma, es decir, evita el regreso del cemento dentro de la Tubería Corta durante la cementación. Su función equivale a la que realizan las copas selladoras en otro tipo de herramientas soltadoras.

Dado que la herramienta soltadora que se usará en esta operación no lleva integrado el tapón limpiador (2º. tapón) en su extremo inferior, como las herramientas soltadoras usuales, se requiere de otra herramienta auxiliar que contenga este tapón; esta herramienta se le conoce con el nombre de SUBSTITUTO - RETEN DEL TAPON LIMPIADOR y va colocada entre los dos colgadores.

Otra de las herramientas auxiliares usadas en esta operación es la HERRAMIENTA SOLTADORA. Entre sus componentes principales de esta herramienta están, en su parte inferior, un tubo sencillo, que para este caso particular, será un tubo de producción de 2 7/8 pg. (7.30 cm) de diámetro exterior y de una determinada longitud que permita un movimiento vertical suficiente para poder verificar si se ha desenroscado la cuerda "ACME", es decir, para poder comprobar si se ha soltado la Tubería Corta, sin necesidad de que la tubería de producción salga del ensamble que contiene los sellos de Moliglass. Por otro lado, la longitud de este tramo de tubería de producción deberá permitir llegar lo más cerca posible del sustituto retén del tapón limpiador y poder así lograr un perfecto ensamble de los tapones (desplazador y limpiador). Hacia la parte media de esta herramienta soltadora, se encuentra la cuerda "ACME", por medio de la cual estará unida la tubería de perforación a la Tubería Cor-

ta, esto es durante la introducción hasta que ésta se ancle. Esta rosca - "ACME" desempeña un papel muy importante en esta operación, ya que será la que resista todo el peso de la Tubería Corta durante el tiempo necesario antes de que ésta haya sido anclada. En la parte superior de la herramienta - soltadora, lleva una sección ensanchada en forma de sombrilla y que tiene la función de evitar que se introduzcan objetos o cualquier material extraño dentro de la camisa, que pudiera obstruir el desenroscado de la cuerda "ACME" - y/o que dificultara la recuperación de la herramienta soltadora.

Dentro de los accesorios y refiriéndonos en especial, al equipo de flotación que se requirió para esta operación, se encuentra la ZAPATA FLOTADORA tipo "V". Esta zapata, como se mencionó en capítulos anteriores, es la más recomendable para casi todos los casos de cementación de Tuberías Cortas.

Inmediatamente arriba de esta zapata se colocó el COPLE CANASTA, que no es más que un cople conteniendo en su interior una sección plana con agujeros, esto es, una coladera, ya que precisamente tendrá esa función, pues será ahí - donde quedará alojada la pedacería del material que servirá de asiento de la canica y la canica misma, la cual es usada para accionar las cuñas del colgador hidráulico una vez alcanzada determinada presión, provocando con esto que el asiento y la canica se deslicen hasta caer al cople canasta, que los retiene evitando así que lleguen hasta la zapata y puedan obstruir la salida del cemento.

Arriba de este cople canasta se colocan dos tramos de tubería e inmediatamente después se coloca el COPLE DE RETENCION, que además de cumplir con la función de retener los tapones formando un sello entre sí, sirve de asiento de la canica que operará los colgadores hidráulicos. Este cople de retención para que cumpla con esta otra función, lleva una modificación, la cual consiste en un juego de piezas de bakelita que forman una camisa, misma que estará diseñada para que a determinada presión se deslice, permitiendo nuevamente la circulación del lodo a través del cople.

Fue necesario usar en esta sarta, combinaciones de un tipo de rosca a otra, pues mientras la Tubería Corta tenía rosca cuadrada (Buttress), las herramientas

tas auxiliares y los accesorios tenían rosca redonda de 8 hilos por pulgada (2.54 cm).

De los accesorios indispensables usados en esta operación están los CENTRADORES, que junto con los collarines, se distribuyeron a lo largo de la Tubería Corta de la forma siguiente; en los primeros 3 tramos se colocaron 6 centradores; posteriormente se colocó 1 cada tercer tramo a partir del tercero hasta el 13avo. tramo; en el tramo número 64 se colocó 1 centrador; en el 65 y en el 66 se colocaron 4 centradores; en los tramos 67, 204 y 205 se colocó 1 centrador por tramo.

Cementación de la Tubería Corta.- Este punto incluye el razonamiento y cálculos de varios factores relacionados con la cementación, como son:

- Cálculo del volumen de lechada de cemento a utilizar.
- Características de la lechada.
- Características del fluido lavador y del fluido espaciador.
- Régimen de flujo más recomendable para el desplazamiento de la lechada de cemento.
- Programa de circulaciones.
- Presión máxima a manejar durante la operación de cementación.
  
- Desarrollo de la operación.

A continuación se presenta el desarrollo de cada uno de ellos.

Cálculo del volumen de lechada de cemento a utilizar.- Este volumen comprende el cálculo de tres volúmenes, que son:

- a) Volumen del espacio anular entre el agujero perforado y la tubería Corta.
- b) Volumen interior de dos tramos de tubería que separan el cople de retención y la zapata.
- c) Volumen del espacio anular del traslape entre tuberías.

Los cálculos son los siguientes:

un registro de calibración del agujero, el cual se perforó con barrena de 12 1/4 pg. (31.11 cm) de diámetro; de los Registros Geofísicos que nos proporcionan la calibración del agujero están entre otros, el Sónico de Porosidad, Densidad Compensado, Microlog, etc. De uno de estos registros se obtuvo un diámetro promedio de 13 13/16 pg (35.08 cm), por lo que el volumen del espacio anular entre agujero y tubería (V1) será:

$$\begin{aligned} V_1 &= \text{Longitud del agujero descubierta} \times \text{Capacidad del espacio anular.} \\ V_1 &= (4200.0 \text{ m} - 2042.0 \text{ m}) \times \left[ (13.812 \text{ pg})^2 - (9.625 \text{ pg.})^2 \right] \times 0.5065 \\ V_1 &= 2158.0 \text{ m} \times 49.70 \text{ lts./m} = 107\,252.6 \text{ lts.} \end{aligned}$$

$$\underline{V_1 = 107.252. \text{ m}^3}$$

b) El volumen comprendido entre la zapata y el cople de retención es:

$$V_2 = \text{Longitud de dos tramos de tubería} \times \text{Capacidad de la tubería.}$$

Se supone para este cálculo una longitud de 12m por tramo de tubería. Por lo tanto,

$$V_2 = 24.0 \text{ m} \times (8.681 \text{ pg.})^2 \times 0.5065 = 916 \text{ lts.}$$

$$\underline{V_2 = 0.916 \text{ m}^3}$$

c) En el caso particular de esta operación se ha proyectado una longitud de traslape de 100.0 m., así que el volumen necesario de lechada de cemento para cubrirlo será:

$$\begin{aligned} V_3 &= \text{Longitud del traslape} \times \text{Capacidad anular entre tuberías} \\ V_3 &= 100.0 \text{ m} \times \left[ (12.415 \text{ pg.})^2 - (9.625 \text{ pg.})^2 \right] \times 0.5065 = 3114.54 \text{ lts.} \end{aligned}$$

$$V_3 = 3.114 \text{ m}^3$$

La suma de estos tres volúmenes nos da el volumen estrictamente necesario de

lechada de cemento para llenar el espacio anular, pero es usual aumentarle - un exceso con el fin de asegurar un buen llenado del espacio anular, así como dejar un "tapón" de cemento arriba de la Tubería Corta para con esto conseguir una buena cementación. Al agregarle este exceso se previene además, la posibilidad de no lograr bombear la totalidad del cemento programado por alguna razón no prevista; este exceso también compensa de alguna manera, el cemento que se desperdicia en el momento mismo de la cementación. Uno de los porcentajes de exceso que más se aplican en estas operaciones es el de 25%. En esta ocasión se aplicará también el 25%, por lo que el volumen de exceso será:

$$V4 = (V1 + V2 + V3) \times 0.25$$

$$V4 = (107.252 \text{ m}^3 + 0.916 \text{ m}^3 + 3.114 \text{ m}^3) \times 0.25 = 27.82 \text{ m}^3$$

Por lo tanto el volumen total de lechada de cemento será:

$$V_T = V1 + V2 + V3 + V4$$

$$V_T = 107.252 \text{ m}^3 + 0.916 \text{ m}^3 + 3.114 \text{ m}^3 + 27.82 \text{ m}^3 = 139.1 \text{ m}^3$$

$$\text{VOLUMEN TOTAL DE LECHADA} = 139 \text{ m}^3$$

Características de la lechada.- Para establecer las características que deberá poseer la lechada de cemento a utilizar en esta operación, es necesario tomar en cuenta las condiciones más desfavorables que presentaba el pozo y entre las que sobresalen: la alta densidad del lodo de perforación, el gran espesor del estrato salino, la alta temperatura y desde luego, las formaciones lutíticas y arcillosas fácilmente hidratables que se encontraban en buena proporción a lo largo del agujero. De acuerdo a estas condiciones se determinó la utilización de dos tipos de lechadas diferentes; esta diferencia radicaba básicamente en la composición y en el valor de la densidad.

Por un lado la presencia de la masa salina, requería de una lechada con propiedades compatibles con la sal, la cual se conseguía agregándole un aditi-

vo a la lechada; este aditivo referido es el CLORURO DE SODIO. Este es un aditivo de función doble que retarda el fraguado del cemento y mejora las cualidades de adhesión del cemento a formaciones de sal y lutitas. Además, evita el daño a la formación por el agua de filtrado de la lechada, ya que la sal no permite la deshidratación de la lechada.

Referente a la densidad de la lechada, según lo que nos ha demostrado la experiencia, ésta deberá ser mayor que la densidad del lodo para conseguir con esto un mejor desplazamiento del lodo en el espacio anular; pero dadas las limitaciones que presentaba el pozo no fue posible elevar la densidad de la lechada más de lo permitido por la resistencia de la formación a una posible fractura. Por tal razón, se determinó que la densidad de la lechada que cubriría la parte superior del estrato salino, sería de 2.10 gr/cc, o sea 0.06 gr/cc mayor que la densidad del lodo que se estaba usando. Y en cuanto a la densidad de la lechada salada, es decir, la que quedaría frente al estrato salino, sería igual a la del lodo, esto es, de 2.04 gr/cc. Esto significa que esta última lechada requeriría de una relación agua/cemento mayor que en la preparación de la primera lechada, esto se planeó con el propósito de evitar interferencias en las propiedades o funciones de otros aditivos por la presencia de sal.

El hecho de que la columna de cemento que se alojará en el espacio anular no sea muy densa, trae consigo algunos beneficios, como son, reducción de las probabilidades de que la formación se fracture; la presión de colapso para la tubería no será tan elevada en comparación con la que se había calculado; por otra parte, facilitará su bombeo, así como su desplazamiento a través del espacio anular.

Uno de los cementos más adecuados para las condiciones que presentaba este pozo, es el cemento clase "G". Esta clase de cemento ha demostrado ser uno de los más estables para usarlo en pozos de gran profundidad donde se registran altas temperaturas y grandes presiones. Aún con estas propiedades que posee este cemento, es necesario agregarle otros aditivos que harán que estas propiedades se vean acrecentadas conforme nos sea más conveniente de acuerdo a las condiciones de operación que requerimos.



Dentro de los aditivos que habrán de agregársele al cemento, primeramente tenemos al RETARDADOR. Este aditivo nos controla la acción aceleradora de la temperatura y la presión en lo referente al tiempo de fraguado. Al adicionar este retardador conseguimos que el tiempo de fraguado se amplíe y que nos permita una constante movilidad de la lechada, mientras ésta es colocada adecuadamente en el espacio anular.

Otro de los aditivos que se le agregará al cemento es un REDUCTOR DE PERDIDA DE FLUIDO, esto es, con objeto de contrarrestar la deshidratación de la lechada que provocaría la presencia de formaciones hidratables, como son las lutitas y la sal, que en este pozo se encuentran en gran proporción. De no evitar esta deshidratación, la lechada sería afectada principalmente en su densidad, pues esta sufriría un incremento, lo que acarrearía otros problemas como son, un rápido fraguado, grandes pérdidas de presión por fricción, mayor presión hidrostática, disminución del volumen de lechada, etc.

LA HARINA SILICA es otro de los aditivos usados en esta ocasión con el fin de estabilizar y mejorar la resistencia a la compresión, además su uso ha resultado efectivo en temperaturas mayores a 100°C.

Entre los aditivos que siempre son necesarios para obtener una óptima lechada en el momento de mezclar el cemento en la superficie, están los DISPERSANTES y LOS ANTIESPUMANTES, cuyas funciones ya se mencionaron en el capítulo 3.

La determinación del porcentaje de cada uno de estos aditivos que ha de contener la lechada, es responsabilidad de la Cía. de Servicios de Cementación, la cual proporcionará además del cemento con aditivos, el equipo de alta presión para bombear el cemento y el personal de operación. Esta compañía realiza pruebas de laboratorio a muestras de cemento que se usará en determinada operación de cementación, con el fin de obtener los parámetros necesarios relacionados sobre todo con la Reología de la lechada, para después integrarlos a programas de computadora que elabora la propia compañía y en base a los resultados que estos programas nos suministran, se establecerán las condiciones óptimas para el desarrollo de la operación. En nuestro caso particular, una vez que se le proporcionó a la compañía los datos pertinentes relacionados --

con el pozo, ésta determinó el siguiente diseño para cada una de las dos diferentes lechadas:

Primera lechada.- Esta lechada cubrirá la parte superior del estrato salino, por lo que será la primera que se bombeará. Se destinaron para la mezcla de esta lechada, 135 toneladas de cemento clase "G", que nos proporcionan un volumen de lechada de  $84 \text{ m}^3$ , utilizando para su mezclado 15 lts. de agua por cada 50 Kg. de cemento y obteniendo un rendimiento de 31 lts. de lechada. La densidad resultante de la lechada deberá ser de 2.10 gr/cc. La proporción de aditivos que integran esta lechada es la siguiente:

ADITIVO	PROPORCION
Dispersante	1.5 %
Antiespumante	0.3%
Retardador	0.3%
Reductor de pérdida de fluido	0.5 lts/50 Kg. de cemento.

Segunda lechada.- Esta lechada se destinó para cubrir la formación salina, por lo tanto, sería ésta la que se mezclaría con un buen porcentaje de sal. La cantidad de cemento necesaria para esta lechada fue de 58 toneladas, también clase "G", que suministran un volumen de lechada de  $55 \text{ m}^3$ , suficiente para cubrir el estrato salino, aún cuando en esta zona del pozo, se localizan las mayores ampliaciones del diámetro. La relación agua/cemento fue de 22.2 lts./50 Kg., resultando un rendimiento de 47.4 lts. de lechada con densidad de 2.04 gr/cc. Para esta lechada la proporción de aditivos fue la siguiente:

ADITIVO	PROPORCION
Harina Sílica	35%
Antiespumante	0.4%
Retardador	0.3%
Cloruro de Sodio	12%

El tiempo de bombeabilidad según el diseño es de 7 horas, esto significa que una vez iniciado el mezclado del cemento, disponemos de 7 horas para colocarlo en el espacio anular sin ningún problema, ya que pasando este tiempo el cemento empezará a fraguarse.

Características del fluido lavador y del fluido espaciador.- Las funciones de cada uno de estos fluidos se trató en el capítulo 3, pero haciendo referencia a los usados en esta operación, sus características sobresalientes son:

Fluido lavador CW-100. Es un fluido con baja pérdida de fluido para una eficiente remoción del lodo de perforación. Es una solución de finos surfactantes y materiales que proveen un buen control de pérdida de fluido.

El contacto del cemento con la mayoría de los lodos resulta una pasta gelatinosa. Las lechadas de cemento tienden a canalizarse por estos gruesos materiales, dejando una ristra de lodos gelatinosos detrás de la TR, lo cual perjudica a la cementación. Se usa para prevenir pastas gelatinosas, mediante un lavado circulable que va al frente de la lechada de cemento. Como el lodo removido, el lavado también deja un filtro de pasta previniendo la excesiva pérdida de agua en las zonas permeables.

El volumen usado en esta ocasión fue de  $10 \text{ m}^3$ , el cual es suficiente para efectuar un buen lavado, creando en el espacio anular una columna de lavado de 200.0 m de longitud aproximadamente.

Espaciador 1001.- Es un buen fluido espaciador base agua, pues separa y previene el entremezclado del lodo y el cemento durante las operaciones de cementación. Mejora la remoción del lodo y proporciona un control de pérdida de fluido; también reduce el daño de filtrado a la formación. Muchos fluidos de perforación son incompatibles con las lechadas de cemento y cuando se mezclan pueden formar una masa extremadamente viscosa y gelatinosa. Lo cual puede causar altas presiones de fricción, puentes o canales de cemento a través del lodo de perforación. El volumen usado de este fluido fue de  $7 \text{ m}^3$ , volumen que establece una separación entre cemento y otro fluido de 140 m en el espacio anular y de 183 m dentro de la tubería.

Régimen de flujo más recomendable para el desplazamiento de la lechada de cemento.- Entre los diferentes tipos de flujos (turbulento, laminar y tapon) viables a usar para desplazar la lechada de cemento en el espacio anular, el más recomendable es el flujo turbulento según múltiples experiencias en operaciones de cementación, ya que debido a sus características de turbulencia, logra llenar de cemento todos los huecos que pudiera existir en las paredes del agujero. Pero en muchos pozos resulta difícil establecer este tipo de flujo por varias limitaciones que se presentan, como son, incapacidad de desplazar con elevados gastos y sobre todo, imposibilidad de usar altas presiones de desplazamiento. Estas limitaciones surgen básicamente de los inadecuados equipos de bombeo con que se cuentan y a la latente tendencia de la formación a fracturarse ante un determinado incremento en la presión hidrostática.

Son precisamente estas limitaciones las que impiden desplazar con flujo turbulento en esta operación. En primer lugar tenemos que la presión de fractura sería fácilmente alcanzable con una presión aplicada en la superficie no necesariamente alta, pues no hay que olvidar que la presión debida a la densidad de lodo es, por sí sola, muy elevada. Esta situación se empeora aún más, si consideramos que durante el desplazamiento existirá dentro del pozo, una lechada de cemento de mayor densidad que la del lodo.

En cuanto al equipo de bombeo disponible para el desplazamiento, nos encontramos con que las unidades de bombeo de la Cía. Cementadora tienen el impedimento de bombear gran volumen, lo que significa que desarrollan poco gasto. Y en lo que se refiere a las bombas del equipo de perforación, su eficiencia no es muy confiable además de que no están diseñadas para levantar altas presiones.

Otra razón para no usar flujo turbulento es debido a que en determinadas zonas dentro del agujero, existen ensanchamientos de su diámetro, lo cual dificulta establecer turbulencia.

De estos tres tipos de flujos existentes, el más adecuado para usarse en esta operación es el flujo laminar; esta afirmación se basa en lo siguiente: se ha

comprobado que resulta eficiente en casos donde el intervalo a cementar una TR es grande; es recomendable en pozos donde existen formaciones incompetentes o depresionadas; y por último, se ha usado con éxito en cementaciones de Tuberías Cortas a gran profundidad.

A continuación se comprueba por medio de una pequeña fórmula bastante práctica, si efectivamente estaremos desplazando con flujo laminar, dadas las condiciones que se nos presentan. Esta fórmula calcula la velocidad del cemento en el espacio anular y establece que,

$$V_a = 0.03287 \frac{Q \times E}{(dh^2 - D_e^2)} \left[ \frac{m}{seg} \right]$$

De donde,

Q: Gasto de la bomba (lts/Emb.)

E: Número de emboladas por minuto (Emb./min.)

dh: Diámetro del agujero (pg.)

de: Diámetro exterior de la TR (pg.)

Según la velocidad anular que obtengamos a partir de esta fórmula, podremos situar el tipo de régimen de flujo que se estará usando, consultando la clasificación siguiente:

TIPO DE FLUJO	VELOCIDAD ANULAR
Flujo tapón	de 0 m/seg a 0.3048 m/seg.
Flujo laminar	de 0.3048 m/seg a 1.6 m/seg
Zona de transición	de 1.6 m/seg. a 2.46 m/seg
Flujo turbulento	de 2.46 m/seg en adelante

Para el cálculo de esta velocidad se considerará el gasto de la bomba del equipo de perforación, que es una bomba "duplex", con camisa de 16 pg (40.64cm) de carrera por 6.25 pg (15.875 cm) de diámetro y vástago de 2.5 pg (6.35 cm) de diámetro. Esta bomba nos proporciona un gasto de 29.5 litros por cada embolada con una eficiencia del 100%. Supondremos un moderado ritmo de bombeo de 60 emboladas por cada minuto. Sustituyendo los correspondientes datos en la fór-

mula anterior, tenemos,

$$V_a = (0.03287) \frac{(29.5 \text{ lts/Emb.}) (60 \text{ Emb/min})}{[(13.812 \text{ pg.})^2 - (9.625 \text{ pg.})^2]} = 0.5928 \text{ m/seg}$$

De lo anterior se comprueba que realmente estaremos desplazando bajo un régimen de flujo laminar.

Programa de circulaciones. - Este programa de circulaciones tiene por objeto - mantener el lodo en buenas condiciones a medida que se avanza en la introducción de la tubería, pues de lo contrario, al permanecer el lodo de perforación sin circular, sufre alteración de muchas de sus características que provocan - principalmente que se vuelva muy viscoso y gelatinoso; por consiguiente, una - vez estando en el fondo, se tendría que recurrir a elevadas presiones de bombeo para establecer circulación, lo que implicaría inevitablemente, alcanzar sin dificultad la presión de fractura de la formación. Por otro lado, éstas - Circulaciones también tienen la finalidad de desalojar los recortes del interior del pozo, que la tubería ha desprendido de las paredes del agujero a su paso por el interior del mismo. La circulación que se realice al final de la introducción de la tubería, deberá ser de un tiempo tal, que permita dejar - completamente limpio de recortes al lodo de perforación.

Para determinar las profundidades en donde se efectuarán las circulaciones, es necesario conocer las zonas donde se localizan los estratos consistentes, con el objeto de no inducir pérdidas de fluido, para lo cual se consultan los registros geofísicos de exploración.

Una vez determinadas las profundidades de circulación, se calculan los tiempos de cada una de estas etapas. Cada uno de estos tiempos, será el que se necesite para circular un volumen de lodo igual al existente en el espacio anular en ese momento, con un cierto ritmo de bombeo.

Debido a que los tiempos invertidos en las etapas de circulación están englobados en el tiempo total de introducción de la tubería, se determinó que dichas etapas fueran las mínimas posibles, al igual que los tiempos de circulación, -

también los mínimos necesarios. Por tal motivo, el programa de circulaciones fue el siguiente:

	PROFUNDIDAD	TIEMPO	RITMO DE BOMBEO
1a. Etapa de Circulación:	3025.0 m	95 min	50 Emb./min
2a. Etapa de Circulación:	3650.0 m	130 min	50 Emb./min
3a. Etapa de Circulación:	4200.0 m	160 min	50 Emb./min

Estos tiempos se calcularon con un gasto de la bomba de 29.5 lts/Emb., suponiendo una eficiencia de bombeo del 100%.

Presión máxima a manejar durante la operación de cementación.- Una de las mayores preocupaciones del responsable de la operación de cementación durante el desarrollo de ésta, es sin duda la posibilidad de crear un gran esfuerzo de tensión que pudiera fatigar demasiado a la tubería, al grado de desprenderla. Esta situación suele presentarse durante el desplazamiento de la lechada de cemento, pues es en esta etapa donde se llegan a levantar altas presiones, sobre todo al finalizar el desplazamiento.

Para el caso específico de la cementación de Tuberías Cortas, existe otro riesgo aparte del ya señalado anteriormente, el cual se podría derivar de una alta presión instantánea, provocando así mismo, una enorme tensión que repercutiría primordialmente en la resistencia del colgador y por consiguiente, producir un deslizamiento de sus coñas.

Existe una medida preventiva para este tipo de problemas, la cual consiste en el conocimiento previo de la presión máxima permitida que podremos usar durante el desplazamiento de la lechada de cemento. Para el caso particular que me ocupa, la presión máxima se calcula de la manera siguiente:

La fórmula práctica que nos determinará la presión máxima, establece que,

Resist. a la tensión de la Junta de la IR - Esfuerzo de tensión

Se toma en cuenta la resistencia de la junta por tener menor resistencia que el cuerpo de la tubería. El esfuerzo de tensión al cual se refiere la fórmula, es el peso de la Tubería Corta dentro del cemento constituido por dos densidades (2.04 gr/cc y 2.10 gr/cc), considerando desde luego, que la totalidad del cemento haya sido colocado en el espacio anular. Este peso así calculado resultó ser de 115,898 Kg. El área interior de la tubería ya fue calculada anteriormente. Por lo tanto sólo resta sustituir datos en la fórmula,

$$P \text{ máx.} = \frac{908,181.81 \text{ Kg.} / 1.8 - 115,898 \text{ Kg.}}{381.828 \text{ cm}^2} = 1017.86 \text{ Kg/cm}^2$$

Ahora bien, considerando la resistencia del colgador a la tensión, tenemos:

$$P \text{ máx.} = \frac{\text{Resistencia a la Tensión del Colgador} - \text{Esfuerzo de Tensión}}{\text{Área Interior de la TR}}$$

Sustituyendo datos,

$$P \text{ máx.} = \frac{180,000 \text{ Kg.} - 115,898 \text{ Kg.}}{381.828 \text{ cm}^2} = 167.88 \text{ Kg/cm}^2$$

De lo anterior se deduce que, es la Resistencia a la tensión de los colgadores la que nos limita el uso de presiones superiores a 168 Kg/cm<sup>2</sup>, por lo que se deberá tener cuidado de no rebasar esta presión y menos aún de una manera súbita.

Desarrollo de la operación.- Una vez que los tramos de la Tubería Corta estuvieron perfectamente revisados, medidos, pintados y ordenados en los soportes, se procedió a revisar y medir los accesorios, así como las herramientas auxiliares que integrarían la Tubería Corta. También se tuvo especial cuidado de que otros dispositivos necesarios en la introducción de la tubería, estuvieran completos y en buen estado, tales como, elevadores, collarines de arrastre, "arañas" de la capacidad adecuada, llaves de apriete, calibradores, grasa especial para tuberías de revestimiento, entre otros.

Uno de los aspectos que se trató de mejorar en esta operación y que contribuyó de alguna manera en la infructuosa introducción de la columna de TR, fue -



lo relativo al factor humano, para lo cual se seleccionó al personal mejor capacitado en este tipo de operaciones.

Debido a que durante el tiempo que se invirtió en la planeación y preparación de la cementación de la Tubería Corta, continuaron presentándose las restricciones del diámetro del agujero, se determinó incrementar la densidad del lodo hasta 2.08 gr/cc, pretendiendo con esto, evitar una situación similar a la que impidió la introducción de la columna de TR.

Luego de que el lodo estuvo totalmente homogeneizado, además de comprobar que el agujero permanecía libre de restricciones, se procedió a sacar la tubería de perforación de 5 pg. (12.7 cm), seleccionando de ésta, la tubería más nueva y ordenándola correctamente, conforme se utilizaría en la introducción de la Tubería Corta.

Posteriormente se procedió a cambiar los arietes de 5 pg (12.7 cm) de los preventores, por arietes de 9 5/8 pg. (24.44 cm) de diámetro, los cuales permanecerían instalados mientras se introducía la tubería de 9 5/8 pg. En el momento de continuar la introducción con tubería de perforación, se cambiarían nuevamente los arietes de 9 5/8 pg. por los de diámetro de 5 pg.

La conexión de los accesorios (zapata, cople canasta y cople de retención) se efectuaron sin ningún problema; quedando separados por dos tramos de tubería la zapata y el cople de retención. Debido a que estos accesorios tienen juntas de rosca redonda de 8 hilos por pulgada, fue conveniente que los dos primeros tramos también tuvieran juntas del mismo tipo, con el fin de evitar el continuo uso de combinaciones de un tipo a otro de rosca. Los siguientes tramos a partir del tercero tuvieron junta de rosca cuadrada (Buttress), por lo que fue necesario colocar una combinación con piñón de 8 hilos por pulgada (rosca redonda) y caja con rosca cuadrada (Buttress), entre el cople de retención y el tercer tramo.

Se continuaron conectando los siguientes tramos de la Tubería Corta con un apriete promedio de 1800 Kg-m.

Dado que la Tubería Corta se equipó con zapata flotadora, fue necesario llenar con lodo la tubería cada 150.0 m aproximadamente.

El tiempo promedio de introducción de la Tubería Corta dentro de la IR superficial de 13 3/8 pg. (33.97 cm) fue de 57 segundos por tramo.

Una vez introducidos los tramos restantes de tubería según establecía el programa, se continuó con la conexión de las herramientas auxiliares, para lo cual hubo necesidad de colocar otra combinación con piñón de rosca cuadrada y caja con cuerda redonda de 8 hilos por pulgada, entre la tubería y tales herramientas.

La conexión de cada una de estas herramientas auxiliares se realizó con mucho cuidado; evitando por ejemplo, de no colocar las llaves de apriete en el sitio donde se encuentra la camisa deslizante del colgador hidráulico, ya que de lo contrario se le podría provocar un leve colapso que dificultaría o evitaría el funcionamiento definitivamente estando el colgador dentro del pozo.

Después de concluida la conexión de estas herramientas se continuó con la Primera etapa de circulación, estando la zapata a 2256.0 m, por espacio de 60 minutos con un ritmo de bombeo de 40 emboladas por minuto. El hecho de que la primera etapa de circulación se realizara antes de lo indicado por el programa de circulaciones, se debió básicamente a una decisión tomada a última hora, la cual reducía las etapas de circulación a sólo dos, esto es, a la profundidad de 2256.0 m y en el fondo (4200.0 m). La razón de haber optado por este cambio de programa, fue la de evitar todo tipo de interrupciones durante la introducción de la tubería de 2256.0 m hasta el fondo, la cual se continuaría con tubería de perforación.

Previo al inicio de la introducción de la Tubería Corta con tubería de perforación, se cambiaron los arietes de los preventores de 9 5/8 pg. por unos de 5 pg. La introducción, a partir de este momento, se llevó a cabo con una velocidad promedio de introducción de 3.3 minutos por cada triple de tubería de perforación. En cuanto al llenado de la tubería de perforación, se efectuó cada 280.0 m aproximadamente.

Una vez que la Tubería Corta llegó al fondo del pozo, se continuó con la segunda etapa de circulación, con duración de 45 minutos únicamente, a un ritmo de bombeo de 60 emboladas por minuto. Este corto lapso de circulación se debió a una pequeña falla del equipo de bombeo, lo cual determinó que se suspendiera la circulación, pretendiendo con esto al mismo tiempo, no fatigar demasiado a las bombas del lodo con el fin de obtener de ellas, un eficiente bombeo en el momento preciso del desplazamiento de la lechada de cemento.

Es usual aprovechar el tiempo que se emplea en la última etapa de circulación, en calcular con exactitud el peso de la Tubería Corta, junto con el peso de la tubería de perforación y corroborar estos pesos con lo que marca el indicador de peso, pues será de mucha utilidad en el momento de verificar tanto el anclaje de la Tubería Corta, así como si ésta se ha soltado de la tubería de perforación. Otro de los cálculos que se realizan aprovechando este tiempo, es el volumen y tiempo de desplazamiento de la lechada de cemento hasta elople de retención. A continuación se presentan cada uno de éstos cálculos:

#### Cálculo del peso de la Tubería Corta ( $W_1$ )

$W_1 = \text{Longitud de la Tubería Corta} \times \text{Peso unitario} \times \text{Factor de flotación.}$

$$W_1 = 2250.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times \left( 1 - \frac{2.09 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}} \right) = 115\ 881.57 \text{ Kg}$$

#### Cálculo del peso de la tubería de perforación ( $W_2$ )

$W_2 = \text{Longitud de la tubería de perforación} \times \text{Peso unitario} \times \text{Factor de flotación.}$

$$W_2 = 1945.00 \text{ m} \times 29.072 \text{ Kg/m} \times 0.735 = 41\ 560.604 \text{ Kg}$$

El peso total será,

$$W_{\text{tot.}} = 115\ 881.57 \text{ Kg} + 41\ 560.604 \text{ Kg} = 157\ 442.17 \text{ Kg}$$

El indicador de peso marcó un peso aproximado de 167 toneladas. Las 10 toneladas de diferencia que existen con el peso total calculado...

indicador de peso incluye el peso de la polea viajera y del gancho.

Cálculo del volumen de desplazamiento.- Para operaciones de cementación de Tuberías Cortas es de utilidad efectuar el cálculo de dos volúmenes de desplazamiento, los cuales nos representan dos etapas muy importantes en el desplazamiento de la lechada de cemento; primero calculamos el volumen de lodo necesario para desalojar la lechada de la tubería de perforación; volumen que una vez bombeado nos indicará el acoplamiento de los tapones. En segundo lugar calculamos el volumen de lodo que servirá para desplazar la lechada del interior de la Tubería Corta hasta el cople de retención, con el cual ha bremsado finalizado completamente el desplazamiento. Los volúmenes a que se hace referencia son:

Volumen de desplazamiento en la tubería de perforación ( $V_1$ )

$V_1 = \text{Longitud de tubería de perforación} \times \text{Capacidad de la tubería de perforación.}$

$$V_1 = 1950.83 \text{ m.} \times (4.276 \text{ pg})^2 \times 0.5065 = 18\ 066.51 \text{ lts}$$

$$\underline{V_1 = 18.066 \text{ m}^3}$$

Volumen de desplazamiento en la Tubería Corta ( $V_2$ )

$V_2 = \text{Longitud de la Tubería Corta} \times \text{Capacidad de la Tubería Corta}$

$$V_2 = 2223.0 \text{ m} \times 38.169 \text{ lts/m} = 84\ 849.68 \text{ lts}$$

$$\underline{V_2 = 84.849 \text{ m}^3}$$

Por lo tanto el volumen total de desplazamiento será:

$$V \text{ TOT.} = 18.066 \text{ m}^3 + 84.849 \text{ m}^3 = 102.915 \text{ m}^3 \approx 103 \text{ m}^3$$

Para el cálculo de estos volúmenes, se consideró la longitud de la herramienta soltadora en el primer volumen y para el segundo volumen, la longitud de -

la Tubería Corta se consideró hasta el cople de retención.

Cálculo del tiempo de desplazamiento.- Para esta ocasión en que el volumen de desplazamiento es grande, se recomienda utilizar la bomba del equipo de perforación. Esta bomba es de tipo Duplex con características anteriormente mencionadas y que nos proporciona un gasto de 29.5 lts/Emb. suponiendo una eficiencia del 100%. Si suponemos además, un ritmo de bombeo de 60 Emb./min, los tiempos de desplazamiento serán:

Tiempo de desplazamiento para el primer volumen ( $t_1$ )

$$t_1 = \frac{\text{Volumen de desplazamiento en la tubería de perforación}}{\text{Gasto de la bomba} \times \text{Ritmo de bombeo}}$$

$$t_1 = \frac{18,066.51 \text{ lts}}{29.5 \frac{\text{lts}}{\text{Emb.}} \times 60 \frac{\text{Emb.}}{\text{min}}} = 10.20 \text{ min.}$$

Esto significa que el tiempo en que registraremos el acoplamiento de los tapones, a partir de que se inició el desplazamiento, será de 10 minutos y 12 segundos aproximadamente.

Tiempo de desplazamiento para el segundo volumen ( $t_2$ )

$$t_2 = \frac{\text{volumen de desplazamiento en la Tubería Corta}}{\text{Gasto de la bomba} \times \text{Ritmo de bombeo}}$$

$$t_2 = \frac{84,849.68 \text{ lts.}}{29.5 \text{ lts/Emb} \times 60 \text{ Emb/min}} = 47.93 \text{ min.}$$

Lo cual quiere decir que necesitamos de 47 minutos y 55 segundos, para desplazar la lechada de cemento del interior de la Tubería Corta hasta el cople de retención. Por consiguiente, el tiempo total de desplazamiento será:

$$T \text{ tot.} = 10.20 \text{ min} + 47.93 \text{ min} = 58.13 \text{ min}$$

$$\underline{T \text{ tot.} = 58' 8''}$$

Una vez concluida la última etapa de circulación, se efectuó el anclaje de la Tubería Corta estando la zapata a unos 80 cm aproximadamente arriba del fondo. Para efectuar este anclaje, se introdujo una canica por el interior de la tubería de perforación; se circuló a un ritmo de bombeo bajo (30 Emb./min.) y con una presión de circulación de  $40 \text{ Kg/cm}^2$ . En el momento que la canica llegó al cople de retención, se notó un incremento de presión de circulación de  $20 \text{ Kg/cm}^2$ ; se siguió aplicando presión hasta alcanzar una presión de  $70 \text{ Kg/cm}^2$ , en donde se notó un abatimiento repentino de la presión hasta  $40 \text{ Kg/cm}^2$ , logrando al mismo tiempo, establecer circulación nuevamente. Lo anterior nos indicaba que las camisas deslizables de los colgadores estaban en disposición de correrse, al igual que las cuñas podían en ese momento alojarse sobre los conos de los colgadores. Para conseguir que estas cuñas se afianzaran correctamente en el interior de la TR superficial, se bajó la Tubería Corta unos 15 centímetros aproximadamente, observando al mismo tiempo en el indicador de peso, una pérdida de peso de 10 toneladas.

Como siguiente paso se procedió a soltar la Tubería Corta. Primero, se levantó esta tubería nuevamente, recuperando los 15 cm que se habían bajado, tratando con esto de que el indicador de peso marcara el peso total que inicialmente tenía, o sea, 167 toneladas; posteriormente se le aplicaron a la tubería de perforación 15 vueltas a la derecha y se levantó ésta lentamente aproximadamente 60 centímetros, notando que el indicador de peso marcaba alrededor de 52 toneladas, o sea, únicamente el peso de la tubería de perforación junto con el peso de la poleaviera y el gancho; esto nos indicaba que la Tubería Corta estaba suelta y sostenida por los colgadores. Una vez comprobado lo anterior, se bajó nuevamente la tubería de perforación una distancia aproximada de 70 centímetros, en el momento que el indicador de peso marcaba un peso de 46 toneladas; esto significaba que parte del peso de la tubería (6 toneladas), estaban sostenidas por la Tubería Corta, específicamente por la cuerda "ACME". Esto se hizo con el fin de proveer un apoyo a los sellos Molyglass, que ayudarían a evitar que la lechada de cemento se regresara durante la cementación. Por otra parte, con la anterior medida se conseguía también que el extremo inferior de la herramienta soltadora, estuviera lo más cerca posible del sustituto retén del tapón inferior, para tratar de lograr un correcto acoplamiento de tapones.

Posteriormente se colocó la cabeza de cementación, la cual fue revisada previamente, sobre todo, respecto al funcionamiento del volante que accionaría el pasador que permitiría el paso del tapón superior, así como las válvulas que desviarían el flujo según fuese conveniente. También, antes de conectarla a la tubería de perforación, se le introdujo el tapón superior, el cual permanecería sostenido por el pasador mientras se bombeaba la lechada de cemento. Previo al inicio de la cementación, se verificó una vez más la existencia adecuada del volumen de agua, que para esta operación según el diseño, se requería de un volumen total de  $66.25 \text{ m}^3$ .

La operación de cementación se realizó de la manera siguiente:

- 1o. Se probó con presión de  $350 \text{ Kg/cm}^2$ , todas las conexiones superficiales - que unen la cabeza de cementación con la unidad cementadora.
- 2o. Se bombeó un volumen de  $10 \text{ m}^3$  de fluido lavador (CW-100).
- 3o. Se bombeó un volumen de  $7 \text{ m}^3$  de fluido espaciador (D-1001)
- 4o. Se mezcló y bombeó la primera lechada de cemento, siendo imposible alcanzar la densidad programada de  $2.10 \text{ gr/cc}$ , pues la densidad osciló entre  $1.70 \text{ gr/cc}$  y  $1.80 \text{ gr/cc}$ . Lo cual derivó lógicamente un mayor consumo de agua, al grado de agotar el volumen que se tenía destinado para esa lechada, o sea  $41 \text{ m}^3$ ; consecuentemente sólo se utilizaron 61 toneladas de cemento - de un total de 135 toneladas que se tenían programadas.  
Antes de continuar con el mezclado y bombeo de la segunda lechada de cemento, fue necesario lavar y limpiar el equipo de mezclado, así como de bombeo de la unidad cementadora.
- 5o. Se mezcló y bombeó la segunda lechada de cemento, consiguiendo tan sólo - una densidad de  $2.00 \text{ gr/cc}$ , o sea,  $0.04 \text{ gr/cc}$  menos que la que se tenía - programada; pero en cambio se logró bombear la totalidad de las 58 toneladas de cemento.
- 6o. Inmediatamente después se sacó el pasador de la cabeza de cementación, para permitir el paso del tapón de desplazamiento superior.
- 7o. Se desplazó la lechada de cemento con un volumen de 648 barriles ( $103 \text{ m}^3$ ) de lodo de perforación, con una presión de circulación de  $140 \text{ Kg/cm}^2$ , no - tando un incremento de presión de  $20 \text{ Kg/cm}^2$  al llevar bombeado un volumen de lodo de 114 barriles ( $18.12 \text{ m}^3$ ); indicándonos con esto el acoplamiento

de los tapones. Al terminar de desplazar los 648 barriles ( $103 \text{ m}^3$ ) de lodo se incrementó la presión de circulación hasta  $210 \text{ Kg/cm}^2$ .

8o Se procedió a desalojar esta presión de  $210 \text{ Kg/cm}^2$  hasta que los manómetros estuvieron en cero. Se observó inmediatamente después, un pequeño flujo de lodo por el espacio anular.

9o. Se levantó la tubería de perforación junto con la herramienta soltadora a una profundidad de 1671.0 m, es decir, 274.73 m arriba del extremo superior de la tubería Corta, por considerar que a esta profundidad no había llegado cemento.

10o Se circuló en forma inversa a esta profundidad, desalojando los fluidos lavador y espaciador, así como lodo contaminado de baja densidad ( $1.95 \text{ gr/cc}$ )

Debido a que continuaba el flujo de lodo, tanto por el interior de la tubería de perforación como por el espacio anular, se determinó cerrar por ambas partes el pozo con una presión de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ . Conforme transcurrió el tiempo se notó un incremento lento de esta presión, lo que obligó a desfogar continuamente el pozo.

El tiempo total de espera de fraguado fue de 70 horas, tiempo durante el cual se notó que el pozo no manifestaba ningún flujo, por lo que se procedió a sacar la tubería de perforación junto con la herramienta soltadora.

Después de concluida la operación de cementación se efectuaron las actividades siguientes:

Se introdujo al pozo una barrena de 12 1/4 pg (31.11cm) de diámetro hasta el extremo superior de la tubería Corta, sin encontrar vestigios de cemento. A esta profundidad se efectuó una prueba de presión con  $70 \text{ Kg/cm}^2$ , manteniéndose ésta durante 15 minutos, lo cual demostraba que efectivamente el cemento había logrado sellar la zona del traslape. Posteriormente a la prueba, se circuló el lodo lo suficiente para acondicionarlo a una densidad de  $2.05 \text{ gr/cc}$ .

Utilizando una barrena de 8 1/2 pg. (21.59 cm) de diámetro se introdujo nuevamente la sarta de perforación, hasta tocar la tubería Corta, penetrando en ella para moler los sellos Moliglass y poder llegar así hasta el cople de retención, en



donde se circuló un tiempo suficiente para homogeneizar el lodo a una densidad de 2.04 gr/cc.

Después se levantó la sarta de perforación hasta la profundidad de 1957.0 m, aún dentro de la tubería Corta y se bombeó un volumen de agua de 5.5 m<sup>3</sup> entre pequeños volúmenes de diesel, tratando de que el volumen de agua quedara colocado frente al extremo superior de la tubería Corta. Con estas condiciones se probó nuevamente con presión de 70 Kg/cm<sup>2</sup> durante 30 min., sin observar abatimiento de presión. Se desalojaron del pozo el agua y el diesel, para después sacar la sarta de perforación.

La siguiente operación consistió en efectuar un Registro Sónico de Cemento, para lo cual fue necesario limpiar el interior de la tubería Corta de residuos de cemento o de otro material que pudiera obstruir la operación del equipo de registro. Para realizar esta limpieza se introdujo la sarta de perforación equipada con barrena de 8 1/2 pg (21.59 cm) de diámetro, escariador para tubería de revestimiento de 9 5/8 pg (24.44 cm) y una canasta colectadora de 6 1/2 pg (16.51 cm) hasta el cople de retención.

De aquí en adelante los trabajos que prosiguieron fueron conforme al programa que se tenía inicialmente, esto es de prolongar la tubería Corta hasta la superficie, operación que se desarrolla en el punto siguiente.

#### 6.4 PROLONGACION DE LA TUBERIA CORTA A LA SUPERFICIE

Para cumplir con el programa de este pozo, referente a la tubería de Revestimiento Intermedia, era necesario prolongar la tubería Corta hasta la superficie, operación relativamente más sencilla comparada con la cementación de la tubería Corta. Esto significa que el operar en un pozo entubado, esto es, totalmente controlado, facilita enormemente el trabajo de cementación del Complemento de la tubería Corta.

Aún cuando las condiciones de seguridad son muy favorables, es conveniente efectuar algunas modificaciones al fluido de perforación, así como una revisión analítica de esfuerzos y resistencias de la tubería que se utilizará en

el Complemento. A continuación se exponen los aspectos más importantes relacionados con la cementación del Complemento, como son, las actividades previas a la introducción del Complemento, la revisión analítica del diseño de la tubería de Complemento, el arreglo de la sarta del Complemento, consideraciones y cálculos inherentes a la cementación y por último, el desarrollo de la operación.

Actividades previas a la introducción del Complemento de la tubería Corta.-Una de estas actividades es la de disminuir la densidad del lodo de perforación, con el propósito de utilizar tubería de menor resistencia y grado de acero de no muy alta calidad en el Complemento, con el consiguiente ahorro en el costo de la tubería. Aunque para este caso particular, la disminución de la densidad del lodo a un valor de 2.04 gr/cc, no fue con el fin de economizar en tubería, si en cambio, tuvo la finalidad de disminuir el esfuerzo de colapso para la tubería que se usaría para el Complemento, consecuentemente se lograba también reducir las pérdidas de presión por fricción y a su vez, se conseguía un mejor y rápido desplazamiento de lodo en el espacio anular.

Otra de las actividades importantes que se realizan antes de introducir el Complemento, es conformar el extremo superior de la tubería Corta, o lo que es lo mismo, la parte superior de la extensión de la camisa C-2, así como el interior de la misma, con el fin de facilitar la introducción y el ensamble de la tubería de Complemento. Esta conformación se logró con la ayuda de un molino diseñado especialmente para este tipo de operaciones. El molino que se usó en esta operación fue de un diámetro de 9 63/64 pg (25.36 cm). Ver fig. 6.3 (a)

Revisión analítica de esfuerzos y resistencias de la tubería de Complemento.-Así como la tubería Corta, ésta revisión se hará en base a la tubería que se tiene disponible en la localización misma del pozo, la cual se compone, de tubería de grado V-150, peso unitario 70 Kg/m (47 lb./pie) junta con rosca cuadrada (Buttress) y de tubería de grado P-110, mismo peso unitario con junta de rosca redonda de 8 hilos por pulgada. Esta revisión también se basará en las mismas longitudes que para cada una de ellas establecía el programa inicial cuando se intentó cementarla en una sola columna, esto es, 1060.0m de grado V-150 y 890.0 m de grado P-110.

Siguiendo un procedimiento similar al usado en la revisión analítica de la Tubería Corta, a continuación se presenta la revisión para el Complemento.

**CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA DE COMPLEMENTO DE 95/8 pg.**

	DIAMETRO EXTERIOR	PESO UNITARIO	DIAMETRO INTERIOR	TIPO DE JUNTA	RESISTENCIA A LA PRESION DE COLAPSO	RESISTENCIA A LA PRESION INTERNA	RESISTENCIA A LA TENSION	RESISTENCIA DE LA JUNTA A LA TENSION	RESISTENCIA MINIMA A LA CEDENCIA
GRADO V-150	9.625 PG	47 LBS/PIE	8.681 PG	B C N BUTTRESS	6128 LBS/PG <sup>2</sup>	14711 LBS/PG <sup>2</sup>	2025000 LBS	1998000 LBS	150000 LBS/PG <sup>2</sup>
	24.447 CM	10.072 KG/M	22.049 CM	RDSFP CUADRO	431.549 KG/CM <sup>2</sup>	1035.98 KG/CM <sup>2</sup>	920454.54 KG	908181.81 KG	10563.38 KG/CM <sup>2</sup>
GRADO P-110	9.625 PG	47 LBS/PIE	8.681 PG	8 HILOS PDR PG	5310 LBS/PG <sup>2</sup>	9440 LBS/PG <sup>2</sup>	1493000 LBS	1213000 LBS	110000 LBS/PG <sup>2</sup>
	24.447 CM	10.072 KG/M	22.049 CM	ROSCA REDONDA	373.943 KG/CM <sup>2</sup>	664.788 KG/CM <sup>2</sup>	678636.36 KG	551363.63 KG	7746.47 KG/CM <sup>2</sup>

ESFUERZOS A QUE SERA SOMETIDO EL COMPLEMENTO DENTRO DEL POZO.

Presión máxima de colapso durante la introducción.-

$$P_{\text{máx. } C_1} = \frac{\text{Prof. (m)} \times \text{Densidad de lodo (gr/cc)}}{10} = \frac{1945.0\text{m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} = 396.78 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\text{máx. } C_1} = 396.78 \text{ Kg/cm}^2$$

Esta presión de colapso estará actuando sobre la tubería de V-150, pues será ésta la que se encuentre en el fondo. Ahora bien, la presión de colapso que actuará sobre la tubería P-110 será:

$$P_{\text{col}} = \frac{890.0 \text{ m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} = 181.56 \text{ Kg/cm}^2$$

Tensión máxima durante la introducción.-

$T_{\text{máx.}_1}$  = Longitud total del Complemento (m) x Peso unitario (Kg/m) x Factor de flotación.

$$T_{\text{máx.}_1} = 1945.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times \left(1 - \frac{2.04 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}}\right) = 100854.62 \text{ Kg}$$

$$\underline{T_{\text{máx.}_1} = 100\ 854.62 \text{ Kg}}$$

Esta tensión la estará soportando la tubería de grado P-110. La tensión que resistirá la tubería de grado V-150 será:

$T_{(V-150)_1}$  = Longitud tubería V-150 (m) x Peso unitario (Kg/m) x Factor de flotación

$$T_{(V-150)_1} = 1055.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times 0.74 = 54705.21 \text{ Kg.}$$

En esta etapa de la introducción del Complemento, la mayor presión interna que se aplica es de 70 Kg/cm<sup>2</sup> y ésta ocurre durante la prueba de ensamble del complemento con la Tubería Corta.

Presión máxima de colapso durante la cementación.- Para calcular esta presión se considerarán dos densidades diferentes, correspondientes a dos tipos de lechadas que se utilizarán para la cementación del Complemento. Así tenemos que los primeros 300.0 metros a partir de extremo superior de la Tubería Corta serán cubiertos por una lechada de 2.10 gr/cc y los restantes 1645.0 metros (1200.0 m de cemento y 445.0 m de lodo) estarán cubiertos para una densidad de 2.04 gr/cc. Por consiguiente la presión de colapso máxima será:

$$P_{\text{máx. } C_2} = \frac{300.0 \text{ m} \times 2.10 \text{ gr/cc} + 1645.0 \text{ m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} = 398.58 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\text{máx. } C_2} = 398.58 \text{ Kg/cm}^2$$

Esta presión de colapso estará actuando sobre la tubería V-150 inmediatamente después de concluido el desplazamiento de la lechada de cemento. En cuanto a la presión de colapso que estará actuando sobre la tubería de grado P-110, será la misma que se calculó para la etapa de la introducción, o sea, 181.56 Kg/cm<sup>2</sup>, ya que para esa zona no cambió el valor de la densidad.

Tensión máxima durante la cementación.- Para conocer esta tensión se consideran el efecto de las dos densidades existentes dentro del pozo, así como el esfuerzo de tensión derivado de la presión máxima que se alcance durante la cementación, la cual difícilmente será mayor de 210 Kg/cm<sup>2</sup>, pero para efectos de cálculos se usará esta presión.

T máx.<sub>2</sub> = Peso de 300m de tubería en densidad de 2.10 gr/cc + Peso de 1645.0 m de tubería en densidad de 2.04 gr/cc + Tensión derivada de la Presión máxima de circulación.

$$T \text{ máx.}_2 = 300.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times \left(1 - \frac{2.10 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}}\right) + 1645.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times \left(1 - \frac{2.04 \text{ gr/cc}}{7.85 \text{ gr/cc}}\right) + 210 \text{ Kg/cm}^2 \times 381.828 \text{ cm}^2 = 15\ 387.81 \text{ Kg} + 85\ 298.64 \text{ Kg} + 80\ 183.88 \text{ Kg}$$

$$\underline{T \text{ máx.}_2 = 180,870.33 \text{ Kg}}$$

Tensión que resistirá totalmente la tubería de grado P-110. La de grado V-150 estará también resistiendo determinada tensión producto de su propio peso y la provocada por la presión final. Esta tensión resultante se manifestará con mayor intensidad a la profundidad de 890.0 m, ya que a esta profundidad es donde se encuentra el primer tramo de tubería V-150.

$$T(V-150)_2 = 300.0 \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times 0.732 + (1055.0-300.0) \text{ m} \times 70.072 \text{ Kg/m} \times 0.74 + 80\ 183.88 \text{ Kg.}$$

$$T(V-150)_2 = 15\ 387.81 \text{ Kg.} + 39\ 149.22 \text{ Kg} + 80\ 183.88 \text{ Kg} = 134\ 720.91 \text{ Kg.}$$

$$\underline{T(V-150)_2 = 134\ 720.91 \text{ Kg}}$$

La presión interna máxima que actuará sobre el Complemento durante toda la operación se presentará al finalizar el desplazamiento del cemento, la cual difícilmente sobrepasará los  $210 \text{ Kg/cm}^2$ .

REVISIÓN DE RESISTENCIAS DE LA TUBERÍA DE COMPLEMENTO AFECTADOS POR  
FACTORES DE SEGURIDAD Y ESFUERZOS A QUE SE SOMETERA DENTRO DEL  
P O Z O

Revisión al colapso en la etapa de introducción.- En primer lugar se realiza esta revisión para la tubería de grado V-150 únicamente, pues será ésta la que llegue hasta la profundidad de 1945.0m, en donde tenemos una presión de colapso de  $396.78 \text{ Kg/cm}^2$ . Si la resistencia a la presión de colapso afectada por el factor de seguridad es de  $383.599 \text{ Kg/cm}^2$ , vemos que el esfuerzo de colapso es mayor que la resistencia, o sea  $396.78 \text{ Kg/cm}^2 > 383.599 \text{ Kg/cm}^2$ . Podemos saber, a partir de la resistencia de colapso, la profundidad a la que esta tubería deja de sufrir la presión de colapso mayor que su resistencia de la manera siguiente:

$$\text{Prof.} = \frac{\text{Resistencia al Colapso} \times 10}{\text{Densidad del lodo}} = \frac{383.599 \text{ Kg/cm}^2 \times 10}{2.04 \text{ gr/cc}} = 1880.38 \text{ m.}$$

Significa esto, que los primeros 64.62 m de tubería V-150 que quedarán en el fondo tendrían más posibilidad de colapsarse.

En segundo lugar existe otro caso donde es necesario revisar al colapso la tubería de complemento, esto es, a la profundidad donde ocurre el cambio de grado de la tubería y que es a 890.0 m. En este caso ambas tuberías (P-110 y V-150) deberán ser revisadas al colapso pero afectadas en su resistencia por esfuerzos de tensión. Para lo cual se sigue el procedimiento siguiente:

Para la tubería de grado V-150.

1o. Como ya se obtuvo anteriormente, el área de la sección transversal de esta tubería es,

$$A_t = 87.570 \text{ cm}^2$$

2o. El cociente entre la carga de tensión y At, será:

$$ET = \frac{54.705.21 \text{ Kg}}{87.57 \text{ cm}^2} = 624.702 \text{ Kg/cm}^2$$

3o. El porcentaje de este Esfuerzo de Tensión (ET) con respecto a la Resistencia Mínima a la Cedencia es:

$$P = \frac{624.702 \text{ Kg/cm}^2}{10.563.38 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 5.91 \%$$

4o. Del Monograma de la fig. (6.1) obtenemos un porcentaje de 96.3%

5o. Multiplicamos la Resistencia al Colapso de esta tubería por el porcentaje anterior y obtenemos la Resistencia Efectiva al Colapso corregida por tensión, que será:

$$REC_1 = 383.599 \text{ Kg/cm}^2 \times 0.963 = 369.405 \text{ Kg/cm}^2$$

Si a 890.0 m de profundidad tenemos una presión de colapso de 181.56 Kg/cm<sup>2</sup>, se deduce que esta tubería V-150 resistirá satisfactoriamente a esa presión, ya que su resistencia al colapso afectada por tensión es 187.845 Kg/cm<sup>2</sup> mayor que la presión de colapso.

Para la tubería de grado P-110

1o. At = 87.570 cm<sup>2</sup>

2o. ET = 624.702 Kg/cm<sup>2</sup>

3o. P =  $\frac{624.702 \text{ Kg/cm}^2}{7746.47 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 8.06 \%$

4o. Del Monograma obtenemos un porcentaje de 95.0 %

5o. Por lo tanto, la Resistencia Efectiva al Colapso será:

$$REC_2 = \frac{373.943 \text{ Kg/cm}^2}{1.125} \times 0.950 = 315.774 \text{ Kg/cm}^2$$

De lo anterior se deduce que también esta tubería resiste al colapso a esa profundidad, pues su Resistencia al Colapso afectada por tensión es 134.214 Kg/cm<sup>2</sup> mayor que la presión de colapso.

Revisión a la tensión en la etapa de introducción.-

Para la tubería de grado P-110. Esta tubería será la que resista el peso total de la tubería de Complemento, o sea, 100 854.62 Kg; por otra parte la Resistencia a la Tensión de esta tubería es:

$$RT_1 = \frac{678\ 636.36\ \text{Kg}}{1.8} = 377\ 020.2\ \text{Kg. esto es, con respecto al cuerpo del tubo.}$$

En cuanto a la Resistencia de la junta tenemos:

$$RT_2 = \frac{551\ 363.63\ \text{Kg}}{1.8} = 306\ 313.12\ \text{Kg}$$

Se ve claramente que la tubería de grado P-110, tiene una Resistencia a la Tensión mucho mayor que el esfuerzo de tensión que está soportando, o sea, - - -  
 $RT_1 > T_{\text{máx.}_1}$  y  $RT_2 > T_{\text{máx.}_1}$

Para la tubería de grado V-150. La tensión que soportará esta tubería será de 54 705.21 Kg y su Resistencia a la Tensión es:

$$RT_3 = \frac{920\ 454.54\ \text{Kg}}{1.8} = 511\ 363.63\ \text{Kg. (Resist. del cuerpo del tubo)}$$

$$RT_4 = \frac{908\ 181.81\ \text{Kg.}}{1.8} = 504\ 545.45\ \text{Kg (Resist. de la junta)}$$

También para esta tubería sucede que la Resistencia a la Tensión, es mucho mayor que la Tensión originada por el peso de 1055.0 m de tubería V-150, o lo que es lo mismo,  $RT_3 > T(V-150)_1$  y  $RT_4 > T(V-150)_1$ .

Revisión a la Presión Interna en la etapa de introducción.- Como se mencionó anteriormente, en esta etapa de la introducción no se registran presiones internas altas que pudieran afectar la resistencia del Complemento, específicamente de la tubería de grado P-110, por ser ésta la que llega hasta la superficie y - en donde generalmente ocurren las explosiones de las tuberías.

La resistencia de esta tubería a la presión interna es:



$$RPI = \frac{664.788 \text{ Kg/cm}^2}{1.25} = 531.830 \text{ Kg/cm}^2$$

Revisión al Colapso en la etapa de cementación.- En este caso, como ya se mencionó anteriormente, la situación más crítica ocurre inmediatamente que se concluye el desplazamiento, en la que tendremos una presión de colapso actuando sobre la tubería V-150 de 398.58 Kg/cm<sup>2</sup> que comparada con la resistencia al colapso de esta tubería (383.599 Kg/cm<sup>2</sup>) resulta ser mayor que ésta, por lo que existe la tendencia a colapsarse dicha tubería. A continuación se obtiene la profundidad a la que esta tubería resiste sin ningún problema al colapso de acuerdo a su resistencia:

$$RC = 383.599 \text{ Kg/cm}^2 = \frac{1645.0 \text{ m} \times 2.04 \text{ gr/cc}}{10} + \frac{(\text{Prof.} - 1645) \text{ m} \times 2.10 \text{ gr/cc}}{10}$$

$$\text{Prof.} = \frac{383.599 \text{ Kg/cm}^2 - 335.58 \text{ Kg/cm}^2}{0.210 \text{ gr/cc}} + 1645.0 \text{ m} = 1873.66 \text{ m}$$

Lo cual quiere decir que los primeros 71.34 metros inferiores de la tubería V-150, serán los más viables a sufrir deformaciones por esfuerzos de colapso.

Al igual que en la etapa de introducción, también en esta etapa de cementación, se realiza la revisión al colapso a la profundidad de 890.0 m; lo que varía en este caso, es el valor de la carga de tensión que afectará la resistencia al colapso de la tubería, tanto la de grado V-150 como la de grado P-110. Siguiendo el mismo procedimiento anteriormente utilizado, tenemos:

Para la tubería de grado V-150.

1o.  $A_t = 87.570 \text{ cm}^2$

2o. El cociente entre la carga de tensión (TV-150) y  $A_t$ , será:

$$ET = \frac{134\,720.91 \text{ Kg}}{87.570 \text{ cm}^2} = 1538.436 \text{ Kg/cm}^2$$

3o. El porcentaje de este Esfuerzo de tensión(EI) con respecto a la Resistencia Mínima a la Cedencia es:

$$P = \frac{1538.436 \text{ Kg/cm}^2}{10563.38 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 14.56 \%$$

4o. Con este valor obtenemos del Monograma de la fig. (6.1) un porcentaje de 91.5 %

5o. Por consiguiente la Resistencia Efectiva al Colapso corregida por tensión será ,

$$REC_3 = 383.599 \text{ Kg/cm}^2 \times 0.915 = 350.993 \text{ Kg/cm}^2$$

Resistencia que comparada con la presión de colapso existente a 890.0 m, que es de 181.56 Kg/cm<sup>2</sup>, resulta notoriamente mayor que ésta, por lo tanto es lejana la posibilidad de que ocurra un colapso.

Para la tubería de grado P-110.

1o. At = 87.570 cm<sup>2</sup>

2o. ET = 1538.436 Kg/cm<sup>2</sup>

3o. P =  $\frac{1538.436 \text{ Kg/cm}^2}{7746.47 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 19.85 \%$

4o. Del Monograma obtenemos un porcentaje de 88.2 %

5o. La Resistencia Efectiva al Colapso corregida por tensión será:

$$REC_4 = \frac{373.943 \text{ Kg/cm}^2}{1.125} \times 0.882 = 293.171 \text{ Kg/cm}^2$$

Por lo tanto, también esta tubería tiene una Resistencia al Colapso mayor que la presión de colapso, esto es, 293.171 Kg/cm<sup>2</sup> > 181.56 Kg/cm<sup>2</sup>.

Revisión por Tensión durante la cementación.- En páginas anteriores se calculó el esfuerzo máximo de tensión (1 máx.2), el cual, como ya se anotó anteriormente, se manifestará en el instante mismo de alcanzar la presión máxima

durante la operación de cementación y que generalmente ocurre cuando se ha finalizado el desplazamiento de la lechada de cemento, esto es, con la presión final de circulación, la cual se ha supuesto en esta ocasión de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ . Esta Tensión máxima así obtenida, resultó ser de  $180\ 870.33 \text{ Kg}$ . Si comparamos esta tensión con la resistencia a la tensión de la tubería de grado P-110, que es de  $377,020.2 \text{ Kg}$  para el cuerpo del tubo y de  $306,313.12 \text{ Kg}$  para la junta, se deduce que dicha tubería resistirá sin problemas la tensión impuesta por el peso de toda la tubería de Complemento, así como la producida por la presión final de circulación.

En lo que respecta a la tubería de grado V-150, también resistirá sin problemas los esfuerzos de tensión, pues su resistencia es de  $511\ 363.63 \text{ Kg}$  para el cuerpo del tubo y de  $504\ 545.45 \text{ Kg}$  para la junta, las cuales son mucho mayores que el esfuerzo de tensión que existirá a la profundidad de  $890.0 \text{ m}$  y que es de  $134\ 720.91 \text{ Kg}$ .

Revisión por Presión Interna durante la cementación.- Como se ha venido anotando, la presión interna máxima que se podría alcanzar durante la cementación, sería de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ ; la cual no afectará grandemente sobre la Resistencia a la Presión Interior de la tubería de grado P-110, pues ésta es de  $531.830 \text{ Kg/cm}^2$ .

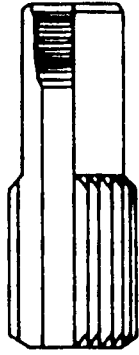
Como una conclusión de la revisión analítica del diseño de la tubería de Complemento que se acaba de hacer, se advierte que esta tubería presenta una región con posibilidades de sufrir deformación por colapso, la cual comprende los primeros 6 tramos de tubería de grado V-150 (considerando una longitud promedio de 12 metros por tramo). Si razonamos en el caso de la tubería Corta, tubería que según la revisión de su diseño, tendía a colapsarse en toda su longitud, vemos que las condiciones de operación para la Tubería de Complemento se nos presentan mucho más favorables que en esa ocasión, por lo que no hay objeción en utilizarla. Referente a los esfuerzos de tensión y presión interna, ya se comprobó que no existe problema en cuanto a Resistencia de la Tubería de Complemento.

Descripción del arreglo de la sarta del Complemento de la Tubería Corta.- Para la cementación del Complemento únicamente se utilizaron una Herramienta - Ensambladora, un cople de orificio, centradores y un tapón de desplazamiento.

LA HERRAMIENTA ENSAMBLADORA (Tie-Back), la cual se muestra en la figura 6.3(b), tiene su extremo inferior de forma roma, cuya finalidad es la de servir de guía para que el Complemento penetre sin dificultad dentro de la Tubería Corta; además, en este mismo extremo, posee un orificio el cual permitirá que haya circulación a través de él. Aproximadamente a 1/3 de su longitud, a partir de su extremo inferior, se encuentran tres orificios más, los cuales facilitan la circulación de la lechada de cemento estando la herramienta ensambladora parcialmente dentro de la Tubería Corta, para que así, una vez concluido el desplazamiento de la lechada de cemento, no sea difícil el ensamble entre estas tuberías. Esta herramienta contiene, en su parte exterior, tres conjuntos de sellos distribuidos equidistamente uno de otro y que poseen un diámetro ligeramente mayor que el diámetro exterior de la herramienta ensambladora, con el fin de proveer un sello efectivo entre esta herramienta y la camisa C-2 (extremo superior de la Tubería Corta).

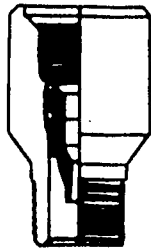
Inmediatamente arriba de la herramienta ensambladora va colocado un tramo de tubería y después de éste se conecta el COPLC DE ORIFICIO, fig.(6.3 (c), el cual cumple básicamente la función de un cople de retención, pero además regula, a través de un orificio de aproximadamente 2.5 cm de diámetro, la entrada de lodo dentro de la tubería en el momento de su introducción, logrando así dos objetivos importantes, que la tubería flote parcialmente al principio de su introducción y evitar las pérdidas de tiempo al suspender periódicamente la introducción para llenar de lodo la tubería cada cierto número de tramos introducidos.

Esta Tubería de Complemento también se equipó con CENTRADORES, los que, además de las ventajas ya conocidas que nos proporcionan para lograr una buena cementación, su efecto centrante facilita la introducción del Complemento dentro de la Tubería Corta. Para esta operación se utilizaron 20 centradores, de los cuales 6 se distribuyeron en los 3 primeros tramos, 4 de ellos se colocaron cada tercer tramo a partir del tercero y los 10 restantes fueron



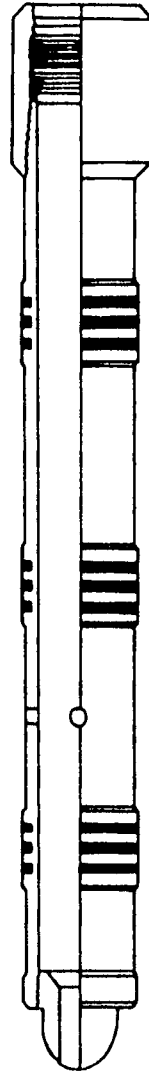
( a )

MOLINO PARA CONFORMAR  
LA CAMISA C - 2



( c )

COPLER DE  
ORIFICIO



( b )

HERRAMIENTA ENSAMBLADORA

FIG. 6.3 HERRAMIENTAS Y ACCESORIOS NECESARIOS PARA  
CEMENTAR EL COMPLEMENTO

colocados cada 5 tramos.

En la operación de cementación se utilizó un TAPON DE DESPLAZAMIENTO únicamente, el cual permaneció en la cabeza de cementación, hasta que se inició el desplazamiento de la lechada de cemento por el fluido de perforación.

Cementación de la tubería de Complemento.- A continuación se presentan las consideraciones y cálculos relacionados con la cementación del Complemento.

Cálculo del volumen de lechada a utilizar.- Este volumen comprende el necesario para llenar una longitud de 1500.0 m de espacio anular, que hay entre la IR superficial de 13 3/8 pg (33.97 cm) y la tubería de Complemento de 9 5/8 pg (24.44 cm), así como el volumen que hay en el primer tramo de tubería incluyendo la herramienta ensambladora.

$V1 = \text{Longitud del espacio anular por cementar} \times \text{Capacidad anular entre tuberías.}$

$$V1 = 1500.0 \text{ m} \times \left[ (12.415 \text{ pg})^2 - (9.625 \text{ pg})^2 \right] \times 0.5065 = 46\,718.24 \text{ lts.}$$

$$\underline{V1 = 46.718 \text{ m}^3}$$

$V2 = (\text{Longitud del ensamble y el primer tramo}) \times \text{Capacidad interior de la tubería}$

$$V2 = (2.00 \text{ m} + 12.00 \text{ m}) \times (8.681 \text{ pg})^2 \times 0.5065 = 534.37 \text{ lts.}$$

$$\underline{V2 = 0.534 \text{ m}^3}$$

Por consiguiente, el volumen necesario de lechada de cemento será,

$$Vn = 46.718 \text{ m}^3 + 0.534 \text{ m}^3 = 47.252 \text{ m}^3$$

Aumentamos el 20% de exceso a este volumen para tener un volumen total de lechada de,

$$Vt = (47.252 \text{ m}^3 \times 0.20) + 47.252 \text{ m}^3 = 56.702 \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{volumen total de lechada de cemento} = \underline{56.7 \text{ m}^3}$$

Características de la lechada de cemento.- Se programaron dos tipos de lechadas de cemento, cada una con densidad diferente, una de 2.04 gr/cc y otra de 2.10 gr/cc. Esta última se destinó a cubrir los primeros 300.0 metros del fondo, con la finalidad de asegurar una adecuada adherencia en la región cercana al punto de ensamble de las tuberías, ya que, por representar éste un punto de discontinuidad del revestimiento, deberá quedar fuertemente apoyado en su exterior. Por otra parte, al usar esta densidad de la lechada en un intervalo pequeño, conseguimos disminuir el esfuerzo de colapso, además de facilitar su bombeo.

El hecho de que la cementación se realice en un pozo completamente entubado, permite que la composición de la lechada de cemento requiera un mínimo de aditivos; como en este caso, se necesitó de un retardador de fraguado, el cual permitirá un adecuado manejo del cemento hasta que éste haya sido colocado en el espacio anular. Así, para lograr un óptimo mezclado del cemento, se requirió de dispersantes y de antiespumantes. A continuación se describen las características de cada una de las dos lechadas.

Primera lechada.- Será la que se bombeará primero, por lo que habrá de alojarse aproximadamente arriba de los 1650.0 m de profundidad. Se requirieron para esta lechada, 50 toneladas de cemento clase "G", proporcionando un volumen de 47 m<sup>3</sup> de lechada; utilizando para su mezclado una relación de agua-cemento de 22 litros por cada 50 kg de cemento, obteniendo así un rendimiento de 47 litros por la misma cantidad de cemento. La densidad resultante será de 2.04 gr/cc. La proporción de aditivos fue la siguiente:

ADITIVO	PROPORCION
Retardador	0.3 %
Antiespumante	0.3 %
Dispersante	1.5 %

Segunda lechada.- Destinada a cubrir el intervalo de 1950.0 m a 1650.0 m. La cantidad requerida para esta lechada fue de 15 toneladas de cemento clase "G", que al mezclarla con una relación de agua-cemento de 15 litros por cada 50 kg de cemento, nos da un volumen de lechada de 9.3 m<sup>3</sup>, esto es, un rendimiento de

31 litros por cada 50 kg de cemento, obteniendo así una densidad de 2.10 gr/cc. Los aditivos y sus porcentajes fueron los siguientes:

ADITIVO	PROPORCIÓN
Retardador	0.5 %
Dispersante	1.0 %

Fluido Espaciador. - Para esta etapa únicamente es necesario el fluido espaciador, cuya función básica es la de separar la lechada de cemento del lodo de perforación. En esta operación no se usó el fluido lavador debido a que el pozo se encuentra totalmente entubado. Aún cuando existe cierta película de lodo adherida a la tubería, este mismo fluido espaciador puede en un momento dado, desempeñar funciones lavadoras al remover esta película de lodo. El volumen usado en esta ocasión fue de  $4 \text{ m}^3$ , con el cual se consigue una separación entre lodo y cemento de 105 metros, dentro de la tubería y de 128 metros en el espacio anular entre tuberías.

Régimen de Flujo para el desplazamiento.- Las condiciones existentes en este pozo, nos inclinan hacia el uso de flujo laminar para el desplazamiento de la lechada de cemento, por considerar que el uso de flujo turbulento no es ya muy necesario para esta operación, además de que su uso representa muchas inconveniencias que anteriormente ya fueron señaladas.

Cálculo de la presión máxima y de la presión diferencial.- Como anteriormente se señaló, la presión máxima ocurre por lo general al final del desplazamiento de la lechada de cemento; indicando con esto que el tapón de desplazamiento ha llegado al cople de orificio; su conocimiento es importante debido a que nos previene de producir un esfuerzo de tensión repentino, el cual podría provocar un desprendimiento de la tubería.

Por otro lado, la presión diferencial es producto de la diferencia de densidades existentes en el espacio anular con respecto a las existentes dentro del complemento. Esta presión se manifiesta con mayor intensidad una vez concluido el desplazamiento de la lechada de cemento al espacio anular. Debido a que la densidad de la lechada es casi siempre mayor que la del lodo, se establece



una diferencial de presión, la cual actuará principalmente sobre los sellos de la herramienta ensambladora. Si por alguna causa estos sellos llegaran a dañarse, la presión diferencial induciría un flujo del espacio anular hacia el interior de la tubería, o sea, una regresión de la lechada de cemento. Lo anterior se controlaría cerrando el pozo con cierta presión mientras el cemento fraguase completamente, pero para saber el valor de la presión con la que el pozo se cerraría, es necesario conocer la presión diferencial.

Presión Máxima.-

$$P_{MAX.} = \frac{(Resistencia \ a \ la \ tensión \ de \ la \ tubería \ P-110) - (Peso \ del \ Complemento \ en \ cemento \ y \ lodo)}{Área \ interior \ de \ la \ Sección \ Transversal \ de \ la \ tubería}$$

$$P_{MAX.} = \frac{377\ 020.2 \ Kg - 100\ 686.45 \ Kg}{381.828 \ cm^2} = 723.71 \ kg/cm^2$$

Lo anterior significa que existe un margen muy amplio en cuanto a presión máxima a usar, esto es con respecto a la resistencia del cuerpo de la tubería; ahora bien, en cuanto a la resistencia de la junta, la presión máxima que nos permite usar será,

$$P_{MAX.} = \frac{306\ 313.12 \ Kg - 100\ 686.45 \ Kg}{381.838 \ cm^2} = 538.51 \ kg/cm^2$$

Presión Diferencial.-

$$P_{DIF} = \frac{(Densidad \ de \ la \ lechada \ de \ 2.10 \ gr/cc - Dens. \ del \ lodo) \times (Tirante \ de \ cemento \ de \ 2.10 \ gr/cc)}{10}$$

$$P_{DIF} = \frac{(2.10 \ gr/cc - 2.04 \ gr/cc) \times (300.0 \ m - 14.0 \ m)}{10} = 1.71 \ kg/cm^2$$

Desarrollo de la operación.- Una vez efectuados los trabajos previos a la introducción de la tubería de Complemento, como son, verificar perfectamente la profundidad del extremo superior de la tubería Corta, mantener el lodo de perforación en buenas condiciones y sobre todo, que los tramos de la tubería a introducir estuvieran ordenados conforme el programa de introducción, se estu

vo en disposición de iniciar la operación de introducción y cementación del Complemento según el procedimiento siguiente.

- 1o. Se conformó la camisa C-2 de la Tubería Corta utilizando un molino de - - 9 63/64 pg. (25.36 cm) de diámetro.
- 2o. Se efectuó el cambio de arietes de los preventores de 5"pg (12.7 cm) por los de 9 5/8 pg (24.44 cm) de diámetro.
- 3o. En seguida se conectó la herramienta ensambladora al primer tramo de tubería de grado V-150 y arriba de éste, se enroscó el cople de orificio - seguido por una combinación (piñón 8 hilos rosca redonda-caja rosca cuadrada). Se continuó conectando tubería de grado V-150 de rosca cuadrada, hasta completar una longitud aproximada de 1055.0 m. A partir de esta - longitud se cambió a tubería de grado P-110 hasta llegar a la superficie, esto es 890.0 m de esta tubería. La conexión de todos los tramos de la Tubería de complemento se efectuó con un par de apriete promedio de 1800 Kg-m.
- 4o. Pocoantes de llegar a la Tubería Corta, se tuvo la precaución de que la - longitud del último tramo de tubería que se conectó, nos permitiera reali-  
zar sin dificultad lo siguiente: instalación de las conexiones superfi-  
ciales incluyendo la cabeza de cementación; libre movimiento vertical en los momentos en que se efectúe la prueba de ensamble y durante la cementación; también la longitud de este último tramo deberá permitir, en una operación posterior a la cementación, un correcto anclaje del Complemento dentro del cabezal de 13 3/8 pg(33.97 cm), esto implica que la sección del último - tramo, o bien puede ser el penúltimo tramo, que quede frente al "nido" de este cabezal, una vez concluida la cementación, no deberá ser un cople, - pues de lo contrario, será prácticamente imposible colocar las cuñas que sujetarán la Tubería de Complemento dentro del cabezal.
- 5o. Se procedió a la instalación de las conexiones superficiales empezando por conectar la cabeza de cementación, a través de la cual se circuló durante 90 minutos, tiempo suficiente para que el lodo realizara un circuito com-

pleto de circulación, consiguiendo así su total acondicionamiento. Esta etapa de circulación da oportunidad de detectar y reparar, alguna posible fuga en las conexiones superficiales que pudiera interferir durante el desplazamiento de la lechada de cemento. Así mismo se aprovecha este tiempo para verificar los cálculos del peso del Complemento dentro del lodo, del volumen y tiempo de desplazamiento.

- 5.1) Se observó en el indicador de peso una lectura de 110 toneladas. Esta lectura corresponde al peso del Complemento (110,854.62 tons.) y al peso de la polea viajera junto con el gancho (10 tons.)
- 5.2) Volumen de desplazamiento.- Este cálculo es sumamente sencillo y representa la capacidad de la Tubería de Complemento a partir de la superficie hasta donde se localiza el cople de orificio.

$$V_{DESP.} = 1930.0 \text{ m} \times (8.681 \text{ pg})^2 \times 0.5065 = 73\ 667.55 \text{ lts.}$$
$$\underline{\text{Volumen de desplazamiento} = 73.66 \text{ m}^3}$$

- 5.3) Tiempo de desplazamiento.- Se usará la bomba del equipo para el desplazamiento de la lechada de cemento, cuyo gasto es de 29.5 lts/Emb. con una eficiencia del 100%, aunque en esta ocasión el cálculo del tiempo de desplazamiento se hará considerando una eficiencia del 90%. Así el gasto de la bomba será, GB = 29.5 lts/Emb. x 0.90 = 26.55 lts/Emb. se considera un ritmo de bombeo de 60 Emb./min.

$$t_{DESP.} = \frac{\text{volumen de desplazamiento}}{\text{Gasto de la bomba} \times \text{Ritmo de bombeo}}$$

$$t_{DESP.} = \frac{73\ 667.55 \text{ lts}}{26.55 \text{ lts/Emb.} \times 60 \text{ Emb./min}} = 46.24 \text{ min}$$

$$\underline{\text{Tiempo de desplazamiento} = 46'14"}$$

60. Una vez realizado lo anterior, se procedió a efectuar la prueba de ensamble entre ambas tuberías según el procedimiento siguiente:
  - 6.1) Se anotó el peso del Complemento que marcaba el indicador de peso, esto es, 110 toneladas.
  - 6.2) Se bajó lentamente el Complemento hasta tocar la Tubería Corta, ob-

servando ésto en el indicador de peso por una ligera pérdida de peso del Complemento. En ese momento se marcó la tubería.

6.3) Se continuó bajando el complemento hasta notar una pérdida de peso de aproximadamente 8 toneladas, se suspende la introducción y se fija la tubería; se circuló a través de la tubería con un ritmo de bombeo de 30 Emb./min. tratando de no levantar mucha presión. Dado que se estableció circulación entre las tuberías, implicaba esto que aún no se producía el ensamble entre ellas, por lo que se suspendió el bombeo y se continuó introduciendo la tubería hasta notar una pérdida de peso de 12 toneladas, en donde nuevamente se trató de circular sin conseguirlo, lo cual indicaban que estaban ensambladas ambas tuberías; se mantuvo una presión de  $70 \text{ Kg/cm}^2$  con la bomba durante 5 minutos, sin notar abatimiento en la presión.

6.4) Se anotó el peso del Complemento en el momento del ensamble (98 toneladas). Así mismo se procedió a poner una segunda marca sobre la tubería. La distancia entre las dos marcas que se hicieron sobre la tubería fue de 1.60 m (la extensión de la camisa C-2 mide 1.80 m y la herramienta ensambladora mide 2.00 m); se supuso que el Complemento penetró una longitud de 1.60 m dentro de la Tubería Corta.

6.5) Como siguiente paso levantamos lentamente el Complemento una distancia de 80 cm, o sea, aún dentro de la camisa C-2. En esta posición se logró establecer circulación sin problemas, indicando con esto la terminación de la prueba de ensamble. A partir de este momento se estuvo en condiciones de efectuar la cementación.

7o. La cementación se realizó de la manera siguiente:

7.1) Se colocó el tapón de desplazamiento dentro de la cabeza de cementación, verificando al mismo tiempo el buen funcionamiento de las válvulas, así como la correcta posición del testigo.

7.2) Se efectuó la prueba a presión de las conexiones superficiales comprendidas entre la cabeza de cementación y la unidad cementadora. La

presión de prueba fue de 300 Kg/cm<sup>2</sup>

- 7.3) Se bombeó un volumen de 4 m<sup>3</sup> de fluido espaciador (E-1001)
- 7.4) Se mezclaron y bombearon las 50 toneladas de cemento de la primera lechada logrando la densidad programada de 2.04 gr/cc.
- 7.5) Se mezclaron y bombearon las restantes 15 toneladas de cemento de la segunda lechada, alcanzando también la densidad programada de 2.10 gr/cc.
- 7.6) Inmediatamente después se conectó la manguera del lodo a la cabeza de cementación, se sacó el pasador de la misma dejando libre el paso al tapón y se inició el desplazamiento con la bomba del equipo.
- 7.7) Se desplazó la lechada de cemento con un volumen de 73.6 m<sup>3</sup> de fluido de perforación; la presión promedio de circulación fue de 100 Kg/cm<sup>2</sup> con un ritmo de bombeo de 60 Emb/min. La presión final de desplazamiento alcanzada fue de 140 Kg/cm<sup>2</sup>.
- 7.8) Una vez que concluyó el desplazamiento y manteniendo aún la presión de 140 Kg/cm<sup>2</sup>, se bajó el Complemento aproximadamente 85 cm, o sea 5 cm más de los que se habían levantado anteriormente; y, dejando un peso de 15 toneladas sobre la tubería Corta, es decir, 3 toneladas mayor que con el que se realizó la prueba de ensamble, se desfogó la presión final hasta que el manómetro indicó "cero". Dado que el pozo no manifestó flujo alguno, se dió por finalizada la operación de cementación.

Después de un tiempo razonable que se le dió al cemento para que fraguara, se procedió al anclaje de la tubería de Complemento en el cabezal de 13 3/8"pg (33.97 cm). Luego se continuó con la instalación del equipo de control superficial; se probó este a presión y posteriormente se introdujo una barrena de 8 1/2"pg (21.59 cm) de diámetro hasta el cople de orificio, donde se probó con presión de 100 Kg/cm<sup>2</sup> durante 30 minutos, sin observar abatimiento de presión. Una vez hecho lo anterior, se procedió a perforar el cople de orificio y el cemento que había bajo de éste, probándose nuevamente frente a la región del ensamble con la misma presión y obteniendo los mismos resultados satisfactorios.

## 7. RESULTADOS

Haciendo referencia básicamente a la cementación de la Tubería Corta, a continuación se anotan los resultados más significativos.

Respecto a la introducción de la Tubería Corta, el tiempo que se empleó en introducirla hasta el fondo (4200.0m) fue de 40 horas. Hecho que significó un logro importante comparado con el fallido intento de introducirla en una sola columna, en donde se invirtió un tiempo de 50 horas en introducirla solamente a la profundidad de 2942.0m. Una de las razones que contribuyeron a disminuir considerablemente el tiempo de introducción, independientemente de que se haya utilizado tubería de perforación para ello, fue el hecho de usar tiempos reducidos de introducción por cada tramo; los tiempos de introducción promedios empleados fueron de 57 segundos por tramo dentro de la TR y de 80 segundos por tramo en agujero descubierto. Desde luego, el haber invertido poco tiempo en las dos etapas de circulación, así como la utilización de personal con mayor capacidad para este tipo de operaciones, influyeron de manera importante en el tiempo de introducción.

Fue durante la preparación de la primera lechada donde los resultados se tornaron desfavorables, siendo la causa principal la incapacidad del equipo de cementación al no alcanzar la densidad programada de 2.10 gr/cc, pues ésta osciló entre 1.70 gr/cc y 1.80 gr/cc. Desde luego esto trajo como consecuencia que se terminara el volumen de agua que se tenía destinado ( $41 \text{ m}^3$ ) para el mezclado de esta lechada, por consiguiente sólo se utilizaron 61 toneladas de cemento de un total de 135 toneladas programadas; aún cuando se hicieron cambios de unidad de cementación y del tamaño de sus toberas, no se logró obtener una densidad adecuada. Esta situación desesperante dio como resultado un consumo mayor de tiempo (2 horas y 47 minutos) del que normalmente es empleado. Tomando en cuenta que este tiempo invertido en preparar la primera lechada representa el 40% del tiempo bombeable (7 horas) según establecía el diseño, se decidió continuar con la operación de bombear la segunda lechada, pero antes fue ne-

cesario emplear otros 48 minutos en lavar el equipo.

Referente al mezclado y bombeo de la segunda lechada, los resultados estuvieron dentro de lo normal, ya que se bombeó el volumen total de cemento, obteniéndose una densidad promedio de 2.00 gr/cc, en un tiempo de 1 hora y 48 minutos. El tiempo de desplazamiento (79 min.) resultó ser un poco mayor del calculado (58 min.) debido a que hubo ocasiones en que se disminuyó el ritmo de bombeo, sobre todo para verificar el acoplamiento de los tapones, así como para evitar una presión súbita en el momento de llegar ambos tapones al cople de retención.

El tiempo total de operación empleado, partiendo desde la mezcla del cemento hasta que se terminó el desplazamiento, fue de 7 horas y 10 minutos.

El volumen total resultante de lechada, de acuerdo al volumen de agua y cemento utilizado, fue de  $118.27 \text{ m}^3$ , el cual, comparado con el volumen calculado para cubrir todo el espacio anular ( $111 \text{ m}^3$ ), resulta ser ligeramente mayor.

Una vez que se concluyó el desplazamiento de la lechada de cemento, se observó un flujo continuo de lodo por el espacio anular, por lo que se decidió levantar la tubería de perforación junto con la herramienta soltadora a la profundidad de 1671.0 m y en donde se circuló en forma inversa para limpiar el posible exceso de cemento. Con esta circulación se desalojaron los fluidos lavador y espaciador, así como lodo contaminado. De acuerdo con este comportamiento del pozo, se consideró que el flujo de lodo se derivó de la baja densidad de la primera lechada.

Así también, el hecho de no haber encontrado cemento arriba del extremo superior de la Tubería Corta, se debió a que no se bombeó el total del cemento y posiblemente a un ensanchamiento del diámetro del agujero.

Las pruebas de presión efectuadas posteriormente en el extremo superior de la Tubería Corta, para verificar el total aislamiento entre la zona del traslape y la formación, resultaron exitosas, no así la adherencia del cemento en el espacio anular que nos reveló el Registro Sónico de Cementación, cuyas lectu-

ras obtenidas fueron:

INTERVALO (m)	ADHERENCIA
4170.0 - 4123.0	75%
4123.0 - 3990.0	40%
3990.0 - 3861.0	68%
3861.0 - 3670.0	35%
3670.0 - 1950.0	Cemento canalizado

En cuanto a la operación de la cementación del Complemento de la Tubería Corta, ésta se llevó a cabo sin contratiempos y obteniendo resultados aceptables.



## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El notable ahorro de tiempo logrado en la introducción de la Tubería Corta hasta el fondo, que fue el objetivo primordial fijado a raíz del problema - que impidió que la columna de TR intermedia llegara hasta el fondo, establece otra aplicación más atribuible a la técnica de la cementación de Tuberías Cortas. Por tal razón, en futuros problemas similares al que se presentó en este Pozo, la cementación de una Tubería Corta ha de ser considerada como una solución que ofrece resultados positivos.

El hecho de disminuir las etapas y los tiempos de circulación, durante y al final de la introducción, así como el adoptar tiempos reducidos de introducción por tramo, se debió principalmente al persistente propósito de introducir la Tubería Corta en el menor tiempo posible. Aún cuando el haber tomado estas medidas aparentemente no causó problemas de consideración, sobre todo para la cementación, no es aconsejable su aplicación en futuras operaciones de este tipo, pues en la mayoría de las ocasiones es origen de las cementaciones defectuosas.

También desempeñó un papel muy importante en la introducción de la Tubería Corta el factor humano. Dado que las operaciones de cementación de tuberías no es una actividad tan cotidiana, comparada con otras operaciones que se realizan continuamente en la etapa de perforación de un pozo, es necesario contar con el personal de mayor experiencia en este tipo de operaciones para evitar en cuanto sea posible cualquier error y así mismo garantizar una operación eficaz.

Durante el proceso de la cementación, la imposibilidad de alcanzar la densidad programada para la primera lechada, trajo como consecuencia que el cemento no llegara hasta la parte superior de la Tubería Corta según se tenía programado, además tuvo como resultado que el pozo se manifestara provocando un flujo continuo después de la cementación, lo cual era de esperarse, ya que la columna

de cemento de baja densidad (promedio de 1.75 gr/cc) disminuyó notablemente la presión necesaria para controlar el pozo.

Lo señalado anteriormente es una de las razones decisivas por la que un diseño de cementación elaborado en el laboratorio, sea materialmente imposible reproducirlo en el campo. En la gran mayoría de los casos, una cementación deficiente es producto de situaciones imprevistas en el campo, que hacen que un diseño de cementación elaborado previamente con condiciones simuladas en un laboratorio, no pueda llevarse a cabo, derivando resultados negativos como en esta ocasión.

Sin duda existen muchas medidas para contrarrestar este tipo de situaciones perjudiciales, siendo de las más viables, por ejemplo; que los diseños que habrán de elaborarse en los laboratorios deberán estar apoyados en una información bastante amplia de las características litológicas del agujero, así como incluirán todas las condiciones adversas más probables a presentarse en el momento de su aplicación. Por otra parte, las Compañías Cementadoras, que son las responsables directas de estos diseños incluyendo su ejecución, tomarán en cuenta la capacidad de sus equipos de cementación que han de participar en la realización de un determinado trabajo de cementación, conforme lo exija el diseño, pues de lo contrario resulta infructuoso el trabajo de laboratorio.

Aún cuando las pruebas de presión efectuadas a la Tubería Corta para comprobar la eficiencia de la cementación resultaron convincentes, el estado de la cementación se considera en términos generales deficiente, según el Registro Sónico de Cementación, pues el mayor porcentaje de adherencia logrado fue de 75% en un intervalo tan sólo de 75 metros aproximadamente, próximos éstos a la zapata de la Tubería Corta, así como 3/4 partes del espacio anular entre agujero y tubería Corta incluyendo el traslape entre tuberías presentaron canalización del cemento. Esto sin duda es producto del flujo laminar usado en el desplazamiento, el cual debió acentuarse seguramente en zonas donde el agujero se ensanchaba. Se comprueba una vez más que el optar por un flujo laminar para desplazar la lechada de cemento en el espacio anular, trae consigo un gran riesgo de obtener cementaciones defectuosas. Desde luego que muchas veces el uso del flujo laminar está sujeto a diversas limitaciones, tanto por

características de la formación como por el equipo disponible para la operación, en tales circunstancias se deberá recurrir a otros medios que contribuyan a corregir las deficiencias del flujo laminar en el momento mismo del desplazamiento. De entre los medios que se disponen para este respecto y que han demostrado mejorar las cementaciones en diversas operaciones, tenemos los medios mecánicos como por ejemplo, los centradores con álabes que son diseñados con el propósito de crear turbulencia; también existen medios químicos, que son aditivos que se agregan al cemento, como son los reductores de fricción, que tienen la propiedad de disminuir la viscosidad aparente de la lechada de cemento, lo cual significa que esta entrará en turbulencia a un régimen de flujo menor que el que se requiere sin ese aditivo.

Después de realizar un examen global de la cementación tanto de la tubería Corta como del Complemento, cuyo objetivo conjunto fue el de aislar las lutitas hidratables junto con el gran estrato salino que se estaba atravesando, así como lograr un mejor control del pozo en la superficie, es razonable pensar que fue una operación aceptable, si consideramos que fueron varios los factores adversos con que se operaron; por ejemplo, el hecho de ser un pozo exploratorio en una área donde no se había profundizado más allá de los 3000.0 metros, planteaba una serie de dudas acerca del comportamiento del pozo tanto en la etapa de la introducción como en el momento mismo de la cementación. También fue un factor adverso, el usar tubería de menor resistencia de la que se requería dadas las condiciones del pozo, situación que podrá enmendarse en futuras operaciones si se adquiere con mucha anticipación tubería de mayor resistencia, que en la actualidad ya existe en el mercado y que se está utilizando en otros lugares del mundo. Así mismo, las dimensiones de la tubería Corta representaba un riesgo grande sobre todo en la etapa de su introducción. Se encuentran también dentro de estos factores adversos, la imposibilidad de utilizar un régimen de flujo turbulento para desplazar la lechada de cemento y desde luego, los sucesos inesperados que casi siempre están presentes en las operaciones de cementación.

Lo trascendente después de todo, estriba en que esta tubería ha permitido continuar con la perforación de este pozo y sobre todo, que representa una posibilidad más de solución a problemas similares al que aquí se presentó.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Task Group on Running and cementing liners: "Running and Cementing Liners in the Delaware Basin, Texas". Boletín 017, API, primera edición ( Diciembre 1974 )
2. G. Warren Ostroot y L. Greg Carter: "Cementación de tuberías Cortas en pozos profundos". Halliburton Services.
3. Subdirección de Capacitación, IMP: "Operación y mantenimiento para cementaciones, acidificaciones y fracturamiento de pozos" (1980)
4. Halliburton Services: "Cementación Halliburton de pozos petroleros". Revista Petróleo Internacional ( Julio de 1980 )
5. John F. Greenip Jr.: "Secciones tubulares aíslan presiones hoyo abajo". Hydril Co. Revista Petróleo Internacional ( Julio de 1979 )
6. Subdirección de Capacitación, IMP: "Estudio de técnicas para cementaciones primarias". (1969)
7. Pedro Méndez Chavez y José Alberto Cervantes Hernández: "Perforación de un estrato salino en el campo Villa Allende, Distrito de Cd. Pemex". (1978)
8. Brown Oil Tools, Inc. Catálogo 1979 - 1980.
9. Mc Cray, A. W. y Cole F.W.: "Tecnología de la perforación de pozos petroleros". 3a. Edición (1970)
10. Archivos del Depto. de Ing. de Pozos y Desarrollo de Campos, Cd. - Pemex, Tab .

- - - - -