

27  
207



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y ASENTAMIENTO DE TUBERIAS DE  
REVESTIMIENTO EN POZOS PETROLEROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

IGNACIO MARTINEZ TAPIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1989



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

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

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

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

## I N D I C E

I.	INTRODUCCION	1
II.	DIFERENTES TIPOS Y OBJETIVOS DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	3
	1. Generalidades	3
	2. Tubo Conductor	3
	3. Tubería de revestimiento superficial	4
	4. Tubería de revestimiento intermedio	5
	5. Tubería de revestimiento de explotación	6
	6. Tuberías cortas y sartas de enlace	6
III.	DIFERENTES PESOS Y GRADOS	9
	1. Generalidades	9
	2. Pesos y rangos	10
	3. Requerimientos de diámetro interior y exterior	10
	4. Grados de acero	12
	5. Conexiones	14
IV.	FACTORES DE SEGURIDAD QUE INTERVIENEN	16
V.	CONSIDERACIONES DE CARGA	19
	1. Carga por presión externa	19
	2. Carga por presión interna	21

	Págs.
3. Carga longitudinal	22
4. Procedimientos de diseño	23
A) Método Analítico	24
B) Método Gráfico	30
C) Diseño Práctico	35
D) Carga máxima	42
5. Ejemplo	51
6. Nomenclatura	83
 VI. CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO	 89
1. Patas de Perro y Pozos Desviados	89
2. Colapso en formaciones plásticas	93
3. Fragilización por ácido sulfhídrico	95
 VII. DIVERSOS METODOS PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	 97
1. Generalidades	97
2. Antes de la perforación	98
3. Durante la perforación	99
4. Después de la perforación	101
5. Métodos de predicción de la presión de fractura	104
A) Método de Hubbert y Willis	104
B) Método de Matthews y Kelly	105
C) Método de Eaton	106
6. Planeamiento del asentamiento de T. R.	107
7. Nomenclatura	110

VIII.	HERRAMIENTAS ESPECIALES QUE SE UTILIZAN EN LA CEMENTACION DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	111
	1. Generalidades	111
	2. Descripción	112
	3. Combinaciones Comunes	123
IX.	EJEMPLOS DE DISEÑOS PRACTICOS PARA LA CEMENTACION DE UNA TUBERIA DE REVESTIMIENTO	126
	1. Generalidades	126
	2. Mecanismos de desplazamiento	127
	3. Etapas en un proyecto de cementación	127
	4. Diseño	128
	A) Análisis hidráulico para la operación de cementación	130
	B) Ecuaciones de flujo y procedimientos de cálculo	131
	5. Ejemplos	133
	6. Nomenclatura	142
X.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
XI.	BIBLIOGRAFIA	145

## I. INTRODUCCION

Para la extracción de los hidrocarburos del subsuelo es necesario crear conductos que comuniquen al yacimiento con la superficie y a la vez permitan el control de la producción. A estos conductos aunados a una serie de accesorios, se les conoce con el nombre de pozos petroleros.

Para la creación del conducto, es necesario perforar todas las formaciones que se encuentran arriba del yacimiento, y el yacimiento mismo.

La perforación se lleva a cabo por etapas, es decir, primero se perfora un agujero hasta una cierta profundidad, se adema o reviste con tubos de acero e inmediatamente se continúa perforando con un diámetro menor hasta una profundidad mayor, se adema de nuevo hasta la superficie y se continúa perforando, así sucesivamente hasta llegar a la profundidad requerida. (De 3 a 5 etapas en forma normal).

Las profundidades de las etapas mencionadas, son conocidas como profundidades de asentamiento y deben ser determinadas, antes de empezar a perforar. Para su determinación existen procedimientos, además se requiere el conocimiento de las características de las formaciones por perforar.

Los diferentes ademes que se van introduciendo en forma --

concéntrica, etapa tras etapa, se llaman sargas de tuberías de revestimiento, y cada una sirve a uno o varios propósitos que se verán más adelante.

Cuando la tubería de revestimiento se introduce al agujero, queda sujeta a varios esfuerzos, por lo que deberá ser diseñado para que los resista sin experimentar falla. O sea que el diseño consiste en determinar los esfuerzos a que estará sujeta la T. R. y seleccionarla de una resistencia apropiada, ya que si se introducen tuberías de mayor resistencia el costo aumentará - debido a que las tuberías, en general, aumentan su costo con la resistencia.

Adicionalmente, los esfuerzos no son constantes en toda la longitud de la T. R., por lo tanto, para evitar sobrediseño, se seleccionan secciones de diferentes resistencias, que unidas entre sí formarán una sarga combinada de tubería que resulta más económica.

Existen varios métodos para determinar las longitudes de estas secciones, algunos de los cuales se verán más adelante.

Cabe mencionar que las tuberías de revestimiento deberán ser cementadas, es decir, deberá existir cemento entre estas y el agujero, de tal manera que el conjunto tubería-cemento formará lo que se conoce como el ademe del pozo.

## II. DIFERENTES TIPOS Y OBJETIVOS DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

### II.1. GENERALIDADES

El programa de T. R., representa uno de los elementos de - más alto costo, por sí solo en la perforación y terminación de - un pozo. Por lo tanto, es imperativo que se apliquen serios --- principios de ingeniería y análisis económico al determinar el - programa, de manera que se consiga el más efectivo posible en -- función de su costo.

Naturalmente el programa de revestimiento ideal, tendría - una sola sarta de revestimiento, que se metería desde la superfi- cie hasta la formación productiva.

Sin embargo, debido a la variedad de formaciones geológi-- cas que deben ser penetradas hasta llegar a la profundidad deseada, se tienen que instalar varias sartas protectoras especiales de revestimiento, sirviendo cada una de éstas a un propósito de- finido.

### II.2. TUBO CONDUCTOR

Esta sarta es un revestimiento de corta longitud, que se - utiliza en un pozo cuando el terreno de la superficie sea suave, como en los pantanos o en localizaciones en alta mar. Se usa en

primer lugar para evitar la erosión o deslave del pozo, al rededor de la base de la torre y segundo para suministrar un conductor por el cual se pueda regresar el fluido de perforación, a la presa de lodo. El conductor también sirve para proteger las subsecuentes sartas de revestimiento de la corrosión y para soportar parte de la carga de la cabeza del pozo en las localidades en donde la resistencia del terreno sea inadecuada.

Se puede perforar el agujero para el conductor y se puede instalar la tubería de la manera usual (ya sea soldada o ensamblada por medio de conexiones roscadas), o bien se forza con equipo de hincado. Cuando se utiliza el equipo de hincado, se pone tubería con extremo para soldar (tubería lisa) y se soldan las juntas a medida que se añaden tubos a la sarta.

El conductor es la tubería de mayor tamaño (diámetro) en un pozo. Los tamaños más comunes son desde 13 3/8" hasta 30". El tamaño depende usualmente de la profundidad total del pozo y del programa de T. R.

### II.3. TUBERIA DE REVESTIMIENTO SUPERFICIAL

El revestimiento superficial se corre una vez que se a fijado el revestimiento conductor y que se ha hecho el agujero superficial.

Su diámetro es menor que el tubo conductor y usualmente se instala a suficiente profundidad, como para proteger al pozo de derrumbes en las formaciones sueltas que con frecuencia se en---

cuentran cerca de la superficie y para protección de las arenas de agua dulce.

La profundidad del revestimiento superficial puede llegar a tener varios cientos de metros, dependiendo de las formaciones que se encuentren. En algunos países la legislación que protege la reserva subterránea de agua dulce es bastante específica acerca de la longitud del revestimiento superficial. En Texas, por ejemplo, el revestimiento superficial debe quedar colocado abajo de las arenas acuíferas y cementado hasta la superficie.

El revestimiento superficial es el punto de partida para el cabezal del pozo. Da soporte a los preventores y actúa como soporte de sartas que se puedan instalar más adelante.

#### II.4. TUBERIA DE REVESTIMIENTO INTERMEDIO

Si siguiendo la colocación del revestimiento superficial adecuado, se requerirán una o dos sartas más de revestimiento adicional. Este número depende de la profundidad del pozo y de los problemas que se encuentren en la perforación. Si el pozo es -- excepcionalmente profundo o si se encuentran severos problemas de perforación, tales como una presión anormal en las formaciones geológicas o zonas de pérdida de circulación, puede llegar a ser necesario el colocar una o más sartas intermedias de revestimiento para lograr aislar o sellar las zonas que están causando problemas.

. Los revestimientos intermedios generalmente se usan para -

sellar formaciones que pudieran fracturarse en el lodo pesado, - el cual es necesario para perforar las formaciones geológicas de elevadas presiones y otras veces se cementan a través de dichas zonas, para permitir el uso de lodos más ligeros para atravesar las formaciones más profundas de bajas presiones.

#### II.5. TUBERIA DE REVESTIMIENTO DE EXPLOTACION

Este revestimiento es el último en instalarse en el pozo y es de los más importantes. Llega hasta la formación productora por lo que los fluidos a producir pasaran de la formación a la tubería de producción a través de orificios practicados en las paredes de este revestimiento.

Sirve para aislar el petróleo o gas de la formación productora de todos los fluidos indeseables, como agua o gas que pudieran existir en las formaciones adyacentes.

También sirve como protector de la tubería de producción y además es el único acceso al yacimiento para trabajos de reparación del pozo.

#### II.6. TUBERIAS CORTAS Y SARTAS DE ELACE

Hay instalaciones especiales de revestimiento que no utilizan una sarta completa que se extiende desde la superficie hasta el fondo del pozo. Este revestimiento abreviado se llama tubería corta y se extiende desde el fondo del pozo hasta un punto - a un centenar de metros. (Y a veces mucho más) arriba de la za-

pata de la última sarta de revestimiento. Una tubería corta durante la perforación, como un revestimiento intermedio, se instala para aislar una pérdida de circulación o formaciones de alta presión. (tubería corta de protección). Aunque pudiera servir como extremo inferior de la última tubería cementada, generalmente se aísla al terminarse el pozo.

La tubería corta que posteriormente formará parte de la última tubería cementada, se instala a través del intervalo de formación productora (tubería corta de producción). Como tal tiene que diseñarse para aguantar presiones de estimulación, de formación geológica y los flujos de fluidos anticipados.

Las tuberías cortas se suspenden de la sarta superior por medio de un colgador. Generalmente se cementan en su lugar, pero ocasionalmente se suspenden en el pozo sin cementarlas.

La principal ventaja de una tubería corta es su bajo costo puesto que se instala una longitud corta en lugar de una sarta completa hasta la superficie. Sin embargo, se pueden presentar problemas de fugas en los sellos del colgador, al correr la tubería o durante la cementación.

En adición, el revestimiento arriba de la tubería corta -- tiene que ser capaz de resistir las presiones que se encuentran al perforar abajo de la tubería corta. Una vez colocada la tubería corta y que se ha perforado el pozo a la profundidad deseada, ésta se puede conectar de nuevo a la superficie por medio de una sarta de enlace, completando así la última sarta de revesti-

miento cementada.

Una ventaja de la tubería corta y de la sarta de enlace es que la parte alta del pozo tiene así una sarta de revestimiento a través de la cual no se ha perforado.

También se pueden efectuar ahorros en los programas de pozos profundos porque así se permite el uso de revestimientos de peso más ligero o de menor grado, debido a los requerimientos menores de resistencia a la tensión.

### III. DIFERENTES PESOS Y GRADOS

#### III.1. GENERALIDADES

El API (Instituto Americano de Petróleo), identifica, evalúa y desarrolla normas para los productos fabricados para la industria petrolera y de gas. Las especificaciones 5A, 5Ac y 5AX sobre productos tubulares usados en campos petroleros, definen las tuberías de revestimiento como tubos con un rango de diámetros exteriores desde 4 1/2" hasta 20".

Las tuberías de revestimiento se consideran API si cumplen ciertas especificaciones. Entre las propiedades definidas por estas especificaciones API están: el peso por pie lineal, los rangos de longitud, el diámetro exterior, el espesor de pared, la longitud y el diámetro de mandril que garantiza el diámetro interior mínimo, el grado de acero del tubo, la presión de la prueba hidrostática y los métodos de fabricación del acero.

Los estándares especifican las dimensiones físicas de las conexiones roscadas API y sus respectivos recalcados.

Además, el API establece los grados de comportamiento para el esfuerzo de la cedencia interna, aplastamiento y tensión, tanto de la tubería como de las conexiones API.

### III.2. PESOS Y RANGOS

Los pesos de las tuberías de revestimiento, se expresan en lb/pie lineal y se designan como pesos de tubo con extremos lisos o pesos nominales. El peso de los tubos de extremos lisos, se refiere a tubos no roscados.

El peso nominal es el peso del tubo con las conexiones de cierto estilo API, incluyendo recalcados, roscas y coples.

Las especificaciones API para las tuberías de revestimiento establecen un rango de longitud de cada tramo.

Hay tres rangos de longitudes para tuberías de revestimiento:

El Rango 1 (designado R-1), incluye secciones de 16' a 25'.

El Rango 2 (designado R-2), incluye secciones de 25' a 34'.

El Rango 3 (designado R-3), es de 34' o más largos.

Las tuberías de revestimiento generalmente se corren con longitudes R-3. Estas mayores longitudes, reducen el número total de conexiones roscadas necesarias para la sarta. Como las tuberías de revestimiento se corren con tramos individuales, éstos no presentan problemas si son largos.

### III.3. REQUERIMIENTOS DE DIAMETRO INTERIOR Y EXTERIOR

Las tolerancias API en el diámetro exterior permiten des--

viaciones de  $\pm 0.75\%$  en diámetros de tubería de revestimiento. Aunque las tolerancias permiten un tubo de tamaño inferior, el tubo generalmente se fabrica de tamaño superior al nominal.

Esto es particularmente cierto en las tuberías de revestimiento sin rosca, que andan entre 0.020" y 0.080" de sobre tamaño, dependiendo del diámetro de la tubería. Este sobre tamaño asegura que haya suficiente desvanecimiento y rosca completa, -- cuando se maquina un tubo con extremos lisos para hacer una junta API.

Además, el mayor diámetro exterior, acoplado con el mantenimiento de un espesor de pared nominal, ayuda en el aseguramiento que no habrá problema en la prueba del diámetro interior mínimo.

El espesor de pared no tiene un límite máximo. Sin embargo, el mínimo espesor permitido es de 87.5% del espesor nominal de pared. Esto es particularmente importante, ya que el método API de calificación de la presión de cedencia interior del tubo, se basa en esta pared de espesor reducido.

El diámetro interior de prueba es el diámetro mínimo del mandril que debe pasar sin obstrucción a través de la tubería y que sirve para definir la tolerancia del diámetro mínimo, el ovalamiento y hasta cierto grado, la rectitud de la tubería.

Una de las principales razones para someter la tubería de revestimiento a la prueba del mandril, es asegurarse del peso de una barrena de diámetro común para lo cual el mandril corto es -

el adecuado.

En algunos casos es necesario correr una tubería de revestimiento, con un diámetro interior mínimo, que no permite el paso de una barrena de tamaño común.

Cuando esta diferencia de diámetros es pequeña, se puede ordenar una tubería de revestimiento que pase un mandril especial de sobre tamaño, permitiendo así el uso de una barrena de tamaño popular.

#### III.4. GRADOS DE ACERO

Los grados de acero de tubería se identifican por medio de letras y números, los cuales indican varias características del acero del tubo. En cada grado API, el número designa la mínima resistencia en el punto de cedencia. Por ejemplo un acero de grado J-55, exhibe una resistencia mínima a la cedencia de 55,000 lb/pulg<sup>2</sup>.

En otras palabras puede soportar un esfuerzo de 55,000 lb/pg<sup>2</sup> con una elongación de menos de 0.5%.

La letra que va junto con el número, designa el máximo esfuerzo a la cedencia.

En el J-55 esta es 80,000 lb/pg<sup>2</sup> y la mínima resistencia final es de 75,000 lb/pg<sup>2</sup>. (Ver tabla siguiente).

## GRADOS API DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Designación	Cedencia Mínima lb/pg <sup>2</sup>	Cedencia Máxima lb/pg <sup>2</sup>	Mín. Final lb/pg <sup>2</sup>
H-40	40,000	80,000	60,000
J-55	55,000	80,000	75,000
K-55	55,000	80,000	95,000
C-75	75,000	90,000	95,000
L-80	80,000	95,000	95,000
N-80	80,000	110,000	100,000
C-95	95,000	110,000	105,000
P-110	110,000	140,000	125,000

En adición a los grados API, hay muchos grados de acero -- patentados, que no corresponden a las normas API, pero que son -- utilizados en la industria.

Estos grados especiales, utilizados extensamente, muchas -- veces se corren para varias aplicaciones que pueden requerir muy alta resistencia a la tensión, una resistencia al colapso fuera de proporción o aceros resistentes a la fragilización por ácido sulfhídrico.

Muchas sargas de tubería de revestimiento, se instalan con estas tuberías no API. Mucha de esa tubería se fabrica bajo -- gran parte, pero no todas las especificaciones API, con varian-- tes en el grado del acero, espesor de pared, diámetro exterior, conexión roscada y el recalco correspondiente. Como resultado de esos cambios, sus rangos de cedencia interna, colapso y ten-- sión tanto para la tubería como para las conexiones, no son API.

Sin embargo, las propiedades para estos productos si son calculadas usando fórmulas API o son consistentes con los métodos API. También los parámetros tales como el diámetro mínimo permitido, tolerancias del espesor de pared, rangos de longitudes y tolerancias de pesos se mantienen iguales o consistentes con las especificaciones API.

### III.5. CONEXIONES

Las tuberías de revestimiento para pozos que se conforman a los estándares API se pueden conseguir con extremos lisos, pero generalmente los extremos vienen roscados y con sus coples tales como: conexión 8 hilos rosca redonda (8h.r.r.) (STC), rosca cople largo (LTC), conexión buttress, cople normal (BCN) rosca - Extreme Line (X Line) para tubería de revestimiento.

Con excepción de la rosca macho o piñón de Extreme Line, - las roscas se maquinan sobre tubos con extremos lisos y luego se arman con un cople.

Un recalcado es un engrosamiento de la pared en el extremo de un tubo, utilizando un proceso de forjado en caliente previo a un tratamiento térmico de todo el tramo. Este método de manufactura no permite mantener las propiedades metalúrgicas ni las mecánicas en el recalcado, para que queden iguales a las propiedades presentes en el cuerpo del tubo. Además, un recalcado no puede lograrse en aceros de alta resistencia lo que limita su uso a los pozos que no sean de gran profundidad.

En adición a las conexiones API, existen conexiones patentadas disponibles, que ofrecen características mejoradas que no tiene las conexiones API. Una de esas es la conexión de tipo ra sante.

Estas conexiones tienen un diámetro exterior igual al diámetro exterior del tubo y se usan en situaciones de tuberías cor tas o claros reducidos. Otras conexiones patentadas se utilizan en tubería donde no hay API disponible.

Entre las características especiales están los diámetros - exteriores para pozos de diámetro reducido, conexiones lisas en el diámetro interior para mejorar las características de flujo, sellos de metal-con-metal para mejorar la integridad del sello - en altas presiones, alta resistencia al arqueado para pozos desvia dos, hombros múltiples para gran resistencia a la torsión.

Hay conexiones con características mejoradas adicionales - que tienen mayor resistencia a la tensión para pozos profundos, anillos de teflón para protección contra corrosión, alta resistencia al aplastamiento para situaciones de carga exterior, así como rangos de resistencia en el punto de cedencia inexistentes en las conexiones API para algunas tuberías de revestimiento más pesadas.

#### IV. FACTORES DE SEGURIDAD QUE INTERVIENEN

La resistencia al colapso, la presión interna y el esfuerzo de cedencia mínimo del cuerpo y la junta, indican los máximos esfuerzos permitidos a los que la tubería de revestimiento puede estar sujeta sin fallar.

Rara vez es deseable exponer cualquier material al máximo esfuerzo permisible. Esto tiene vital importancia en las tuberías de revestimiento, dado que las propiedades físicas son determinadas en muestras de tuberías y las propiedades de cualquier tramo de tubería en particular pueden desviarse considerablemente del promedio estadístico y por lo tanto ocasionar fallas en este tramo. Para tratar de evitar esto se introduce el concepto de "FACTOR DE SEGURIDAD", el cual es la relación del máximo esfuerzo permisible entre el esfuerzo de trabajo real.

Este factor de seguridad es comunmente conocido como "FACTOR DE DISEÑO". La selección de factores de diseño para cualquier problema de ingeniería es gobernado ampliamente por cuatro consideraciones básicas, de acuerdo con Hillis, éstas son:

- 1.- La confiabilidad y exactitud de los datos de esfuerzos usados para diseñar.

- 2.- El grado de similitud entre las condiciones de servicio y las condiciones de prueba usadas para determinar los datos

de los esfuerzos. Si el servicio y las condiciones de prueba imponen el mismo tipo de carga (aceleración, impacto, fatiga, etc.) el factor de diseño puede reducirse tanto como el criterio del diseñador lo desee.

3.- La confiabilidad y exactitud de cargas supuestas para el diseño. Si la carga supuesta se aproxima a la de servicio, el factor de diseño podrá reducirse tanto como el diseño lo requiera.

4.- Las consecuencias de fallas, por descuido del personal, motiva a utilizar factores de diseño elevados.

En 1955 el API reportó los resultados de una investigación de factores de diseño aplicados en las tuberías de revestimiento. Del análisis efectuado por 38 compañías, se obtuvieron los siguientes resultados:

1.- Los factores de diseño para colapso varían de 1.0 a 1.5. Un factor de diseño de 1.125 fue usado en el 68% de las tuberías reportadas.

2.- Los factores de diseño a presión interna fluctúan entre 1.0 y 1.75, teniendo el mayor índice el factor de 1.1 usado en el 32% de las tuberías de revestimiento reportadas.

3.- Los factores de diseño por tensión varían de 1.5 a 2.0, el factor de 1.6 se usó en el 29% de los casos, 1.75 en el 22%, 1.8 en el 25% y 2 en el 24%, siendo éstos los más usados. En esta parte se indica que la mitad de las pruebas usaron el --

mismo factor de diseño a la tensión en el cuerpo de la tubería y la junta. En la otra mitad el factor de diseño a la falla en el cuerpo fue generalmente algo menor que en la junta.

De acuerdo con esta información se concluye que:

<u>FACTOR DE DISEÑO</u>	<u>RANGO</u>	<u>VALOR MAS USADO</u>
COLAPSO	1.0 - 1.5	1.125
PRESION INTERNA	1.0 - 1.75	1.1
TENSION	1.5 - 2.0	1.8

## V.- CONSIDERACIONES DE CARGA

## V.1.- CARGA POR PRESION EXTERNA (COLAPSO)

La capacidad de la tubería de revestimiento para soportar presión externa, sin experimentar falla alguna, se llama resistencia al colapso.

La resistencia al colapso depende de:

- a. Las características del acero
- b. La tensión o compresión axial a que está sujeta la tubería.
- c. La relación existente entre el diámetro de la tubería y su espesor.

La condición más severa, usada comunmente para efectos de diseño, se presenta en la figura V.1., la cual corresponde a un pozo "vacío", sin presión en la cabeza de la tubería de revestimiento y una columna de lodo en el espacio anular.

Cualquier presión en el interior de la tubería, que se mantenga durante la vida del pozo, reducirá la presión de colapso en una cantidad equivalente a la diferencia entre la presión que ejerce el lodo en el espacio anular y la presión en el interior de la tubería, en función del esfuerzo aplicado, la T.R. puede sufrir dos tipos de deformación.

# CONDICION SEVERA DE DISEÑO AL COLAPSO

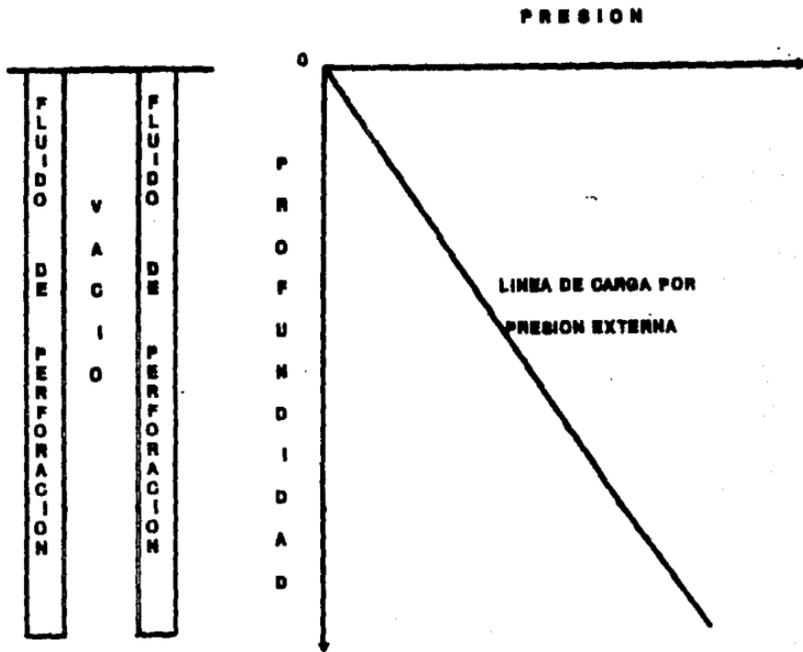


FIG. V.1

# CONDICION SEVERA DE DISEÑO AL COLAPSO

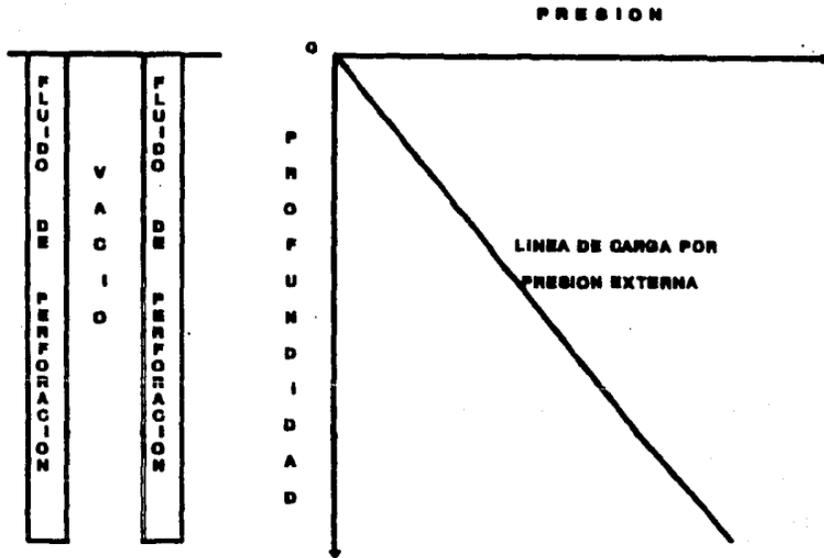


FIG. V.1

1. Deformación elástica. Se trata de una deformación reversible, recobra su forma original.
2. Deformación plástica. En este caso es irreversible, no recobra su forma inicial

Las ecuaciones para determinar la resistencia por falla -- elástica o plástica al colapso, sin considerar la tensión o compresión axial, se dan en el boletín 563 del Instituto Americano del Petróleo (API), para los diferentes diámetros, pesos y grados existentes en la industria petrolera.

La tensión o compresión axial a que está sujeta la tubería, tendrá como consecuencia que sus resistencias a la presión de colapso y presión interna se vean alteradas en la forma siguiente:

La tensión: Aumenta la resistencia a la presión interna y disminuye la resistencia a la presión de colapso.

La compresión: Aumenta la resistencia a la presión de colapso y disminuye la resistencia a la presión interna.

Estos fenómenos están gobernados por la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales, que se presenta así:

$$X^2 + XY + Y^2 = 1 \quad \text{.....V.1}$$

Donde

$$X = \frac{T}{Y_m A_s} \quad \text{.....V.2}$$

$$Y = 1 - 0.75 X^2 - 0.5X \quad \text{.....V.3}$$

La representación gráfica de esta ecuación se muestra en -  
la figura V.2

#### V.2. CARGA POR PRESION INTERNA

Durante la entrada de fluido de la formación a la tubería de revestimiento, así como en operaciones tales como cementaciones forzadas y fracturamientos, la tubería de revestimiento está sujeta a presiones internas altas, es por ello que se hace necesario tomar en cuenta este factor al llevar a cabo el diseño de sartas de tuberías de revestimiento.

El exceso de presión interna puede ocasionar ruptura y por ello, en ese momento, se le denomina presión de ruptura.

Convencionalmente la presión de ruptura para tuberías de acero es calculada a partir de la fórmula de Barlow:

$$P_b = \frac{2 \cdot Sxt}{d} \quad \text{V.1}$$

La falla tiende a ocurrir cuando se aplica un esfuerzo que excede el esfuerzo de cedencia, resultando una deformación perma

# ELIPSE DE ESFUERZOS BIAxiaLES

ESFUERZO DE CARGA · ESFUERZO DE CEDENCIA, PORCENTAJE (%)

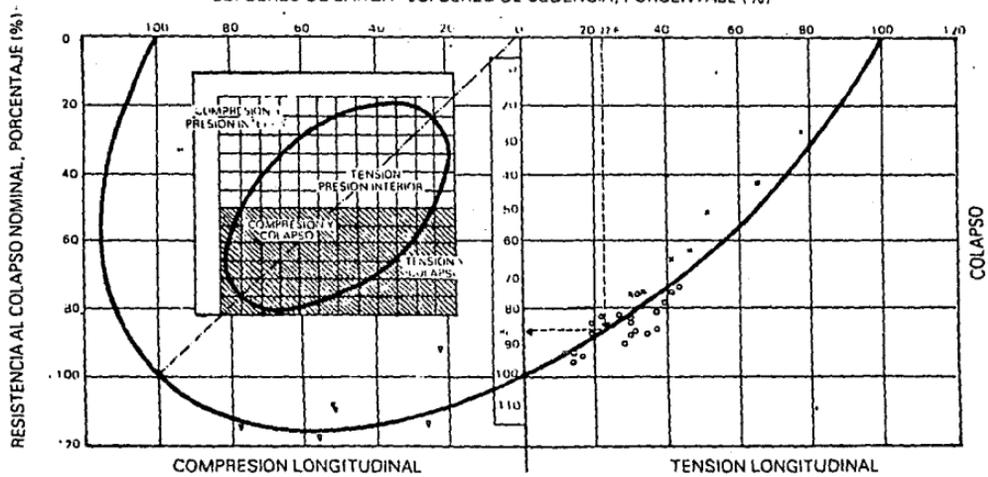


FIG. V. 2

nente en la tubería. Este tipo de falla sucede con un esfuerzo considerablemente inferior al que provoca la ruptura. Es por -- ello propicio substituir el esfuerzo de tensión del acero por el mínimo esfuerzo de cedencia ( $Y_m$ ) en la fórmula de Barlow, y considerar el mínimo espesor de pared permisible (0.875 t), tomando en cuenta esto, la fórmula quedaría:

$$R_i = \frac{1.75 Y_m t}{d}$$

v.5

### V.3.- CARGA LONGITUDINAL (TENSION)

En cierto punto de la serie de tuberías de revestimiento - el colapso deja de ser el factor importante de control en el diseño y la tensión toma ese lugar. El efecto de la tensión axial presenta dos aspectos, primero tiende a causar falla en la tubería de revestimiento por efecto de deformación longitudinal y se gundo reducir la resistencia al colapso de la tubería de revesti miento.

La carga de tensión que actúa sobre la tubería de revestimiento puede ser producida por las siguientes causas:

1.- El peso propio de la tubería desde la conexión superficial, a este se debe restar el efecto de flotación del líquido en el cual la sarta está sumergida. Como condición crítica se - considera que la serie está suspendida en el aire.

2.- Las cargas de impacto repentinas ocasionadas durante - la introducción de la sarta, provocan impulsos que se agregan a

la carga de tensión. El cálculo de estas cargas no es fácil ya que es una función de la velocidad y la carga que se desliza.

3.- Cargas debidas a la fricción de la tubería de revestimiento con las paredes y el contorno del pozo.

4.- Cambios de temperatura después de cementar la tubería. El enfriamiento aumenta el esfuerzo de tensión a razón de  $207 \text{ lb/pg}^2$  por  $^{\circ}\text{F}$  de caída de temperatura, pero el aumento de temperatura reduce la carga por tensión.

5.- La elevada presión del fluido dentro de la tubería de revestimiento expande y reduce la longitud de la sección aumentando con esto la carga de tensión.

6.- Cargas de pandeo o flexión de la tubería de revestimiento.

La mayoría de las situaciones mencionadas son difíciles de evaluar, es por ello que al efectuar un diseño algunas veces se considera la situación mas crítica, que es la tubería colgando libremente con un factor de diseño elevado.

#### V.4. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

Las secciones de tubería que se localizan a más profundidad se exponen a mayores presiones externas y menores cargas axiales, contrariamente los tramos superficiales soportan mayores cargas axiales y menores presiones de colapso. En la actualidad existen varios procedimientos empleados para el diseño de

tuberías de revestimiento, entre los cuales están:

- A) METODO ANALITICO
- B) METODO GRAFICO
- C) METODO PRACTICO
- D) CARGA MAXIMA

De estos procedimientos, el más empleado es el primero, -- del cual existen dos variantes, una que emplea la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales y el otro que emplea una ecuación de corrección a la resistencia al colapso; en realidad aplican -- el mismo concepto pero de manera diferente, como se mostrará -- adelante.

El procedimiento que aplica el concepto de carga máxima, -- es menos usado, a pesar de no ser un concepto reciente (1969) no obstante su uso va en aumento.

El método gráfico es también empleado, sin embargo, se pueden cometer errores al efectuar el diseño, por lo que su uso ha disminuído; su principal ventaja es el hecho de que de una manera rápida se obtienen los diseños, más con el manejo de programas de cómputo esta ventaja desaparece dado que es más práctico el uso de la computación.

#### A. METODO ANALITICO

La secuencia de cálculo usando la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales y la ecuación de resistencia al colapso es -- semejante, esta solución analítica se logra mediante un proceso

de ensayo y error como se muestra a continuación; el diseño de la sarta se efectúa del fondo a la superficie:

1. Determinar la presión de fondo máxima.

$$P_f = 0.052 * r * L \quad \dots\dots V.6$$

2. Determinar la presión interna máxima y en superficie

$$P_{me} = P_s \left[ (34 \times 10^{-6} \times r_{rg} \times L) \right] \quad \dots\dots V.7$$

donde:

$$P_s = \frac{0.052 \text{ Le} * r_e}{\left[ (34 \times 10^{-6} \times r_{rg} \times L) \right]} \quad \dots\dots V.8$$

3. En el cálculo de las presiones de colapso e interna máximas, se toman las condiciones más críticas esperadas, sin embargo, esto no es suficiente y por tal motivo se consideran los factores de diseño por lo que las presiones de diseño serán:

Para colapso:

$$P_c = P_f * F_c \quad \dots\dots V.9$$

Para Presión Interna:

$$P_i = P_{me} * F_i \quad \dots\dots V.10$$

4. Conocidos los valores de presión de colapso e interna de diseño, se localizan en tablas las tuberías que tengan valores de resistencia a la presión interna mayores que la presión interna de diseño (paso 3). Ya seleccionadas, se ordenan en forma decreciente de acuerdo a su resistencia al colapso, iniciando

con la inmediata superior al valor de presión de colapso de diseño; y es así que solo la primera tubería tendrá un valor de resistencia al colapso mayor que el de diseño y el resto tendrá -- valores menores.

5. Se calcula la profundidad a la que llegará la siguiente sección de tubería seleccionada (esta será una de menor resistencia al colapso de las ya clasificadas en el paso anterior). - Aquí se presentan los pasos a seguir empleando la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales y la ecuación de reducción al colapso, que como ya se indicó parten del mismo concepto. En ambos casos es un proceso de ensaye y error que consiste en:

- a) Obtener la profundidad del punto de enlace, calculando:

$$Lx = \frac{Rc}{0.052 * r * Fc} \quad \text{..... V.11}$$

- b) Se obtiene peso de la sección de tubería calculando:

$$W = (L - Lx) Pu * Ff \quad \text{..... V.12}$$

Si se considera factor de flotación se calcula con:

$$Ff = 1 - (r / ra) \quad \text{..... V.13}$$

Si en el diseño no se considera factor de flotación, se -- tendrá:

$$Ff = 1.0$$

- c) Aplicar la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxia-

les:

1. Se calcula X según ecuación V.2
2. Calcular el área de la sección transversal con la ---  
ecuación V.14

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \quad \dots\dots V.14$$

3. Obtener el valor de Y con la ecuación V.3

(Este valor de Y puede ser obtenido de tablas o gráficas -  
previamente elaboradas).

4. Efectuar la corrección al colapso por efecto de carga  
axial:

$$R_{cc} = R_c * Y \quad \dots\dots V.15$$

5. Calcular el factor de diseño al colapso con el cual -  
se está trabajando.

$$F_{ct} = \frac{R_{cc}}{(0.052) (r) (L_x)} \quad \dots\dots V.16$$

Hecho todo lo anterior, se está en condiciones de verifi-  
car si la tubería soporta la resistencia al colapso en la longi-  
tud calculada ( $L_x$ ), esto se hará comparando el factor de traba-  
jo al colapso, si se cumple que:

$$F_{ct} \quad F_c$$

Se considera que la longitud de la sección, calculada, --  
( $L_x$ ) es correcta; si no se cumple, se repite el cálculo a partir

del paso (5.a) sólo que ahora se sustituye la resistencia al colapso ( $R_c$ ) por el valor de la resistencia al colapso corregida ( $R_{cc}$ ) del paso (5.C.4), en la ecuación V.8 y se repite el proceso hasta que se cumpla la condición deseada.

Si se utiliza la ecuación de corrección de resistencia al colapso, los cálculos por efectuar son los ya mencionados, hasta el inciso (5.c), con las modificaciones que se muestran a continuación:

- 1) Calcular la constante K:

$$K^F = 2 \quad (t(d-t)) Y_m \quad \dots\dots V.17$$

- 2) Determinar el valor de corrección de resistencia al colapso por efecto de carga axial.

$$R_{cc} = \frac{R_c}{K} (K^2 - 3w_x^2)^{0.5} - W_x \quad \dots\dots V.18$$

- 3) Se encuentra el valor del factor de trabajo al colapso en la sección correspondiente, utilizando la ecuación V.16

- 4) Se compara el factor de trabajo con el factor deseado;

$$F_{ct} \geq F_c$$

Si se cumple esta condición, se considera que la longitud calculada es correcta ( $L_t$ ), si no es así se repite el proceso a partir del inciso (5.a.) considerando:

$$R_c = R_{cc}$$

El peso de la sección se calcula con la nueva longitud de la sección, el valor de K no varía tratándose de la misma tubería, y se continúa el proceso ya indicado.

6. Ya conocida la longitud de la sección de la sarta de tubería que satisface por colapso, se procede a diseñar con respecto a la tensión; normalmente en las tuberías del fondo no existe ningún problema en cuanto a la tensión, este factor toma mayor importancia en cuanto se avanza a la superficie.

a) El factor de trabajo a la tensión para el cuerpo se-  
ra;

$$F_{ttc} = \frac{R_{tc}}{W_t} \quad \dots\dots V.19$$

El peso total de las tuberías, se calcula con:

$$W_t = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n \quad \dots\dots V.20$$

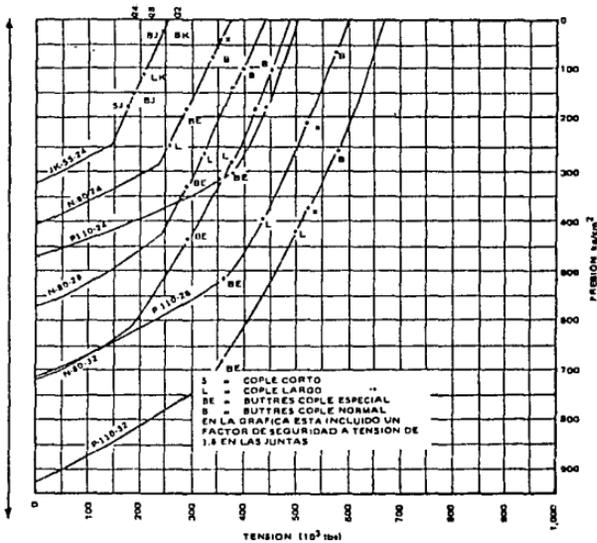
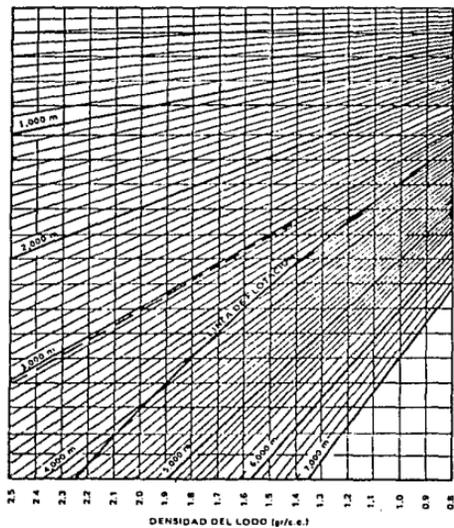
O bien acumulando el peso de las secciones inferiores en la superior.

Ya se indicó como calcular el peso de la primera sección, en las siguientes secciones será:

$$W_x = W_{x-1} + (L_{x-1} - L_x) \rho_{ui} * F_f \quad \dots\dots V.21$$

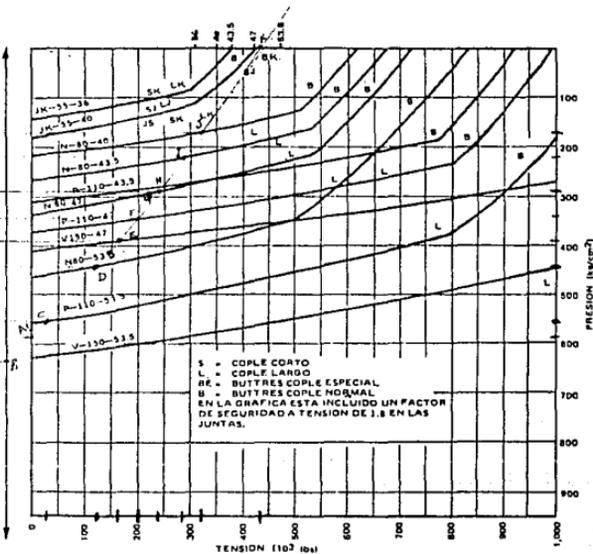
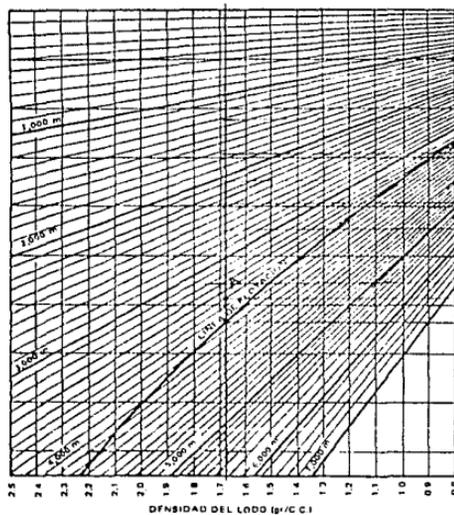
De esta manera se hace acumulativo el peso de cada sección:

b) El factor de tensión de trabajo en la junta será:



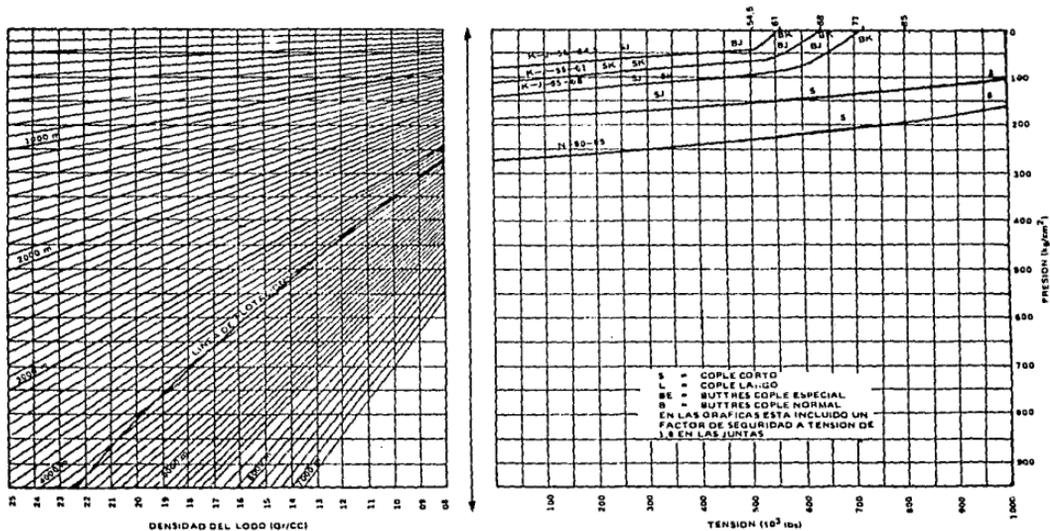
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 8 5/8"

FIG. V.3



DISÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 9 5/8"

FIG. V.4



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 13 3/8"

FIG. V.3

$$F_{ttj} = . R_{tj}/W_t$$

.....V.22

c) En ambos casos se debe cumplir que:

$$F_{ttc} \quad F_{tc} \quad \text{y} \quad F_{ttj} \quad F_{tj}$$

Siempre que esto se cumpla se continúa con el diseño, si no es así, se busca otra tubería y/o cople que si satisfaga.

7. Una vez que la tubería seleccionada cumple con los -- factores de diseño al colapso, tensión en el cuerpo y en la junta, se toma la siguiente tubería de las previamente clasificadas en el paso 6 y se repite el procedimiento a partir del paso 5.

Es por lo anterior que el proceso es muy laborioso y se recomienda elaborar un programa de cómputo para efectuar el diseño de una manera rápida y eficiente.

#### B. METODO GRAFICO

Se utilizan las gráficas de Diseño Yougstown, existe una gráfica para cada diámetro de T. R., algunas se muestran en las figuras V.3., V.4., y V.5., para T. R., de 13 3/8", 95/8" y 6 -- 5/8" de diámetro exterior respectivamente, el procedimiento es -- el siguiente:

1. Multiplicar el valor de la densidad del lodo por el -- factor de seguridad al colapso (1.125)
2. Con el valor determinado fijamos un punto (gráfica -- II) en el eje horizontal (densidad) y a partir de es-

te punto levantamos una perpendicular hasta la parte superior de la gráfica (esta línea recibe el nombre de línea programa).

3. Al punto formado por la intersección de la recta de la profundidad con la línea programa, se designará como punto "A".

Desde el punto A se proyecta una línea horizontal hasta cruzar el margen izquierdo de la gráfica I y se designa como punto "A", este punto indica el grado y peso de la primera sección de tubería que se va a introducir el pozo.

- 4) Al punto formado por la intersección de la línea punteada de la gráfica II con la línea programa se designa como punto "B".

La línea punteada representa una columna de 10000 - - pies de tubería suspendida en el aire.

Después este punto es proyectado horizontalmente hasta el eje intermedio que está entre las dos gráficas y a este nuevo punto lo denominaremos como punto "B<sub>1</sub>" o pivote.

Si se va a considerar el efecto de flotación de la tubería que se está diseñando entonces el punto "pivote", se obtiene de la proyección del punto formando por la intersección de la línea programa con la línea

de flotación de la gráfica II.

5. A partir del punto pivote o punto "B", se localizan líneas rectas a los diferentes puntos marcados que se localizan en la parte superior de la gráfica I y que representan los pesos por unidad de longitud de la tubería que se requiere diseñar.
6. A partir del punto "A<sub>1</sub>", trazar la primera paralela - a la recta que corresponde al peso, identificado de - la primer T.R., en la gráfica o curva intersectada -- por la prolongación de la proyección horizontal del - punto "A". Esta paralela debe continuarse hasta que corte otra gráfica o curva de diferente peso y grado.
7. La siguiente paralela se trazará a partir de la intersección anterior y así sucesivamente se continuará -- con las demás, trazando paralelas como pesos nos indiquen la gráfica, hasta llegar a intersectar la parte superior de la gráfica I.
8. Los puntos formados por las intersecciones de las paralelas trazadas con las gráficas o curvas de pesos y grados son proyectados horizontalmente hacia el lado izquierdo hasta la línea programa de la gráfica II.

Ya proyectados dichos puntos hasta la línea programa, se trazan paralelas a las rectas de profundidades hasta el margen izquierdo de la gráfica II para de esta forma determinar la longitud de la sección de tubería del mismo grado.

## REVISION DEL DISEÑO

Al terminar el diseño gráfico de la tubería, se necesita -  
revisar dicho diseño a los diferentes esfuerzos.

- a) Revisión por tensión.- Del punto formado por la in--  
tersección de la paralela con la parte inferior de la  
misma gráfica, en donde están marcados los valores a  
la tensión. Con este obtenemos un valor de la ten--  
sión para cada sección de tubería del mismo grado, --  
por lo que se hace lo mismo para los diferentes pun--  
tos formados por las intersecciones de las paralelas  
con las gráficas o curvas.
- b) Revisión por colapso.- Del punto "A", se traza una -  
horizontal hasta el margen derecho de la gráfica I, -  
en donde obtenemos el valor de presión hidrostática -  
que le corresponde a esta sección de tubería.
- Se hace lo mismo para los demás puntos formados por -  
las intersecciones de las paralelas con las gráficas  
o curvas.
- c) Revisión por presión interna.- Se busca, en el ma--  
nual de tablas de resistencia, el valor de la presión  
interna que resiste la sección de tubería que estamos  
revisando.

Todos los valores obtenidos de la revisión al colap--  
so, a la tensión y a la presión interna son valores

teóricos por lo que es necesario comprobarlos y en caso necesario corregirlos.

Para realizar la comprobación o corrección de las diferentes secciones de tubería diseñada se hará lo siguiente:

- a) Con los datos de diámetro, grado, peso de cada sección de tubería diseñada gráficamente, nos vamos a las tablas de los manuales para determinar las resistencias.

De esta forma obtenemos un valor de resistencia al colapso, el cual lo dividimos entre el factor de seguridad al colapso y así determinamos el valor real de resistencia al colapso que debe tener la sección de tubería.

- b) Este valor real de resistencia al colapso obtenido se compara con el valor de resistencia al colapso determinado en forma teórica y si el valor de resistencia teórica es mayor o igual al valor de resistencia real éste nos indica que el diseño teórico fue correcto o para esta sección de tubería.
- c) En caso contrario en que el valor de resistencia teórica sea menor que el valor de resistencia real, entonces nos indicará que el diseño teórico es incorrecto por lo que es necesario corregirlo tomando un ma-

por peso u otro grado para esta sección de tubería -- con lo cual aumentamos su resistencia y se procede de la misma manera para comprobar si con tomar una tubería de mayor peso o de mayor grado o de resistencia -- fué lo suficiente como para superar o igualar el valor real de resistencia que necesita dicha tubería.

- d) Este mismo proceso se hace para comprobar si el diseño gráfico satisface las demás secciones de tubería -- de diferente grado, así como para la revisión a la -- tensión.

#### C. DISEÑO PRACTICO

El objetivo del diseño es permitir el control de condiciones esperada e inesperadas del pozo, y que sean seguras y económicas.

Las condiciones de carga que son encontradas, en la práctica, son: Colapso, Presión Interna y Tensión.

#### COLAPSO

La presión de colapso usada para el diseño es la presión neta, es decir la carga de presión externa menos cualquier presión interna opuesta. El caso más severo es suponer que la tubería se encuentra vacía, este es usado como condición normal de diseño, siendo la presión de colapso la presión hidrostática del lodo en la cual la tubería de revestimiento será corrida.

Como ya se indicó este valor calculado se utiliza en las

ecuaciones V.2, V3., para determinar el porcentaje de colapso total que resulta debido a la tensión aplicada. Este factor multiplicado por la presión de colapso a la profundidad de interés -- nos proporciona la reducción al colapso.

La fuerza de flotación es igual a la presión hidrostática por el área de sección transversal de la tubería. El resultado es una sección en la parte inferior de la sarta que se encuentra en compresión y el resto en tensión. El punto en el cual -- cambia el esfuerzo es el punto neutro, que se calcula como sigue:

$$L_n = L \left( 1 - \frac{r}{65.4} \right) \quad \dots\dots V.23$$

La carga por colapso sobre la sarta de tuberías de revestimiento en cualquier punto será:

$$P_{ci} = (P_{se} + L_i G_o) - (P_{si} + L_i G_i) \quad \dots\dots V.24$$

Cuando se diseña por colapso y se supone que la tubería -- esta vacía, y la presión interna y externa en superficie son -- iguales, por lo que la ecuación anterior se reduce a:

$$P_{ci} = L_i \times G_o \quad \dots\dots V.25$$

Es conveniente usar un factor de diseño de 1.125, también deberá reducirse la resistencia al colapso por efecto de tensión sobre la tubería antes del punto neutro.

#### PRESION INTERNA

Las consideraciones por presión interna, normalmente go--

biernan el diseño de la parte superior de la sarta.

La tensión aumenta la resistencia a la presión interna en la superficie. El caso más severo es cuando ocurre un brote y la tubería de revestimiento es cerrada con solo gas seco dentro del pozo. En este caso, la máxima presión superficial será la presión ejercida por la columna de lodo dentro del pozo menos la debida a la columna de gas, esto es:

$$P_{sm} = G_e L_e - G_g L_e \quad \dots\dots V.26$$

Esta ecuación supone que la formación inmediatamente abajo de la sarta de revestimiento soportará la presión calculada. En la mayoría de los casos, el gradiente de fractura a la profundidad de asentamiento de la tubería de revestimiento será el factor dominante. Tomando en cuenta esto, la carga por presión interna es calculada con:

$$P_{bi} = G_f * L - G_g (L - L_i) \quad \dots\dots V.27$$

El fluido de perforación detrás de la T.R., ejerce una presión hidrostática, la cual contraresta la carga por presión interna calculada por la ecuación anterior. La determinación de la presión interna neta con condición de brote de gas en el interior, con presión externa en la T. R., y la presión superficial suficiente para fracturar la formación, es calculada con la ecuación

$$P_{bi} = G_f * L - G_g (L - L_i) - G_o L_i \quad \dots\dots V.28$$

Para optimizar el diseño, es importante llevar a cabo la

mejor determinación del gradiente de fractura.

Quando se perforan zonas muy profundas donde la presión anticipada no alcanzará el gradiente de fractura del asentamiento de la T.R., para evitar el sobre diseño, utilizar la siguiente ecuación:

$$P_{bi} = G_e L_e - G_g (L - L_i) - G_o L_i \quad \dots\dots V.29$$

Para propósitos de cálculo, el punto de cambio de T. R., de mayor capacidad a una menor capacidad para una sarta de tubería de revestimiento, puede ser calculada de:

$$L_x = \frac{P_s - R_{id}}{(G_o - G_g)} \quad \dots\dots V.30$$

Para una sarta de tuberías de revestimiento de producción, el caso más severo ocurre cuando un empacador o junta de la T. - R. presenta fugas. La máxima carga por presión interna será la presión en el fondo del pozo menos el gradiente del gas o la presión de cierre de la T. P.

$$P_{me} = P_{for} - G_g L \quad \dots\dots V.31$$

La ecuación para calcular la presión interna en cualquier punto para este tipo de tuberías será:

$$P_{bi} = P_{for} - G_g L + (G_L - G_o) L_i \quad \dots\dots V.32$$

En la mayoría de los casos la densidad del fluido de perforación en el interior es igual a la del exterior, por lo tanto la ecuación se reduce a la anterior.

## TENSION

Dado que el diseño de la tubería de revestimiento por presión interna y colapso está determinado, la carga por tensión en la cima de cada sección debe ser revisada para que no exceda los límites. El factor de diseño por tensión es normalmente de 1.8.

A continuación se presenta un resumen para este método de diseño:

1. Calcular la profundidad del punto neutro con la siguiente ecuación:

$$L_n = L \left( 1 - \frac{r}{65.4} \right)$$

2. Calcular la carga por presión de colapso en el fondo.

$$P_c = L * G_o$$

3. Determinar qué grado y peso de tubería es capaz de resistir dicha carga aplicando un factor de diseño de 1.125 a la resistencia al colapso de la T. R.

$$R_{cd} = R_c / F_c \quad \dots\dots V.33$$

4. Seleccionar una tubería de menor resistencia al colapso y se calcula cual será la máxima profundidad a la que puede ser introducida, de acuerdo a la ecuación V.25, habiendo aplicado previamente la ecuación V.33 a la resistencia al colapso de esta tubería.

$Lx = Rcd/Go$

.....V.34

5. Comparar  $Lx$  y  $Ln$

- a) Si  $Lx = Ln$  pasar al paso 6
- b) Si  $Lx > Ln$  se considerará que esta tubería está -  
trabajando a compresión por estar bajo del punto  
neutro y se repetirá el procedimiento desde el pa-  
so cuatro para determinar la cima de esta T. R. y  
la base de la siguiente:
- c) Si  $Lx < Ln$  se considerará que se está trabajando  
a tensión, lo que disminuirá su resistencia al co-  
lapso. Por lo que el factor de trabajo al colap-  
so alcanza valores menores al mínimo recomendable  
Para solucionar este problema, existen dos alter-  
nativas:
  - A) Disminuir la profundidad de colocación
  - B) Cambiar esta tubería por una de mayor resis-  
tencia.

Generalmente se opta por la primera opción, dis-  
minuyendo la profundidad de acuerdo al criterio  
y experiencia del diseñador.

En este trabajo se propone un procedimiento más  
razonable y seguro para resolver el problema de  
disminuir la profundidad mediante una aproxima-  
ción.

$$Lxc = \frac{Rcdrx - m * Lx}{Go - m} \quad \dots\dots V.35$$

donde:

$$Rcdrx = Rcd * Yx \quad \dots\dots V.36$$

$$M = 0.005 Rcd (Yx - Ya) \quad \dots\dots V.37$$

Yx y Ya se calculan con las ecuaciones V. 2 y V.3, considerando que el punto 'a' se encuentra situado -- 200 pies arriba del punto "x", el cual se encuentra -- a la profundidad Lx del paso cuatro.

6. Calcular la cima de esta tubería de acuerdo a la máxima carga por presión interna que podría resistir, de acuerdo a ecuación V.30

$$Lx = \frac{Ps - Rid}{(Go - Gg)}$$

donde:

$$Rid = Ri/Fi \quad \dots\dots V.38$$

La presión superficial de acuerdo al gradiente de -- fractura será:

$$Ps = GfL = GgL \quad \dots\dots V.39$$

y de acuerdo a la presión de formación

$$Ps = Le Ge - Gg Le \quad \dots\dots V.40$$

De los dos valores calculados de Ps se tomará el menor:

7. Seleccionar una T. R., de mayor resistencia a la presión interna y al paso 6, los pasos 6 y 7 se repiten hasta llegar a la superficie.
8. Se revisa en el tope de cada sección arriba del punto neutro que las resistencias a la tensión no sean excedidas, aplicando sobre estas un factor de 1.8

$$R_{tjd} = R_{tj} / 1.8$$

.....V.41

#### D. CARGA MAXIMA

El procedimiento de diseño de sartas de tuberías de revestimiento empleando el concepto de "carga máxima", toma en cuenta condiciones de brote, pérdidas de circulación, efecto de esfuerzo biaxial y los factores de diseño. Por supuesto que una tubería de explotación está expuesta a soportar cargas diferentes a las que exponen en tuberías superficiales e intermedias; por lo que el diseño de cada una de estas difiere en las cargas a considerar.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir, aplicado a una tubería intermedia (caso más general); para los otros tipos de tubería de revestimiento el procedimiento presenta algunas variaciones que más adelante se verán.

#### PRESION INTERNA

Se determinan los valores límite de presión interna a que estará expuesta la tubería tanto en superficie como en el fondo del pozo.

El valor de presión interna de superficie es arbitrario y generalmente es la presión de trabajo del equipo superficial usado, normalmente 5000 lib/pg<sup>2</sup>.

La presión interna en el fondo del pozo es igual al gradiente de fractura de la formación esperada inmediatamente abajo de la zapata de la tubería de revestimiento más un factor de seguridad.

Dado que el valor del gradiente de fractura es expresado en términos del peso del lodo, se recomienda agregar un factor de seguridad de 1 lb/gal (0.052 lb/pg<sup>2</sup>/pie), o bien un factor de diseño de 0.1 (comúnmente usado). La presión interna en el fondo del pozo es definida como presión de inyección.

Con los puntos determinados, la carga máxima por presión interna puede ser determinada.

Dado que la carga máxima ocurre cuando los puntos extremos son satisfechos simultáneamente, esta carga se presenta solo bajo condiciones de un brote; una característica del brote es la existencia de más de un fluido en el pozo.

Si el gas es considerado en la cima, su interpretación gráfica sería como se muestra en la línea A de la figura V.6, si se invierte la posición de los fluidos quedarían como se muestra en la línea B, de la misma figura.

Es evidente que la carga ejercida por la línea B, es mayor que la ejercida por la línea A, por lo tanto la configuración de

POSICION RELATIVA DE LOS FLUIDOS

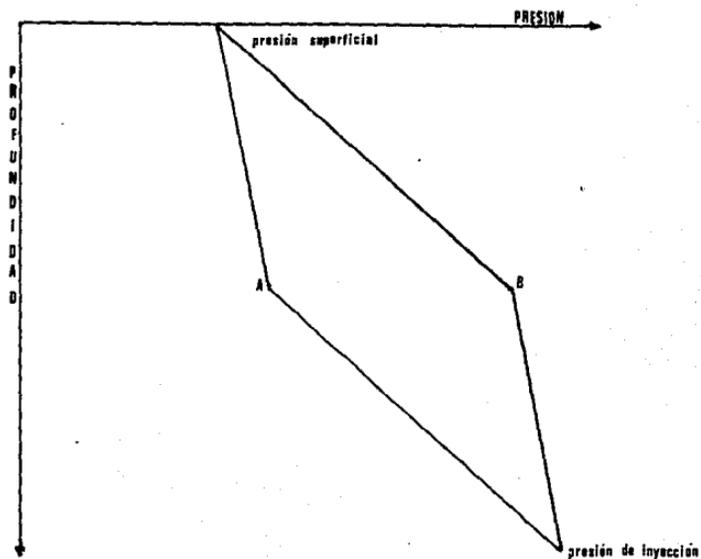


Fig V6

POSICION RELATIVA DE LOS FLUIDOS

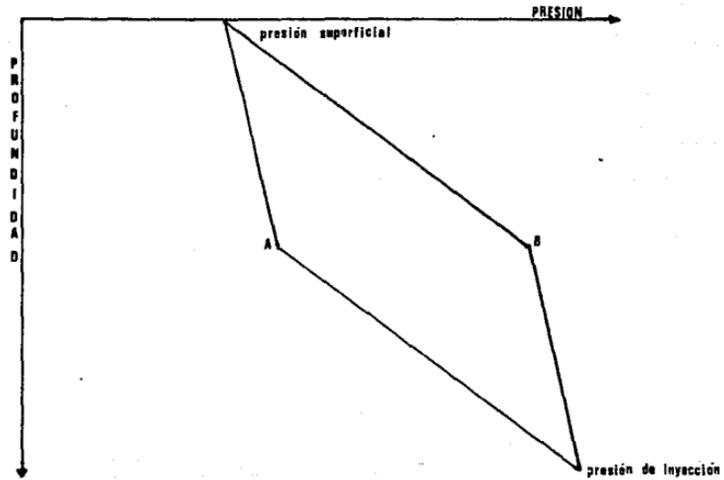


fig V6

finida por la línea B (el peso del fluido de perforación en la - cima y gas en el fondo) constituye la línea de carga máxima por presión interna.

Para determinar la longitud de las columnas de lodo y gas, se usa:

$$L = X_1 + Y_g \quad \text{.....V.42}$$

$$PI = P_{sq} + X_1 r + Y_g G_g \quad \text{.....V.43}$$

$$PI = 0.052 (r_{egf} + F_s)L \quad \text{.....V.44}$$

Con la solución simultánea de estas ecuaciones, la longitud de las respectivas columnas de fluidos pueden ser conocidas; así como la línea de carga máxima por presión interna, esta quedaría como se ilustra en la figura V.7

Conocida la línea de carga máxima por presión interna, es posible conocer la presión de ruptura para cualquier incremento de la profundidad, auxiliándose de la representación gráfica. - Debido a la disminución del peso del fluido que viene detrás de la tubería de revestimiento en contacto con la formación y de -- acuerdo al concepto de carga máxima. Se considera que detrás de la T. R., existe un fluido de respaldo equivalente a una columna de fluido de formación ( $G_s = 0.465 \text{ lb/pq}^2/\text{pie}$ ).

La línea de resistencia a la ruptura o carga de respaldo se muestra en la figura V.8, la resta de la línea de carga máxima - por presión interna menos la línea de respaldo da como resultado

# LINEA DE CARGA MAXIMA POR PRESION INTERNA

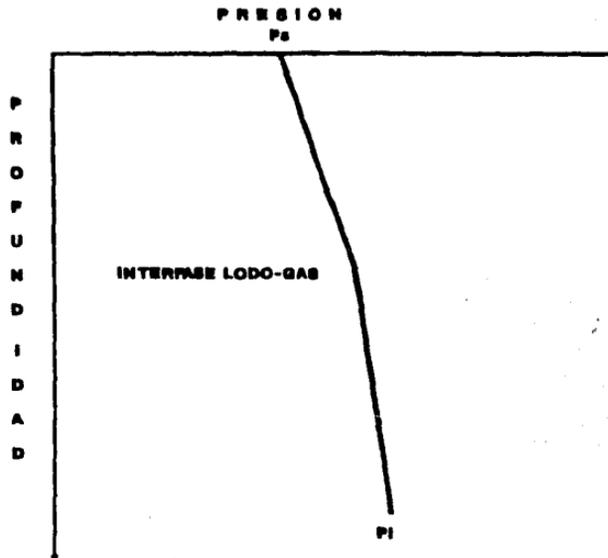


FIG. V.7

# LINEA DE RESPALDO POR PRESION INTERNA

PRESION

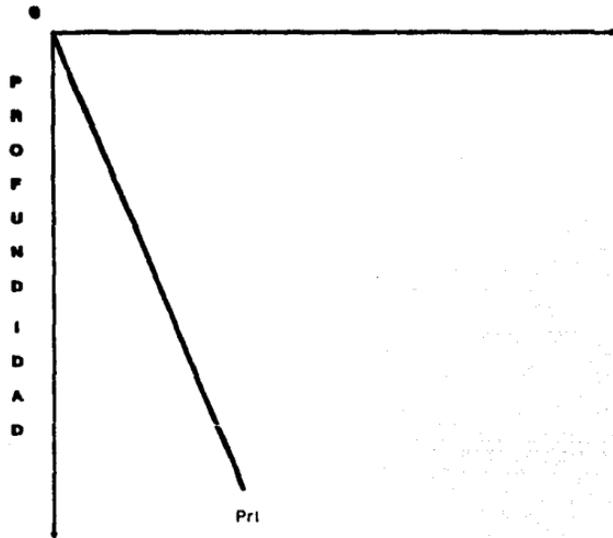


Fig.V.8

la carga de presión o también llamada línea resultante de carga por presión interna, con la que se puede conocer la carga real de presión para cualquier profundidad.

Se requiere un factor de seguridad, este será aplicado a la línea resultante; para obtener la línea de diseño, normalmente se toma un factor de diseño de 1.1 y se construye. La representación gráfica toma la forma mostrada en la figura V.9.

Una vez terminada la línea de diseño, se está en condiciones de seleccionar entre las tuberías disponibles las que tengan especificaciones mayores a las requeridas por la línea de diseño, en cuanto a su resistencia a la presión interna (esto también de acuerdo al menor costo, grado y peso de las tuberías).

La resistencia a la presión interna de las tuberías se grafica y su intersección con la línea de diseño determinará la longitud de la sección, este procedimiento se repite hasta alcanzar la profundidad deseada.

De esta manera se efectúa el diseño por presión interna -- (figura V.10).

Al finalizar esta parte, el diseñador tendrá los pesos, -- grados y longitudes de sección de las tuberías de revestimiento que satisfacen la carga por presión interna. El diseño queda -- pendiente de la evaluación de la carga por colapso.

# LINEA DE DISEÑO POR PRESION INTERNA

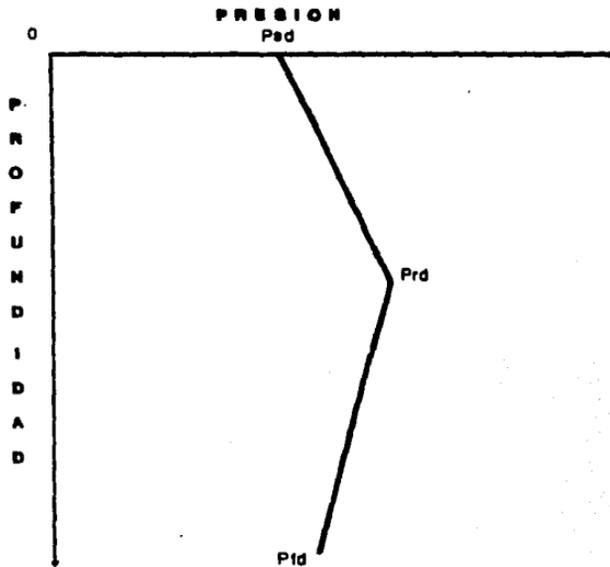


Fig. V.8

# DISEÑO POR PRESION INTERNA

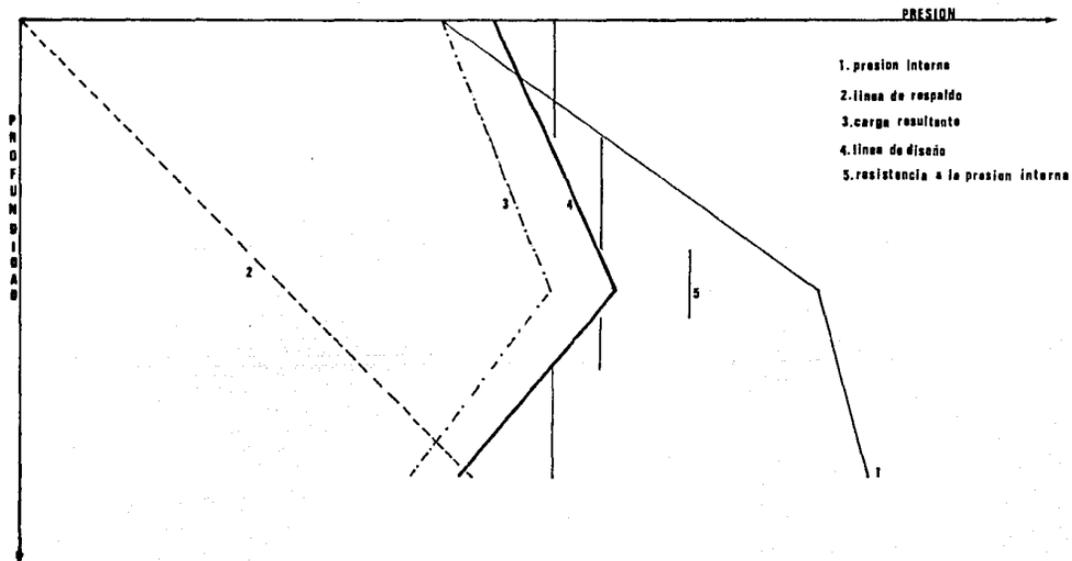


FIG. V.10

### PRESION EXTERNA (COLAPSO)

La carga por colapso para tuberías de revestimiento intermedias, es impuesta por el fluido que se encuentra en el espacio anular y se considera el lodo más pesado a utilizar en la perforación del pozo.

El perfil de presiones que genera la columna de lodo se grafica como se muestra en la figura V.11.

La carga máxima por colapso ocurrirá cuando el nivel del lodo dentro de la tubería de revestimiento descienda como si ocurriera una pérdida de circulación. De ser así en la zapata de la tubería de revestimiento intermedia, es probable que la presión hidrostática ejercida por la reducción de la columna de lodo es igual a la presión ejercida por los fluidos de la formación (gradiente de  $0.465 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$ ), y es equivalente a usar el lodo de la siguiente etapa que ejerza una presión igual a la presión de formación (como fluido de respaldo) construyendo la línea de respaldo y restándola a la línea de carga máxima por colapso, se obtendrá la línea de colapso resultante, como se muestra en la figura V.12.

Aplicando un factor de diseño de 1.125 a el colapso resultante, se obtiene la línea de diseño al colapso (figura V.13).

Sobre la representación gráfica de la línea de diseño el colapso, deberán ser graficadas las resistencias al colapso de las tuberías consideradas por presión interna.

# LINEA DE CARGA MAXIMA POR PRESION EXTERNA

PRESION

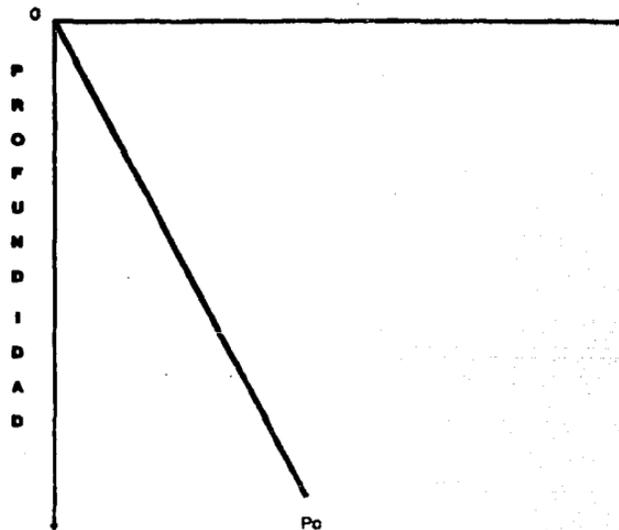


FIG. V.11

# LINEA DE CARGA RESULTANTE POR PRESION EXTERNA

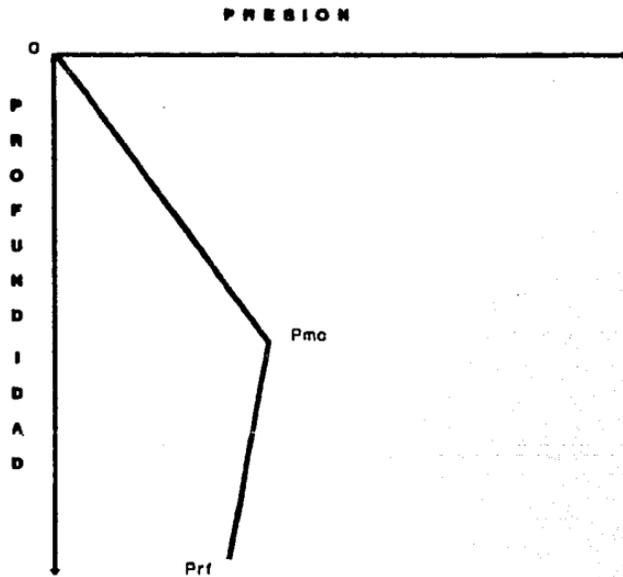


FIG. V.12

# LINEA DE DISEÑO POR PRESION EXTERNA

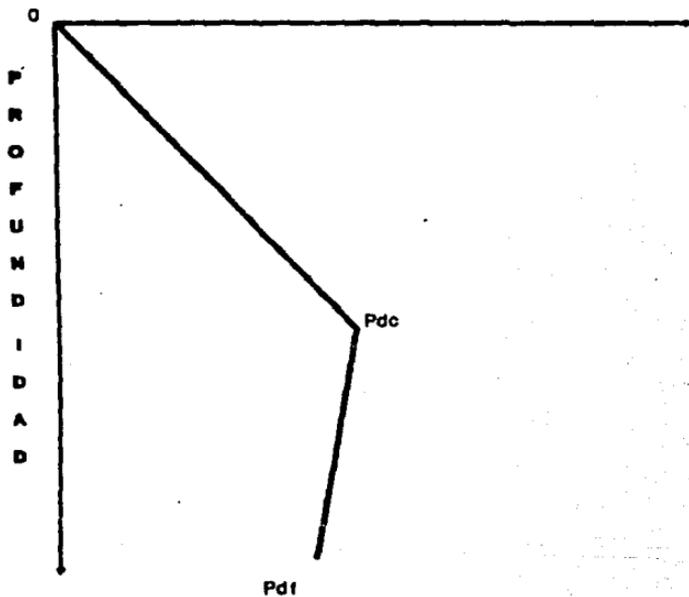


Fig.V-13

Cuando la resistencia al colapso de la tubería cae debajo de la línea de diseño al colapso, la sección deberá ser cambiada por una tubería de grado superior para el colapso. Cuando las -tuberías que satisfacen al colapso ya fueron seleccionadas, y en caso de que si alguna se modificó de las que tenían seleccionadas en presión interna deberá revisarse si cumplen con respecto a ésta, una vez hecho esto, el resultado es un diseño con pesos, grados y longitudes de sección que satisfacen las cargas máximas por presión interna y colapso (figura V.14).

#### TENSION

Conociendo los pesos, grados y longitudes de cada sección según el diseño a presión interna y colapso, se puede determinar la carga por tensión.

El efecto de flotación se interpreta como la reducción del peso de la sarta cuando se encuentra en algún líquido, a diferencia de cuando solo está en el aire; la flotación también se puede expresar como la resultante de fuerzas que actúan sobre todas las áreas expuestas orientadas horizontalmente en la sarta de --revestimiento. Las fuerzas son consideradas negativas (compresión) si actúan hacia arriba, estas fuerzas actúan sobre los extremos y hombros de los tubos, como se muestra en la figura V.15.

Las fuerzas que actúan sobre las áreas del hombre de la T. R., son demasiado pequeñas, razón por la cual son despreciadas en un diseño práctico.

La reducción de la carga observada en el gancho en la su-

# DISEÑO POR PRESION DE COLAPSO

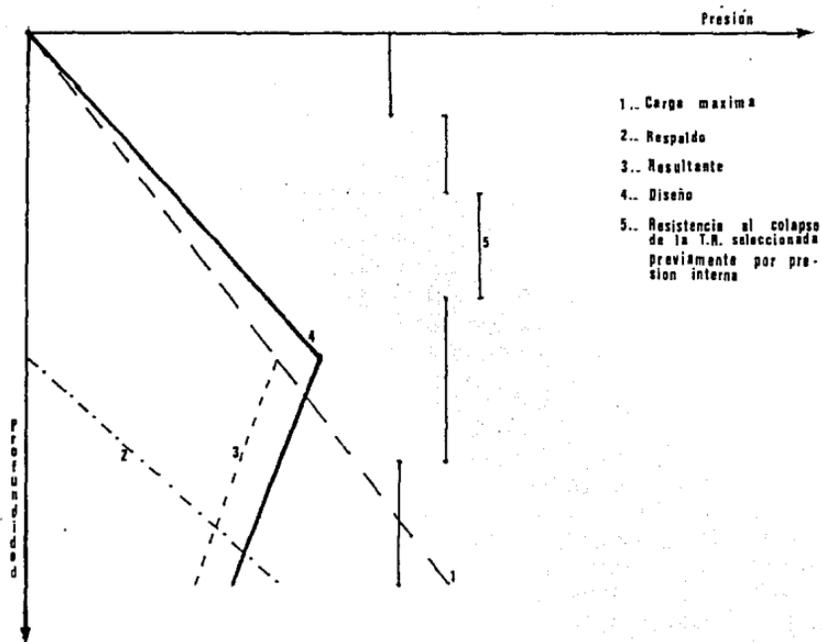


Fig. V.14

# DISEÑO POR PRESION DE COLAPSO

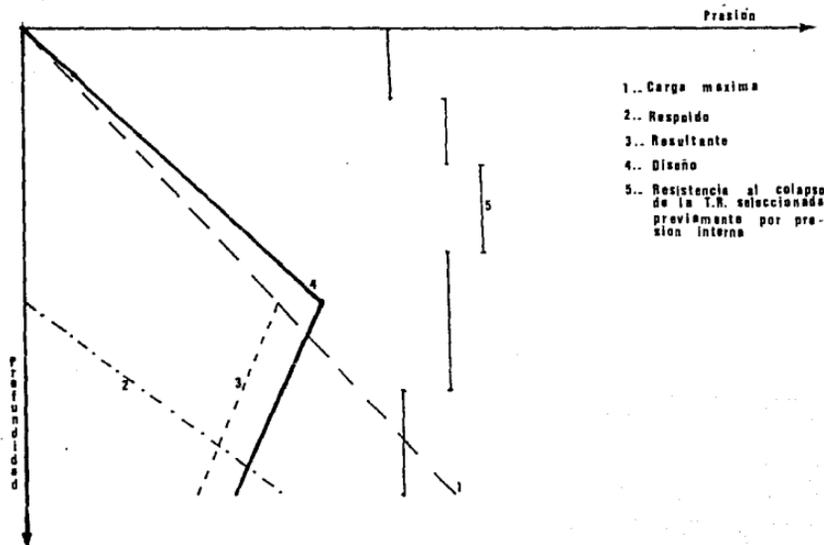
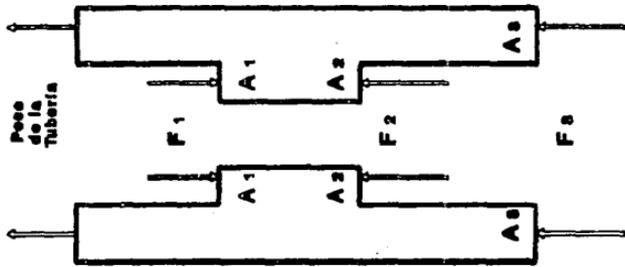


Fig. V.14

# FLOTACION



$$F1 = \sum_{i=1}^n F1$$

$$F1 = F1 - F2 - F3$$

$$= A1P1 - A2P2 - A3P3$$

Fig. 115

DISEÑO A LA TENSIÓN

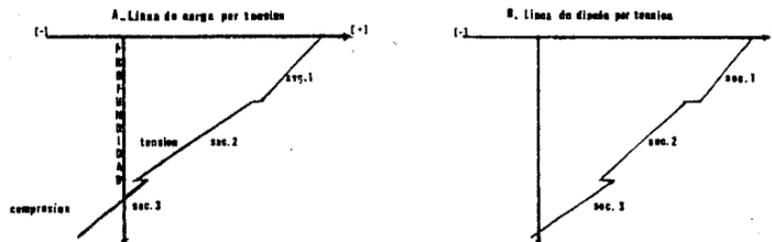


fig. V.10

perficie, es por el efecto de flotación, equivalente al peso del volumen del líquido desplazado. Una vez que la magnitud y localización de las fuerzas son determinadas, la línea de carga por tensión puede ser elaborada (figura V.16.a)

Es de tomarse en cuenta que más de una sección de la sarta de tubería de revestimiento puede ser cargada en compresión

El siguiente paso es obtener la línea de diseño para la -- tensión, el valor recomendado como factor de diseño es 1.8 ó - - 100,000 lb; sin embargo, esto depende del criterio del diseñador.

Utilizando el factor de diseño, la gráfica queda como se muestra en la figura V.16.b.

En la mayor parte de los diseños, la parte más débil de la tubería de revestimiento en tensión es el cople; por lo tanto, - la línea de diseño por tensión se usa para determinar el tipo de cople a emplear.

Al concluir este diseño, la sarta ya ha sido diseñada por presión interna, colapso y tensión; definiéndose las pesos, grados, longitudes de las secciones y tipos de cople, sólo resta de terminar las reducciones en la resistencia por presión interna - y colapso causado por la carga biaxial, esta reducción se calcula usando la ecuación de la elipse de esfuerzo biaxiales.

Con los valores reducidos conocidos en los extremos de cada sección, una nueva línea de esfuerzos se puede construir co-

nectando los puntos extremos con una línea recta, y de esta manera concluye el diseño de la sarta.

El procedimiento antes indicado es usado cuando se trata de una tubería de revestimiento intermedia y dado que el procedimiento presenta variaciones al tratarse de algún otro tipo de tubería de revestimiento, a continuación se mencionan las principales variantes:

#### Tubería de Revestimiento Superficial.

##### Presión Interna

Se determina la presión de inyección en la zapata y tomando una columna de gas ( $G=0.115 \text{ lb/ptg}^2/\text{pie}$ ), se calcula la presión en superficie que será igual a la presión de inyección menos la columna de gas.

##### Presión de Colapso

Se utiliza la densidad del lodo para perforar el pozo, sin considerar carga de respaldo.

##### Tensión y Reducción Biaxial

Los cálculos se realizan igual que para tubería intermedia.

#### Tubería de Revestimiento de Explotación.

##### Presión Interna

Por tratarse de una tubería de explotación, esto involucra

varias suposiciones, una de éstas es que el fluido de empa- -  
camiento es igual en densidad al peso del lodo en el espacio anu- -  
lar. Otra suposición es que la tubería de revestimiento puede -  
quedar expuesta a la presión del fondo del pozo si la tubería --  
presentara alguna rotura. De ser así, el gas pasa al espacio --  
anular, y la máxima presión interna puede ocurrir con la presión  
de la formación actuando sobre la presión hidrostática del flui-  
do empacador.

La presión de formación para estos cálculos se puede deter-  
minar a partir de registros de presión o tomando el peso del lo-  
do utilizado para terminar el pozo. Otra variante es considerar  
el gradiente de fractura y la presión de inyección para el dise-  
ño.

#### Presión de Colapso

La carga por colapso se debe a la presión hidrostática del  
lodo más pesado actuando sobre la sarta, considerando el factor  
de diseño.

#### Tensión.

Tanto la tensión como la reducción por esfuerzo biaxial no  
presentan cambios a lo indicado para una sarta intermedia.

Este procedimiento de diseño de sartas de tubería de reve-  
stimiento se presentó de una manera general, se recomienda que --  
cada área deberá ser evaluada para sus condiciones específicas  
de carga máxima.

## EJEMPLO:

Diseñar una tubería de revestimiento intermedia de 9 5/8" de diámetro, que estará asentada a 11480 pies. El peso específico del fluido de perforación usado es de 12.5 lb/gal.

La siguiente etapa se perforará con barreno de 8" hasta -- una profundidad de 13890 pies, con un lado de 14.6 lb/gal.

El gradiente de fractura en la zapata es de 0.82 lb/gal/-- pie.

La presión superficial del equipo es de 5000 lb/pg<sup>2</sup>.

Los factores de diseño son los siguientes:

Presión interna:  $F_i = 1.125$

Presión de colapso:  $F_c = 1.125$

Tensión:  $F_t = 1.8$

Resolver por todos los métodos.

SOLUCION: METODO ANALITICO

- Determinar la presión de fondo máxima.

$$P_f = 0.052 \text{ rL}$$

$$= 0.052 * 12.5 * 11480$$

$$P_f = 7462 \text{ lb/pg}^2$$

- Determinar la presión interna máxima.

$$P_{me} = P_s e^{(34 \times 10^{-6} r_{rg} * L)}$$

donde:

$$P_s = e^{\frac{0.052 L_e * r_e}{(34 \times 10^{-6} * r_{rg} * L_e)}}$$

$$e^{\frac{0.052 * 13490 * 14.6}{(34 * 10^{-6} * 0.545 * 13490)}} =$$

$$e^{\frac{10241.6}{0.25}} = 7976.2$$

entonces:

$$P_{me} = 7976.2 e^{(34 \times 10^{-6} \times 0.545 \times 11480)} = 9866.9$$

$$P_{me} = 9866.9 \text{ lb/pg}^2$$

3. Se aplican los factores de diseño.

$$P_c = P_f * F_c = 7462 \times 1.125 = 8395 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_i = P_{me} * F_i = 9866.9 \times 1.125 = 11100 \text{ lb/pg}^2$$

4. Orden y selección:

Las T. R., que pueden utilizarse para el diseño son -  
las siguientes:

Grado	P. U. (lb/pie)	R. c.	R. i.	R t (1000 lb)		
				8 H.r.r.	Butt	Cuerpo
V-150	43.5	4750	11860	1483	1818	1884
V-150	47	6010	12870	1628	1965	2036
TAC-140	43.5	7280	11630	1438	1734	1846
V-150	53.5	8970	14860	1909	2251	2332
TAC-140	47	9260	12620	1570	1874	1995
TAC-110	53.5	10530	12390	1581	1846	1943
TAC-140	53.5	11640	14570	1850	2146	2285

De las primeras cuatro tuberías de revestimiento, se selecciona la T. R., grado TAC-110-53.5 lb/pie 8 H.r.r. por ser la menos cara, además de resistir los esfuerzos para ser introducida al fondo, siendo la primera sección.

Como segunda sección se selecciona la T. R., de grado TAC-140 de 43.5 lb/pie 8H.r.r.

5. Cálculo de la profundidad del punto de enlace.

$$a) L_1 = \frac{R_c}{0.052 \times r \times F_c} = \frac{7280}{(0.052) (12.5) (1.125)} = 9956 \text{ pies.}$$

$$b) W_1 = (L - L_1) P_u \times F_f$$

$$F_f = 1 - (r/r_a) = 1 - (12.5/65.4) = 0.809$$

$$W_1 = (11480 - 9956) 53.5 \times 0.809 = 65961 \text{ lb}$$

$$c) X = \frac{W_1}{Y_m A_s}$$

$$As = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2) = \frac{3.1416}{4} (9.621^2 - 8.755^2) = 12.56$$

 $pg^2$ 

$$x = \frac{65961}{(140000)(11.56)} = 0.0375$$

$$y = (1 - 0.75 \times 2)^{1/2} - 0.5 x = (1 - 0.75 * (0.0375)^2)^{1/2}$$

$$- 0.5(0.0375)$$

$$y = 0.98$$

$$Rcc = Rc * y = (7280) (0.98) = 7134.4 \text{ lb/pg}^2$$

$$Fct = \frac{Rcc}{(0.052)(Lx)} = \frac{7139.4}{(0.052)(12.5)(9956)} =$$

$$1.102$$

Comparación de  $F_c$  y  $F_{ct}$   $1.125 > 1.102$ .

$$L1 = \frac{7134.4}{(0.052)(12.5)(1.125)} = 9756.4$$

$$W1 = (11480 - 9756.4) 53.5 \times 0.809 = 74600 \text{ lb}$$

$$x = \frac{74600}{(140000)(12.56)} = 0.042$$

$$y = (1 - (0.75) (0.042)^2)^{1/2} - 0.5 (0.042) = 0.978$$

$$Rcc = (7280) (0.978) = 7122 \text{ lb/pg}^2$$

$$Fct = \frac{7122}{(0.052)(12.5)(9756.4)} = 1.123$$

$$L_1 = \frac{1.123 \times 7122}{(0.052)(12.5)(1.125)} = 9739 \text{ pies}$$

$$W_1 = (11480 - 9739) 53.5 \times 0.809 = 75353 \text{ lb}$$

$$X = \frac{75353}{(140000)(12.56)} = 0.0428$$

$$Y = (1 - 0.75 (0.0428)^2)^{1/2} = 0.5 (0.0428) = 0.978$$

$$R_{cc} = (7280) (0.978) = 7119 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{ct} = \frac{7119}{(0.052)(12.5)(9739)} = 1.125$$

$$1.125 = 1.125 \dots$$

6. Diseño por tensión: se revisa el factor de trabajo - a la tensión de la cima.

$$F_{tj} = \frac{R_{tj}}{W_1} = \frac{158000}{75353} = 21 \dots$$

7. La primera sección será de grado TAC-110 53.5 lib/pie  
8 H.r.r. de 11488 pies a 9739 pies.  
la siguiente tubería seleccionada es:

V-150 47 lb/pie 8 H.r.r.

La cual será la tercera sección.

pasamos al paso 5 para determinar la profundidad del

punto de enlace para esta T. R.

$$5'. \quad L2 = \frac{6010}{(0.52)(12.5)(1.125)} = \frac{6010}{0.73125} = 8215$$

$$W2 = W1 + (L1 - L2)(Pu)(Ff)$$

$$= 75353 + (9739 - 8219)(43.5)(0.809) = 128844$$

$$X = \frac{W2}{\gamma_m A_s} ; \quad A_s = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} (9.625^2 - 8.681^2) = 13.57 \text{ pg}^2.$$

$$X = \frac{128844}{(150000)(13.57)} = \frac{128844}{2035500} = 0.0633$$

$$Y = (1 - 0.75(0.0633))^2)^{1/2} - 0.5(0.0633) = 0.967$$

$$R_{cc} = (6010)(0.967) = 5811 \text{ lb/pg}^2$$

$$F_{ct} = \frac{5811}{(0.012)(12.5)(8219)} = 1.088 < 1.125 \therefore$$

$$L2 = \frac{5811}{0.73125} = 7947 \text{ pies}$$

$$W2 = 75353 + (9739 - 7947)(43.5)(0.809) = 138416$$

$$X = \frac{138416}{2035500} = 0.068$$

$$Y = 0.964$$

$$R_{cc} = 6010 \times 0.964 = 5795$$

$$Fct = \frac{5795}{(0.052)(12.5)(7947)} = 1.122 < 1.125 \therefore$$

$$L2 = \frac{5795}{0.73125} = 7924 \text{ pies}$$

$$W2 = 75 \ 353 + (9739 - 7924) (43.5) (0.809) = 139226$$

$$X = \frac{139226}{2 \ 035500} = 0.066$$

$$Y = 0.964$$

$$Rcc = 6010 \times 0.964 = 5795$$

$$Fct = \frac{5795}{(0.052)(12.5)(7947)} = 1.122 < 1.125 \therefore$$

$$L2 = \frac{5795}{0.73125} = 7924 \text{ pies}$$

$$W2 = 75353 + (9739 - 7924) (43.5) (0.809) = 139226$$

$$X = \frac{13922.6}{2 \ 035 \ 500} = 0.068$$

$$Y = 0.964$$

$$Rcc = 6010 \times 0.964 = 5794 \text{ lb/pg}^2$$

$$Fct = \frac{5794}{(0.052)(12.5)(7924)} = 1.125$$

$$1.125 = 1.125 \therefore$$

- 6'. Diseño por tensión; revisión del factor de trabajo -- por tensión.

$$F_{tj} = \frac{R_{tj}}{W_2} = \frac{1438000}{139226} = 10.3 > 2.0 \therefore$$

- 7'. La segunda sección será de grado:

TAC-140 de 43.5 lb/pie - 8H.r.r. de 9739 pies a - - 7924 pies.

La siguiente tubería es:

V-150 de 43.5 lb/pie, 8H.r.r. que será la cuarta sección.

Regresamos al paso 5 para determinar el punto de enlace con la T. R. anterior.

$$5'' \quad L_3 = \frac{4750}{0.73125} = 6496 \text{ pies}$$

$$W_3 = W_2 + (L_2 - L_3) P_{v3} * F_f$$

$$W_3 = 139226 + (7924 - 6496) (47) (0.809) = 193523$$

$$X = \frac{193523}{(150000) (12.57)} = 0.1026$$

$$Y = 0.945$$

$$R_{cc} = 4750 \times 0.945 = 4487$$

$$Fct = \frac{4487}{(0.052)(12.5)(6496)} = 1.063 < 1.125 \therefore$$

$$L3 = \frac{4487}{0.73125} = 6136$$

$$W3 = 139226 + (7924 - 6136)(47)(0.809) = 207211$$

$$X = \frac{207211}{(150000)(12.57)} = 0.1099$$

$$Y = 0.941$$

$$Rcc = 4750 \times 941 = 4467$$

$$Fct = \frac{4467}{(0.052)(12.5)(6136)} = 1.120 < 1.125 \therefore$$

$$L3 = \frac{4467}{0.73125} = 6.109 \text{ pies}$$

$$W3 = 139226 + (7924 - 6109)(47)(0.809) = 208238 \text{ lb}$$

$$X = \frac{208238}{(150000)(12.57)} = 0.1104 ; Y = 0.940$$

$$Rcc = 4750 \times 0.940 = 4466 \text{ lb/pg}^2$$

$$Fct = \frac{4466}{(0.052)(12.5)(6109)} = 1.125$$

$$1.125 = 1.125$$

6''. Diseño por tensión, revisión de factor de trabajo por tensión en la junta.

$$F_{tj} = \frac{1628000}{208238} = 7.8 > 2.0 \therefore$$

7''. La tercera sección será

V-150 de 47 lb/pie 8H.r.r. de 7924 pies a 6109 pies.

Como ya no se tienen más tuberías que puedan ser introducidas, la cuarta sección será la última tubería seleccionada.

V-150 de 43.5 lb/pie 8H.r.r.

Sólo falta revisar el factor de trabajo por tensión para esta tubería que se extenderá hasta la superficie

$$W_4 = W_3 + (L_3 - 0) (P_{u4}) (F_f) =$$

$$= 208\,238 + (6109 - 0) (43.5) (0.809) = 423,223 \text{ lb.}$$

$$F_{tj} = \frac{1\,483\,000}{423\,223} = 3.5 > 2 \therefore$$

La cuarta sección será:

V-150 de 43.5 lb/pie 8H.r.r. de 6109 pies a superficie

Finalmente el diseño para T.R.9 5/8" es el siguiente:

INTERVALO (pies)	GRADO	PESO (lb/pie)	TIPO DE JUN- TA
de 0 a 6109	V-150	43.5	8 H.r.r.
6109 - 7924	TAC-150	47	8 H.r.r.
7924 - 9739	TAC-140	43.5	8 H.r.r.
9739 - 11480	TAC-110	53.5	8 H.r.r.

SOLUCION: GRAFICAS DE DISEÑO YOUNGSTOWN

En la figura V.4., puede verse el diseño por medio de las gráficas Youngstown, cuyos resultados se muestran a continuación:

INTERVALO (pies)	GRADO	PESO (Pies)	CONEXION	LONGI-- TUD (pies)
11480 - 10850	V-150	53.5	8 H.r.r.	630
10850 - 8700	P-110	53.5	8 H.r.r.	2 150
8700 - 7700	N-80	53.5	8 H.r.r.	1 000
7700 - 6700	V-150	47.0	8 H.r.r.	1 000
6700 - 5700	P-110	47.0	8 H.r.r.	1 000
5700 - 4300	N-80	47.0	8 H.r.r.	1 400
4300 - 3280	N-80	43.5	8 H.r.r.	1020
3280 - 0	N-80	40	8 H.r.r.	3 280

Las T.R. V-150; y P-110, de 47 lb/pie se eliminan y la T. R. N=80 de 53.5 lb/pie se alarga hasta 5700 pies por ser menos cara.

Como el peso total de la sarta es de 445 000 libras (considerando flotación) y la resistencia de la junta de la T. R., N-80 de 40 lb/pie es de solo 737000 libras (409 000 con Fr = 1.8)

entonces se cambia la conexión a rosca Buttress.

Finalmente el diseño resulta en las siguientes secciones:

SECCION	INTERVALO	GRADO	PESO	CONEXION	LONGITUD
1	0-3280	N-80	40	BUTTRES	3280
2	3280-4300	N-80	43.5	8 H.r.r.	1020
3	4300-5700	N-80	47	8 H.r.r.	1400
4	5700-8700	N-80	53.5	8 H.r.r.	3000
5	8700-10850	P-110	53.5	8 H.r.r.	2150
6	10850-11480	V-150	53.5	8 H.r.r.	630

#### SOLUCION METODO PRACTICO

1. Calcular la profundidad de el punto neutro.

$$L_n = L \left( 1 - \frac{r}{CS.4} \right) = 11480 \left( 1 - \frac{12.5}{(.5.4)} \right) = 9286$$

$$L_n = 9286 \text{ pies}$$

2. Calcular la presión de colapso en el fondo.

$$P_c = L * G_o = 11480 (0.052 \times 12.5) = 7462$$

$$P_c = 7462 \text{ lb/pg}^2$$

3. Seleccionar la primera sección:

aplicando factor de diseño

$$P_c \text{ diseño} = 7462 \times 1.125 = 8395 \text{ lb/pg}^2$$

de acuerdo a tablas de propiedades mecánicas de costos la T. R., más ligera y económica que puede ser introducida y que soportará la carga por colapso calculada es la TAC-95 de 53.5 lb/pie 8 H.r.r.

TAC-95 53.5 lb/pie

$$Rc = 9380 \text{ lb/pg}^2 \quad (Rcd = 8338 \text{ considerando } Fc = 1.125)$$

$$Ri = 10900$$

$$Rtt = 1\,393\,000 \text{ lb}$$

4. La T. R. más económica y que puede ser introducida a mayor profundidad es:

P-110 - 53.5 lb/pie - 8 H.r.r.

$$Rc = 7930 \text{ lb/pg}^2 \quad (Rcd = 7049 \text{ lb/pg}^2 \text{ considerando } Fc = 1.125)$$

$$Ri = 10,900 \text{ lb/pg}^2$$

$$Rtt = 1\,422\,000 \text{ lb}$$

$$Lx = Rcd/Go = \frac{7049}{(0.052 \times 12.5)} = 10845 \text{ pies}$$

5. Comparación de Lx y Ln

$$10845 > 9286 \text{ .}$$

- 1a. Sección TAC-95 de 53.5 lb/pie 8 H.r.r. de 11480 -

10845 pies.

Se repite desde el paso 4.

- 4'. La T. R. más económica que puede resistir un colapso considerable es:

N-80 - 53.5 lb/pie - 8 H.r.r.

$$R_c = 6\,620 \text{ lb/pg}^2 \text{ (5884 lb/pg}^2 \text{ considerando } F_c = 1.125)$$

$$R_i = 7930 \text{ lb/pg}^2 \text{ (7048 lb/pg}^2 \text{ considerando } F_c = 1.125)$$

$$R_{tt} = 1062\,000 \text{ lb (590\,000 considerando } F_c = 1.8)$$

$$L_x = \frac{5884}{0.052 \times 12.5} = 9052 \text{ pies}$$

- 5' 9052 < 9286 , se corregirá  $L_x$  para evitar que la T. R. N-80 53.5 lb/pie falle por colapso debido al efecto de tensión.

Calcular el peso en "X" y en "a"

$$W_x = P_u * (L_n - L_x)$$

$$W_x = 53.5 \times (L_n - L_x) = 53.5 (9286 - 9052) = 12\,519 \text{ lb}$$

$$W_a = P_u(200) + W_x$$

$$W_a = 53.5 (200) + W_x = 10700 + 12.519 = 23219 \text{ lb}$$

Calcular la reducción al colapso en "x" y en "a"

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d - d_i)^2 = \frac{3.1416}{4} (9.625 - 8.535^2) = 15.546 \text{ pg}^2$$

$$X_x = \frac{W_x}{A_s Y_a} = \frac{12519}{15.546 \times 80000} = 0.010$$

$$X_a = \frac{23219}{15.546 \times 80000} = 0.019$$

$$Y_x = (1.075 x_x^2)^{0.5} - 0.5 x_x = (1 - 0.75 x_x \times 0.01^2)^{0.5} - 0.5 \times 0.01 = 0.995$$

$$Y_a = (1 - 0.75 x_a \times 0.019^2)^{0.5} = 0.5 \times 0.019 = 0.990$$

Corregir  $L_x$

$$M = 0.005 R_{cd} (Y_x - Y_a) = 0.005 \times 5884 (0.995 - 0.990) = 0.1471.$$

$$R_{cd} x = R_{cd} + Y_x = (5884) (0.995) = 5855$$

$$L_{xc} = \frac{R_{cd} x - m \cdot L_x}{G \cdot c - m} = \frac{5855 - 0.1471 \times 9052}{(0.052 \times 12.5) - 0.1471} = \frac{4523.5}{0.5029} = 8995 \text{ pies}$$

La segunda sección será:

P-110 de 53.5 lb/pie, 8 H.r.r. de 10845 - 8995 pies.

6. Cálculo de la cima de la T. R. N-80, 53.5 lb/pie 8H.  
r.r.

- a) Cálculo de la presión superficial  $P_s$   
- de acuerdo al gradiente de fractura.

$$P_s = G_f L - G_g L = 0.82 (11480) - (0.115) (11480) = 8093 \text{ lb/pg}^2$$

- de acuerdo a la presión de formación

$$P_s = L_e G_o - G_g L_e = (13490) (0.052 \times 14.6) - (0.115) (13490)$$

$$P_s = 8690 \text{ lb/pg}^2$$

$$\therefore P_s = 8093 \text{ lb/pg}^2$$

b)

$$L_x = \frac{P_s - R_{id}}{G_o - G_g} = \frac{8093 - 7048}{0.65 - 0.115} = 1953$$

La tercera sección será:

N-80 - 53.5 lb/pie 8H.r.r. de 8995 a 1953 pies.

7. De las T. R. que se pueden conseguir con mayor resistencia a la presión interna, que la N-80 de 53.5 lb/pie, la más

económica es:

P-110 de 43.5 lb/pie 8 H.r.r.

$$R_c = 4430 \text{ lb/pg}^2 \text{ (3938 lb/pg}^2 \text{ aplicando } F_c = 1.125)$$

$$R_i = 8700 \text{ lb/pg}^2 \text{ (7733 lb/pg}^2 \text{ aplicando } F_i = 1.125)$$

$$R_{tt} = 1\,106\,000 \text{ lb (614,000 lb aplicando } F_t = 1.8)$$

6' Cálculo de la cima de la T. R. P-110 de 43.5 lb/pie

$$L_x = \frac{8093 - 7733}{0.65 - 0.115} = 673 \text{ pies}$$

la cuarta sección será:

P-110 - 43.5 lb/pie - 8 H.r.r. 1953 a 673 pies.

7' La T. R. más económica y con mayor resistencia a la presión interna que la P-110 de 43.5 lb/pie es:

TAC-95 - 47 lb/pie 8 H.r.r.

$$R_c = 7100 \text{ lb/pg}^2 \text{ (6311 considerando } F_c = 1.125)$$

$$R_i = 9440 \text{ lb/pg}^2 \text{ (8391 considerando } F_c = 1.125)$$

$$R_{tt} = 1\,188\,000 \text{ lb (660\,000 considerando } F_c = 1.8)$$

6'' . Cálculo de la cima de esta T. R.

$$Lx = \frac{8093 - 8391}{8.65 - 0.115} = - 557 \quad \therefore \quad Lx = 0$$

la quinta sección será:

TAC-15 de 47 lb/pie, 8 H.r.r. de 673 a 0 pies.

8. Revisión por tensión, arriba del punto neutro.

SECCIONES (pies)	GRADO	P.U. (lb/pie)	LONGITUD (pies)	W (lb)	WT (lb)	Rtt (1000lb)	Rtt'd (1000lb)	Ftt
de 9286 - 8995	P-110	53.5	291	15569	15569	1422	790	91.3
de 8995 - 1953	N-80	53.5	7042	376747	392316	1062	590	2.7
de 1953 - 673	P-110	43.5	1280	55680	447996	1106	614	2.4
de 673 - 0.	TAC-95	47	673	31631	479627	1188	660	2.4

Finalmente el diseño queda como se muestra:

SECCION	GRADO	P.U. (lb/pie)	TIPO DE JUNTA DE	A	LONGITUD (pie)
1o.	TAC-95	47	8H.r.r.	0	673
2o.	P-110	43.5	8H.r.r.	673	1953
3o.	N-80	53.5	8H.r.r.	1953	8995
4o.	P-110	53.5	8H.r.r.	8995	10845
5o.	TAC-95	53.5	8H.r.r.	10845	11480
					635

SOLUCION METODO DE CARGA MAXIMA

DISEÑO POR PRESION INTERNA:

Se determina la presión de inyección de acuerdo al gradiente de fractura.

$$PI = 0.052 (\text{regf} + F_s) L$$

$$\text{regf} = Gf / 0.052 = \frac{0.82}{0.052} = 15.7 \text{ lb/gal}$$

$$PI = 0.052 (15.7 + 1) 11480 = 9969 \text{ lb/pg}^2$$

determinación de las columnas de lodo y gas:

$$PI = P_{sq} + X_1 G_e + Y_g G_g$$

como:

$$L = X_1 + Y_g ; \quad X_1 = L - Y_g$$

$$9969 = 5000 + (11480 - Y_g) (0.7592) + Y_g (0.115)$$

$$4969 = 8715.6 - 8.7592 Y_g + 0.115 Y_g$$

$$- 3746.6 = Y_g (0.115 - 0.7592)$$

$$Y_g = \frac{- 3746.6}{- 0.6442} = 5815.9 \text{ .}$$

$$Y_g = 5815.9 \text{ pies}$$

la profundidad de la columna de lodo será:

$$X1 = 11480 - 5815.9 = 5664.1 \text{ pies}$$

la presión estimada a 5664.1 pies, es:

$$P_x = P_{sq} + X1 G_e$$

$$P_x = 5000 + (5664.1) (0.7592)$$

$$P_x = 9300 \text{ lb/pg}^2$$

considerando la carga de respaldo, igual a una columna de fluido de gradiente  $0.465 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$ , la presión que ejerce esta columna en el fondo es:

$$P_{fr} = G_s L$$

$$P_{fr} = 0.465 (11480)$$

$$P_{fr} = 5338.2 \text{ lb/pg}^2$$

a la profundidad de 5664.1 pies, el fluido de respaldo - - ejerce una presión de:

$$P_{xr} = X1 G_s$$

$$P_{xr} = (5664.1) (0.465) = 2633.8$$

$$P_{xr} = 2633.8$$

Restando de la línea de carga máxima la línea de respaldo, se obtiene la línea resultante, que se obtiene de la siguiente manera:

en superficie:

$$Prs = Psq = 5000 \text{ lb/pg}^2$$

a 5664.1 pies

$$Prx = Px - Pxr = 9300 - 2633.8 = 6666.2 \text{ lb/pg}^2$$

a la profundidad total :

$$Prf = PI - Pfr = 9969 - 5338.2 = 4630.8 \text{ lb/pg}^2$$

Finalmente se obtiene la línea de diseño, aplicando un fac tor de 1.125, se tiene.

$$\begin{aligned} Pds &= Prs \text{ Fi} & Pdx &= Prx \text{ Fi} & Pdf &= Prf \text{ Fi} \\ &= (5000) (1.125) & &= (6666.2) (1.125) & &= (4630.8) (1.125) \\ Pds &= 5625 \text{ lb/pg}^2 & Pdx &= 7499.5 \text{ lb/pg}^2 & Pdf &= 5209.7 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

Con estos puntos se construye la línea de diseño por pre-- sión interna.

Hecho esto se procede a seleccionar las tuberías a usar, - se ordenan de mayor a menor resistencia a la presión inter na de diseño, de acuerdo con esto, se tiene:

(Las tuberías con resistencia a la presión interna menor - que la presión del equipo superficial no se toman en cuenta).

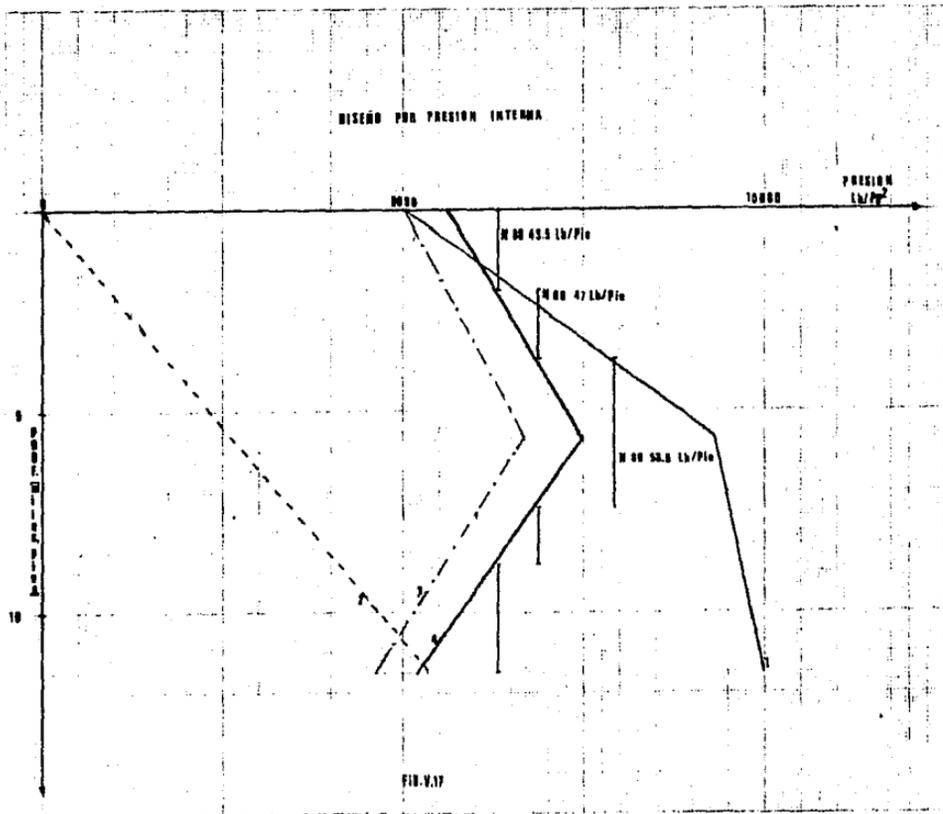
GRADO	PESO (lb/pie)	PRESION INTERNA (lb/pg <sup>2</sup> )	PRESION COLAPSO (lb/pg <sup>2</sup> )
N-80	53.5	7930	6620
C-95	43.5	7520	4130
C-75	53.5	7430	6380
N-80	47	6870	4750
C-95	40	6820	3330
C-75	47	6440	4630
N-80	43.5	6330	3810
C-75	43.5	5930	3750
N-80	40	5750	3090
C-75	40	5390	2980

En la figura V.17, se grafican las resistencias a la presión interna hasta intersectar la línea de diseño.

Las tuberías seleccionadas y sus profundidades se muestran en la misma figura.

El diseño por presión interna queda así:

INTERVALO de a	GRADO	PESO (lb/pie)	LONGITUD (pies)
0 - 2000	N-80	43.5	2000
2000 - 3700	N-80	47.0	1700
3700 - 7400	N-80	53.5	3700
7400 - 8800	N-80	47.0	1400
8800 - 11480	N-80	43.5	2680



## DISEÑO POR COLAPSO

Para el diseño por colapso, la línea de carga máxima partirá de cero en la superficie y en fondo será:

$$P_c = L * G_1$$

$$= 11480 (0.65)$$

$$P_c = 7462 \text{ lb/pg}^2$$

puesto que la carga máxima por colapso ocurrirá cuando el nivel de lodo descienda como si ocurriera una pérdida de circulación, se calcula la longitud de la columna de lodo que soporte la formación, tomando el gradiente de lodo de mayor densidad por usar. La presión en el fondo del pozo es:

$$P_e = L_p * G_e$$

además:

$$P_e = L * G_s ; (G_s = 0.465 \text{ lb/pg}^2/\text{pie})$$

$$P_e = 11480 (0.465) = 5338.2 \text{ lb/pg}^2$$

Por lo tanto la longitud  $L_p$  será:

$$L_p = \frac{P_e}{G_e}$$

$$= \frac{5338.2}{0.7592}$$

$$L_p = 7031.34 \text{ pies.}$$

la profundidad a que se encuentra el fluido de perforación de la siguiente etapa es:

$$\begin{aligned} X_e &= L - I_p \\ &= 11480 - 7031.34 \end{aligned}$$

$$X_e = 4448.6 \text{ pies}$$

De esta manera la línea de carga máxima para el colapso, - así como la de respaldo, se construyen y se muestran en la figura V.18.

Hecho esto se está en condiciones de encontrar la carga - resultante, que se obtiene mediante la diferencia de la carga -- máxima menos la de respaldo.

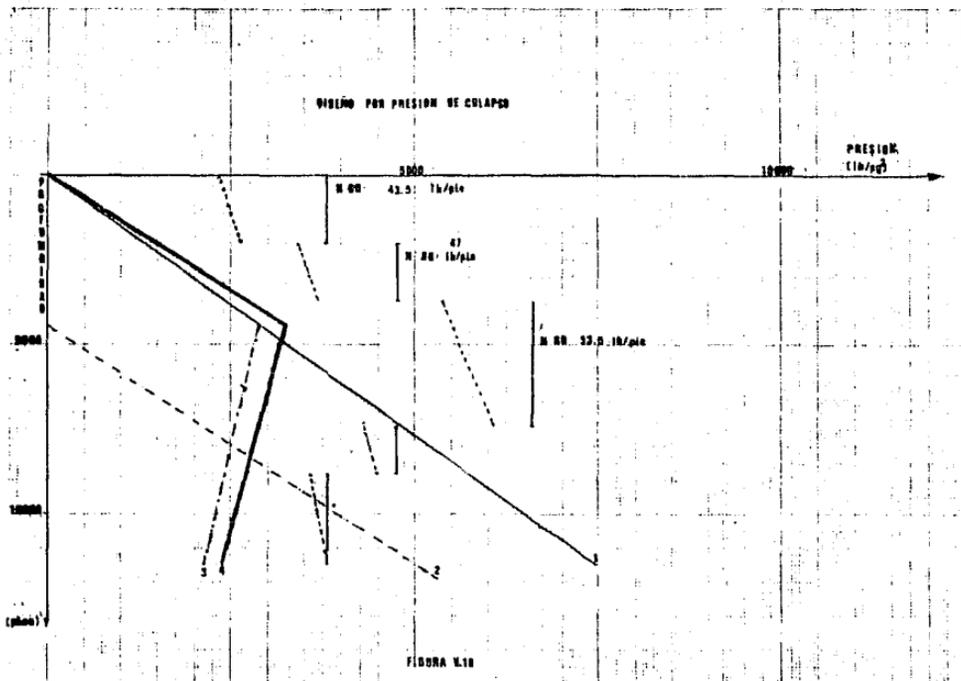
$$\begin{aligned} P_{cm} &= X_e \times G_1 & P_{cf} &= P_c - P_e \\ &= 4449 (0.65) & &= 7462 - 5338 \\ P_{cm} &= 2892 \text{ lb/pg}^2 & P_{cf} &= 2124 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

Con estos puntos se obtiene la línea resultante que se --- muestra en la figura V.18.

La línea de diseño se obtiene aplicando el factor de diseño al colapso a la línea resultante, de esta manera se obtiene - la misma figura, el factor aplicado es 1.125.

$$\begin{aligned} P_{dm} &= P_{cm} \times F_c & P_{df} &= P_{cf} \times F_i \\ &= 2892 \times 1.125 & &= 2124 \times 1.125 \\ P_{dm} &= 3253 \text{ lb/pg}^2 & P_{df} &= 2389 \text{ lb/pg}^2 \end{aligned}$$

Con esto, ya se está en condiciones de trazar las resisten  
cias al colapso de las tuberías que fueron seleccionadas a pre--  
sión interna, a la profundidad ya indicada en la figura V.18.



## DISEÑO POR TENSION

En el fondo del pozo la tubería se encuentra a compresión.

$$T = G_1 * L * A_1$$

$$= (0.65) (11480) \left( \frac{\pi}{4} (9.625^2 - 8.755^2) \right) = (0.65) (11480) (12.56) =$$

$$T = - 93715 \text{ lb}$$

El peso de la tubería grado N-80 de 43.5 lb/pie, es:

$$W_1 = L_1 Pw_1 = (2680) (43.5) = 116580 \text{ lb}$$

la tensión en el extremo superior de la primera sección -- es:

$$T_1 = W_1 + T = 116580 - 93715 = 22865$$

En la segunda sección se presenta un efecto de compresión

$$T = G_1 \times (L - L_1) \times (A_2 - A_1)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (9.625^2 - 8.681^2) = 13.57 \text{ pg}^2$$

$$T = (0.65) (11480 - 2680) (13.57 - 12.56) =$$

$$T = - 5777 \text{ lb}$$

El peso de la segunda sección es:

$$W_2 = L_2 Pw_2 = (1400) (47) = 65800 \text{ lb}$$

la tensión en la parte superior de la segunda sección se-

rá:

$$T2 = W2 + T1 + T = 65800 + 22865 - 5777$$

$$T2 = 82888$$

la tensión en la parte inferior de la segunda sección será:

$$T2' = T1 + T = 22865 - 5777 = 17088$$

en la tercera sección se presenta efecto de compresión

$$T = G1 \times (L - L1 - L2) \times (A3 - A2); A3 = \frac{\pi}{4} (9.625^2 - 8.535^2) = 15.5$$

$$T = 065 (11480 - 2680 - 1400) (15.55 - 13.57)$$

$$T = 9524 \text{ lb}$$

el peso de la tercera sección es:

$$W3 = L3 \times Pu3 = (3700) (53.5) = 197950$$

$$W3 = 197950 \text{ lb}$$

la tensión en la parte superior de la tercera sección será:

$$T3 = W3 + T2 + T = 197950 + 82888 - 9524 = 271314 \text{ lb}$$

$$T3 = 271314 \text{ lb}$$

en la parte inferior de la tercera sección tendremos:

$$T3' = T2 + T = 82888 - 9524 = 73364 \text{ lb}$$

En la cuarta sección se presenta efecto de tensión:

$$T = G1 (L1 + L2) (A3 - A4)$$

$$T = (0.65) (2000 + 1700) (15.55 - 13.57) = 4762 \text{ lb}$$

la tensión en la parte inferior de la cuarta sección será:

$$T4' = T3 + T = 271314 + 4762 = 276076 \text{ lb}$$

y en la parte superior tendremos:

$$W4 = L4 Pu4 = (1700) (47) = 79900 \text{ lb}$$

$$T4 = W_4 + T4' = 79900 + 276076 = 355976 \text{ lb}$$

En la quinta sección se presenta efecto de tensión

$$T = G1 (L1) (A4 - A5) = 0.65 (2000) (13.57) - (12.56) = 1313 \text{ lb.}$$

la tensión en la parte inferior de la quinta sección será:

$$W5 = L_5 \cdot Pu5 = (2000) (43.5) = 87000 \text{ lb}$$

$$T5 = W5 + T5 = 87000 + 357289 = 444289 \text{ lb.}$$

A los valores obtenidos de tensión se grafican como se muestra en la figura V.19, además se multiplican por 1.8

y obtenemos la línea de diseño por tensión, que se utiliza para la selección de los coples como se muestra en la figura V.19

$$T1 = 22865 \times 1.8 = 41157$$

$$T1' = - 93715 + (93715 \times 0.8) = - 18743$$

$$T2 = 82888 \times 1.8 = 149198$$

$$T2' = 17088 \times 1.8 = 30758$$

$$T3 = 271314 \times 1.8 = 488365$$

$$T3' = 73364 \times 1.8 = 132055$$

$$T4 = 355976 \times 1.8 = 640757$$

$$T4' = .276076 \times 1.8 = 496937$$

$$T5 = 444289 \times 1.8 = 799720$$

$$T5' = 357289 \times 1.8 = 643120$$

Finalmente se grafican las resistencias a la tensión de -- los coples y comprobamos que la rosca 8H.r.r., es suficiente en todas las secciones.

Del diseño obtenido sólo resta efectuar las correcciones -- por efecto de carga axial que afecta a la resistencia al colapso, esto se hace aplicando la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales en cada uno de los extremos de las secciones de la sarta diseñada:





Despreciando la flotación tendremos:

primera sección

$$\text{- parte superior } X = \frac{(2680) (43.5)}{(80\ 000) (12.56)} = 0.116$$

$$Y = 0.937$$

$$R_{cc} = 3810 \times 0.937 = 3570 \text{ lb/pg}^2$$

segunda sección

$$\text{- parte inferior } X = \frac{(2680) (43.5)}{(80\ 000) (13.57)} = 0.107; Y=0.942$$

$$R_{cc} = 4750 \times 0.942 = 4474 \text{ lb/pg}^2$$

- parte superior

$$X = \frac{(2660) (43.5) + (1400) (47)}{(80\ 000) (13.57)} =$$

$$= 0.168 ; Y = 0.905$$

$$R_{cc} = 4750 \times 0.905 = 43\ 000 \text{ lb/pg}^2$$

tercera sección

$$\text{- parte inferior } X = \frac{182\ 380}{(80\ 000) (15.55)} = \frac{182\ 380}{124\ 4000} =$$

$$= 0.147 ; Y = 0.919$$

$$R_{cc} = 6620 \times 0.919 = 6081 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{- parte superior } X = \frac{182380 + (3700) (53.5)}{124\ 4000} = \frac{380330}{124\ 4000}$$

$$= 0.36 ; Y = 0.81$$

$$R_{cc} = 6620 \times 0.811 = 5372 \text{ lb/pg}^2$$

## cuarta sección

$$\text{- parte inferior } X = \frac{380330}{1085600} = 0.351 ; Y = 0.778$$

$$R_{cc} = 4750 \times 0.778 = 3693 \text{ lb/pq}^2$$

$$\text{- parte superior } X = \frac{380330 + (1700)(47)}{1085600} = \frac{460230}{1085600} =$$

$$= 0.424 ; Y = 0.718$$

$$R_{cc} = 4750 \times 0.718 = 3410 \text{ lb/pq}^2$$

## quinta sección

$$\text{- parte inferior } X = \frac{460230}{(80000)(12.56)} = \frac{460230}{1004800} =$$

$$= 0.458 ; Y = 0.689$$

$$R_{cc} = 3810 \times 0.689 = 2625 \text{ lb/pq}^2$$

$$\text{- parte superior } X = \frac{460230 + (2000)(43.5)}{1004800} =$$

$$= 0.545 ; Y = 0.609$$

$$R_{cc} = 3810 \times 0.609 = 2322 \text{ lb/pq}^2$$

Al graficar estos puntos en la figura V.18, se puede observar que no existe ningún problema con las reducciones a la resistencia al colapso, por lo cual no es necesario realizar ninguna modificación.

El diseño final, por presión interna, colapso y tensión --  
queda así:

INTERVALO (pies)	GRADO	PESO (lb/pie)	TIPO DE JUNTA
0 - 2000	N-80	43.5	8 H.r.r.
2000 - 3700	N-80	47.0	8 H.r.r.
3700 - 7400	N-80	53.5	8 H.r.r.
7400 - 8800	N-80	47.0	8 H.r.r.
8800 - 11480	N-80	43.5	8 H.r.r.

Nomenclatura

As.	Area de sección transversal de la tubería.	pg <sup>2</sup>
d.	Diámetro exterior nominal	pg
di.	Diámetro interior	pg
Fc.	Factor de diseño a la presión de colapso	adimensional
Fct.	Factor de trabajo al colapso	adimensional
Ff.	Factor de flotación	adimensional
Fi.	Factor de diseño a la presión interna	adimensional
Fs.	Factor de seguridad	lb/gal
Ftc.	Factor de diseño a la tensión en el cuerpo	adimensional
Ftj.	Factor de diseño a la tensión en la junta	adimensional
Fttc	Factor de trabajo a la tensión en el cuerpo	adimensional

Fttj	Factor de trabajo a la tensión en la junta	adimensional
Ge.	Gradiente del fluido de la siguiente etapa	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Gf.	Gradiente de fractura	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Gg	Gradiente del gas	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Gi.	Gradiente del fluido interior	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Go.	Gradiente del fluido exterior	lb/pg <sup>2</sup> /pie
K.	Constante	
L.	Profundidad total de asentamiento de la T. R.	pies
Le.	Profundidad de asentamiento de la siguiente etapa	pies
Li.	Profundidad del cálculo de presión	lb/pg <sup>2</sup>
Ln.	Profundidad del punto neutro	pies
Lp.	Profundidad a la cual se estabilizan las presiones	pies
Lx.	Profundidad del punto de enlace	pies
Lxc.	Profundidad corregida del punto de enlace	pies

m.	Constante que indica la variación de la presión de colapso por efecto de tensión en una longitud de 200 pies	lb/pg <sup>2</sup> /pie
Pb.	Presión de ruptura	lb/pg <sup>2</sup>
Pbi.	Presión interna a la profundidad i	lb/pg <sup>2</sup>
Pc.	Presión de colapso	lb/pg <sup>2</sup>
Pci.	Presión de colapso a la profundidad de interés	lb/pg <sup>2</sup>
Pcf.	Presión de colapso en el fondo	lb/pg <sup>2</sup>
Pcm.	Presión de colapso máxima	lb/pg <sup>2</sup>
Pd.	Presión interna de diseño en el fondo	lb/pg <sup>2</sup>
Pdf.	Presión de diseño al colapso en el fondo	lb/pg <sup>2</sup>
Pdm.	Presión de diseño al colapso máximo	lb/pg <sup>2</sup>
Pds.	Presión interna de diseño en superficie	lb/pg <sup>2</sup>
Pdx.	Presión interna de diseño a la profundidad xl	lb/pg <sup>2</sup>
Pe.	Presión en el fondo ejercida por el fluido de perforación de la siguiente etapa para equilibrar la presión de formación	lb/pg <sup>2</sup>

Pf.	Presión de fondo máxima	lb/pg <sup>2</sup>
Pfr.	Presión de respaldo en el fondo	lb/pg <sup>2</sup>
Pfor.	Presión máxima de formación	lb/pg <sup>2</sup>
PI.	Presión de inyección	lb/pg <sup>2</sup>
Pi.	Presión interna de diseño	lb/pg <sup>2</sup>
Pme.	Presión interna máxima	lb/pg <sup>2</sup>
Ps.	Presión superficial	lb/pg <sup>2</sup>
Pse.	Presión exterior en superficie	lb/pg <sup>2</sup>
Psi.	Presión interior en superficie	lb/pg <sup>2</sup>
Psm.	Presión interna al momento del brote	lb/pg <sup>2</sup>
Psq.	Presión superficial del equipo	lb/pg <sup>2</sup>
Pu.	Peso unitario de T. R.	lb/pie
Puí.	Peso unitario de la sección i	lb/pie
Px.	Presión en la interfase lodo-gas	lb/pg <sup>2</sup>
r.	Peso específico del fluido	lb/gal
ra.	Peso específico del acero	lb/gal
Rc.	Resistencia al colapso	lb/pg <sup>2</sup>
Rcc.	Resistencia al colapso corregida	lb/pg <sup>2</sup>

Rcd.	Resistencia al colapso de diseño	$lb/pg^2$
Rcdrx.	Resistencia al colapso de diseño reducida por tensión en "lx"	$lb/pg^2$
re.	Peso específico de la siguiente etapa	$lb/qal$
regf.	Peso específico equivalente del gradiente de fractura	$lb/qal$
rf.	Peso específico del fluido fracturante	$lb/qal$
Ri.	Resistencia a la presión interna	$lb/pg^2$
Rid	Resistencia a la presión interna de diseño	$lb/pg^2$
$r_{rg}$ .	Densidad relativa del gas	adimensional
Rtc.	Resistencia a la tensión en el cuerpo	lb
Rtj.	Resistencia a la tensión en la junta	lb
Rtt.	Resistencia a la tensión	lb
Rtjd.	Resistencia a la tensión en la junta de diseño	lb
S.	Esfuerzo a la tensión del acero	$lt/pg^2$
T.	Tensión	lb

t.	Espesor	pg
Wx.	Peso de la sección x	lb
x.	Abcisa de la elipse de esfuerzos biaxiales	adimensional
Xe.	Profundidad del fluido de la siguiente etapa durante una pérdida de circulación	pies
x <sub>1</sub> .	Profundidad de la columna de lodo	pies
Y.	Ordenada de la elipse de esfuerzos biaxiales	adimensional
Ym.	Esfuerzo mínimo de cedencia	lb/pg <sup>2</sup>
Yg.	Longitud de la columna de gas	pies

## VI. CONSIDERACIONES ESPECIALES DE DISEÑO

### VI.1. PATAS DE PERRO Y POZOS DESVIADOS

Cuando hay que pasar patas de perro y en pozos desviados, la tubería no sólo debe aguantar las presiones internas y externa y las cargas normales a la tensión, sino también la carga de flexión a la que se le sujeta. Las patas de perro, sean o no - causadas intencionalmente, son cambios abruptos en los ángulos de los pozos (hasta de 10 grados /100 pies)

Cuando se usa para desviar un pozo con el objeto de evitar encontrarse un pescado, la verticalidad del agujero se modifica -- lo suficiente para salvar el agujero original que contiene dicho pescado.

Cuando se cambia el ángulo del pozo para llegar a un objetivo nuevo, la desviación no necesita ser tan severa como en el caso de la pata de perro para rodear un pescado. Sin embargo, -- entre más pozo arriba sucede el desvío menor puede ser el ángulo de éste.

Esto obliga a la decisión entre efectuar más perforación -- acompañada de menores esfuerzos por un menor cambio de ángulo -- y menos perforación con ángulos más pronunciados y mayores problemas.

Cuando se perfora desde un sitio que no está situado directamente sobre el objetivo de producción, es necesario perforar un pozo direccional. Esto ocurre con más frecuencia cuando se perfora en un área residencial, o desde una plataforma en el mar o sobre el hielo permanente (permafrost) u otras áreas en donde los sitios para perforar no están disponibles o son muy caros. En los pozos direccionales el cambio de ángulo se controla a menor desviación (2 a 3 grados en cada 100 pies), que en las patas de perro. Sin embargo, aunque las patas de perro ocurren a cualquier profundidad, los pozos direccionales generalmente comienzan como a 1500 pies abajo de la superficie.

El pandeo o arqueado crea un esfuerzo a la tensión en la tubería, en la parte exterior del doblado, junto con un esfuerzo a la compresión en la parte interior del mismo. Cuando esta carga al arqueado va acompañada por una carga a la tensión en la tubería, la carga neta a la tensión en el exterior del doblado puede ser superior al de diseño de la sarta.

El esfuerzo creado por el doblado está dado por la ecuación:

$$T = \pm 218 D \theta^2 \quad \dots \text{VI.1.}$$

donde:

T.- esfuerzo creado por el doblado lb/pg<sup>2</sup>

D.- diámetro exterior de la T. R. pulgadas

$\theta$ .- cambio de ángulo grados /100 pies.

Por ejemplo, al colocar una tubería de 10 - 3/4" en un agujero con inclinación variable de 6 grados /100 pies, se produce un esfuerzo adicional en el tubo de 14,000 lb/pg<sup>2</sup> o aproximadamente 18% de la mínima tensión a la cedencia del acero N-80.

Como se puede notar en la ecuación, a mayor tamaño de tubería es mayor el esfuerzo a la flexión (tabla VI.1.) El esfuerzo es independiente del peso unitario del tubo, eliminando así la oportunidad de incrementar el espesor de pared para reducir el nivel del esfuerzo, lo cual es el método común para el alivio de alta cedencia interna a la tensión.

Las conexiones también quedan sujetas al esfuerzo al arqueado cuando pasan por patas de perro o se usan en pozo direccional. Las conexiones pueden tener una resistencia al arqueado en exceso o en defecto a la del cuerpo de la tubería, dependiendo del diseño.

La tabla VI.1., muestra los esfuerzos de tensión a que se ven sometidos las diferentes tuberías cuando son sometidas a flexión:

TABLA VI.1

ESFUERZO (lb/pg<sup>2</sup>) POR FLEXION DEL REVESTIMIENTO

DIAMETRO Ext. pg.	CAMBIO DE ANGULO 0/100 pies				
	2	4	6	8	10
5	2200	4400	6600	8000	11000
5 1/2	2400	4800	7200	9600	12000
6 5/8	2900	5800	8700	11600	14500
7	3050	6100	9150	12200	15250
7 5/8	3325	6650	9975	13300	16625
8 5/8	3750	7500	11250	15000	18750
9 5/8	4200	8400	12600	16800	21000
10 3/4	4700	9400	14100	18800	23500
11 3/4	5125	10250	15375	20500	25625
13 3/8	5825	11650	17475	23300	29125
14	6100	12200	18300	24400	30500

## VI.2.- COLAPSO EN FORMACIONES PLASTICAS.

Generalmente los pesos y grados de tuberías de revestimiento, que se pueden usar en el diseño de un aparejo de revestimiento, se seleccionan en base a la máxima presión interna a la cual la sarta pudiera quedar sujeta y la máxima presión de colapso que la tubería de ademe deberá soportar.

El colapso de las tuberías de revestimiento ocasionado por el flujo plástico puede prevenirse seleccionando tuberías de revestimiento más resistentes. Por lo que es necesario considerar los esfuerzos que ejercen las formaciones plásticas.

Al atravesar estas formaciones, se presenta una carga de colapso no uniforme, aplicada en intervalos diametralmente -- opuestos sobre la tubería de revestimiento. La extensión de los intervalos sobre los cuales este colapso se ejerce es afectado por la geometría del agujero y las propiedades mecánicas de la roca de la formación.

Las formaciones de interés son:

- Lutitas plásticas
- Domos salinos

Debido a la importancia del problema, se han diseñado -- tuberías especiales para tales situaciones, a la par con el -- progreso en las técnicas para el desarrollo en pozos petrole--ros con formaciones plásticas.

Otra manera como se ha evitado el colapso por formaciones plásticas, es cementando varios T.R. precisamente frente a estas áreas donde ocurren estos esfuerzos, alcanzandose una resistencia mayor al colapso, con el inconveniente de reducir se el diámetro para continuar perforando.

#### VI.2.a.- TUBERIAS ESPECIALES

Para evitar fallas por colapso, la selección del espesor adecuado de la tubería de revestimiento al igual que una buena cementación (adecuada adherencia), son armas que se disponen para reducir las probables fallas. De la misma manera, efectuar el diseño considerando el efecto de las formaciones plásticas, ayuda a reducir los riesgos.

Para tal fin, varias compañías han desarrollado técnicas para la fabricación de tuberías que cumplan con las especificaciones y necesidades de trabajo requeridas.

Como ejemplo de estas tuberías podemos citar las siguientes:

NK V	-	150		
NK K	-	125		
NK T	-	95		
NK S	-	135		
TAC	-	95		
TAC	-	110	T	- 140
T	-	125	T	- 150

### VI.3.- FRAGILIZACION POR ACIDO SULFIDRICO

Los materiales comunmente usados en las tuberías de los pozos profundos de hoy día, escogidos con base solamente en las propiedades mecánicas de ellas, no son apropiados para medios con  $H_2S$ . Esto se debe a que los materiales duros son -- más susceptibles a la fragilización ocasionada por el  $H_2S$ .

Consecuentemente, los fabricantes han desarrollado una serie de aceros con dureza controlada y ya el Instituto Americano del Petróleo ha aceptado algunos de ellos como estandar. Otros grados de acero se han desarrollado, pero no para uso -- por cualquier fabricante, que permiten la producción de fluidos amargos bajo las condiciones más severas.

Las tuberías de revestimiento hechas de acero al carbón son susceptibles de fragilización (sulphide Stress cracking), estando en contacto con  $H_2S$  y agua, aunque ésta sea en cantidad mínimas. La fragilización se afecta por una interacción -- compleja de tres factores principales: metalurgia, medio ambiente y esfuerzo del material.

Metalurgia se refiere a Composición química, microestructura del acero, dureza, grado del acero y rolado en frío.

Debe buscarse una estructura homogénea, la que puede lograrse balanceando el análisis químico y el tratamiento térmico. El trabajar el acero en frío debe evitarse.

Medio Ambiente: Concentración de H<sub>2</sub>S, presión, temperatura, pH y tiempo.

La fragilización por H<sub>2</sub>S ocurre para una presión de gas total de 65 lb/p2 o mayor o cuando la presión parcial de H<sub>2</sub>S - del gas llega a 0.05 lb/p2. El efecto de la temperatura es máximo abajo de los 65°C (150°F). A mayores temperaturas, la --susceptibilidad del acero a la fragilización por H<sub>2</sub>S baja rápidamente.

Esfuerzos combinados que se presentan en las sartas de -  
tuberías de revestimiento

El acero empleado en las tuberías de los pozos es menos susceptible a la fragilización por H<sub>2</sub>S cuando el esfuerzo a la tensión a que se le somete disminuye.

TUBERIAS DE REVESTIMIENTO ACEPTABLES PARA MEDIOS CORROSI  
VOS POR H<sub>2</sub>S

Para todas las temperaturas:

Especificación API 5A, Grados H-40, J-55 y K-55

Especificación API 5AC, Grados C-75

Para temperaturas 65°C Mínima Continua o Mayores.

Especificación API 5A, Grado N-80 (revenido y templado)

Especificación API 5AC, Grado C-95

Para Temperaturas 80°C Mínima Continua y Mayores.

Especificación API 5A, Grado N-80

Especificación API 5AX, Grado P-110

## C A P I T U L O    V I I

## DIVERSOS METODOS PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DE T. R.

## GENERALIDADES

En la planeación de pozos petroleros es de vital importancia determinar la profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento, ya que estas proporcionan el recubrimiento necesario para que la formación se encuentre protegida de condiciones tales como: pérdida de circulación, brotes, pegaduras de tubería de perforación, etc.

Cuando se perforan pozos profundos el asentamiento de las tuberías de revestimiento se deberá basar únicamente en controlar la presión anormal, para esto se deberá conocer los gradientes de presión de formación y de fractura, ya que son de suma importancia en la correcta planeación de un pozo petrolero (Programa de fluidos de perforación a usar durante la perforación del mismo). Una vez que se conocen las profundidades de asentamiento de las mismas se procede al diseño de éstas.

Para detectar las presiones del subsuelo se han considerado tres métodos, El que se emplea antes de la perforación, es decir aplicado a pozos exploratorios y que se basa en datos geofísicos principalmente la sismología que ha tenido gran desarrollo en los últimos años. El método aplicado durante la perforación el cual mientras se perfora se lleva un registro constante de varios parámetros como son la velocidad de pene-

tracción, la ganancia de fluidos, la densidad de los recortes, exponente "d", etc. los cuales conjuntamente pueden ser un indicativo de que se está entrando a una formación anormalmente presionada. Y el método usado después de la perforación que se considera aquí para aplicarlo a los pozos de desarrollo los cuales usan datos de un campo ya en explotación.

#### VII.2 ANTES DE LA PERFORACION.

A través de los años se han desarrollado numerosas técnicas para la adquisición, procedimiento e interpretación de datos geofísicos, tales como los sísmicos, que han hecho posible no solo el estudio de las configuraciones estructurales de las rocas sedimentarias sino también de otros parámetros como son:

- a) Determinación de los intervalos de velocidad.
- b) Estudio en las variaciones de la litología.
- c) Estimación de la edad geológica y/o promedio de los gradientes geotérmicos.
- d) Detección de hidrocarburos especialmente gas a profundidad somera.
- e) Investigación del piso oceánico y propiedades del fondo para la adecuada planeación de operaciones costerafuera.
- f) Detección de la presencia y la cima de formaciones -- con presión anormal y evaluación de la magnitud de la presión.

La aplicación de las técnicas geofísicas para la detección de presiones anormales tiene un profundo impacto especialmente en la planeación de pozos exploratorios. Los datos sísmicos que se obtiene se procesan para obtener secciones sísmicas que representan el producto de velocidad-densidad de la roca lo que se llama impedancia acústica. Estos datos se obtienen por reflexión de ondas acústicas producidas por deformaciones hechas en la superficie cuando hay un cambio en la densidad de la roca, la impedancia varía y es registrada. Las zonas con presión anormal por tener mayor cantidad de fluidos tienen una menor velocidad de transmisión de las ondas sonoras por lo que provocan reflexión en su cima y su base, y dentro de ella casi no se observa variación debido a la homogeneidad del material.

Existen procedimientos para determinar velocidades de intervalo en el procesado de la sección sísmica con lo que se obtiene un registro sónico sintético. Con este registro que es similar al sónico de porosidad obtenido en el pozo es posible detectar y evaluar zonas con presión anormal.

### VII.3 METODO APLICABLE DURANTE LA PERFORACION

Existe una gran variedad de puntos de control que sirven para detectar la presencia de presiones anormales durante la perforación, mismos que pueden observarse prácticamente.

Dentro de los parámetros de perforación están la velocidad de penetración, presencia de torque y exponente "d". Los parámetros del lodo son su peso, contenido de gas, temperatura, velocidad de flujo, salinidad etc. El análisis de los recorres incluye de la densidad de recorte tamaño, color, composición etc.

Para el cálculo del exponente "d" la ecuación de la que se parte es:

$$\frac{R}{N^e} = K \left( \frac{W}{D_b} \right)^d \quad \text{VII.1}$$

Donde: R.- es la velocidad de penetración (pies/hr)

N.- es la velocidad de rotación (rpm)

e.- es el exponente de la velocidad de rotación

K.- coeficiente de perforabilidad de la roca

W.- es el peso sobre la barrena (lb)

Db.- es el diámetro de la barrena (pg)

d.- es el exponente de peso sobre la barrena

Para simplificar la expresión anterior Jordan y Shirley consideraron que para formaciones de lutitas suaves  $K=1$  y que la velocidad de rotación varía directamente con la penetración, por lo que  $e=1$ . Estas suposiciones son válidas para formaciones de la costa del Golfo y para formaciones duras -- este modelo no puede ser totalmente válido.

Después de un adecuado manejo e introducción de las constantes de conversión la expresión anterior queda como:

$$d = \frac{\text{Log } (R/60N)}{\text{Log } (12W/10^6 \text{Db})} \quad \text{VII.2}$$

Haciendo un reacomodo tenemos:

$$d = \frac{\text{Log } (60 N/R)}{\text{Log } (10^6 \text{Db}/12W)} \quad \text{VII.3}$$

La figura VII.1 presenta una gráfica del exponente "d"

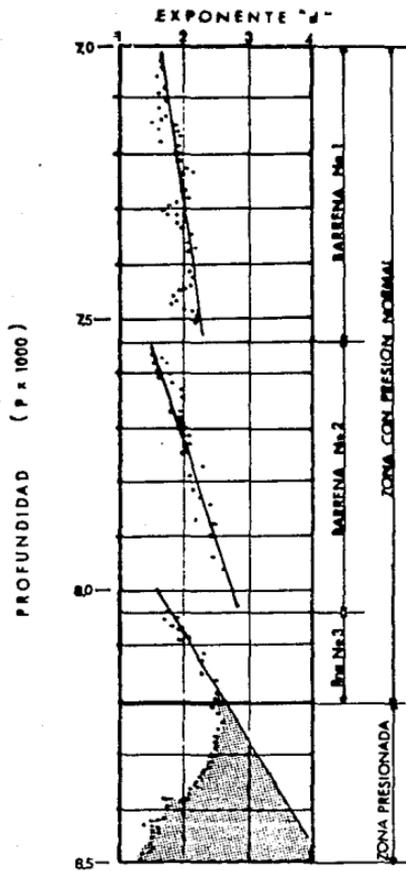
Debido a que el exponente "d" es afectado por las variaciones del peso del lodo es necesario modificar dicho exponente resultando el exponente corregido "dc".

$$dc = \frac{d (\text{Grad. normal})}{\text{Grad. actual del lodo}} \quad \text{VII.4}$$

#### VII.4 METODOS APLICABLES DESPUES DE LA PERFORACION

Para la detección de presiones anormales después de la perforación se usan principalmente los datos obtenidos de los registros geofísicos. Los estratos lutíticos son una ayuda -- valiosa para elaborar un perfil de presiones debido a que son muy sensibles a los procesos de compactación.

Cuando se desarrollan presiones normales de formación la compactación de las lutitas es principalmente función de la -- profundidad. Las rocas lutitas que tienen una presión anormal



Gráfica del Exponente "d" en una Zona con Presión Anormal.

FIG. VII.1

tienen una mayor porosidad debido a que contienen mayor cantidad de fluidos que en formaciones de lutita con presión normal.

Los parámetros lutíticos sensibles a la compactación son graficados contra la profundidad para obtener una tendencia de compactación, la forma o pendiente de la tendencia es una característica de una región geológica, de un campo o de un bloque fallado.

Hottman y Johnson observaron la relación que existe entre las propiedades de los registros geofísicos y las geopresiones, ellos usaron datos del registro de inducción y del sónico, para comprobar sus estudios se basaron en que la roca tiene mayor resistividad al paso de la corriente eléctrica en comparación con el agua intersticial. Por lo tanto, una formación muy compactada tendrá menor cantidad de agua y será por consiguiente mas resistiva que una formación menos compactada. Para formaciones compactadas sedimentarias la resistividad se incrementa en forma gradual con la profundidad y al graficarlos en papel semilogarítmico se forma una línea recta que representa la tendencia normal de compactación, siendo el decremento de resistividad el que represente la zona de presión anormal.

Al efectuar las gráficas comparativas de resistividad y tiempo de tránsito contra gradientes de presión de formación observaron cierta dispersión de los datos reales.

Con el paso del tiempo Ben Eaton encontró que esta dispersión es debida a la consideración del gradiente de sobrecarga constante.

Las ecuaciones para determinar el gradiente de presión - de formación son:

$$\frac{P_{for}}{L} = \frac{S}{L} - 0.535 \left( \frac{R_o}{R_n} \right)^{1.2} \quad \text{VII.5}$$

$$\frac{P_{for}}{L} = \frac{S}{L} - 0.535 \left( \frac{\Delta T_n}{\Delta T_o} \right)^3 \quad \text{VII.6}$$

$$\frac{P_{for}}{L} = \frac{S}{L} - 0.535 \left( \frac{C_n}{C_o} \right)^{1.2} \quad \text{VII.7}$$

Si se tratará de un gradiente normal y considerando un gradiente de sobrecarga de 1 lb/pg<sup>2</sup>/pie

$$\frac{P}{L} = 1 - 0.535 = 0.465 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$$

donde  $R_o$  y  $R_n$  son las resistividades observada y normal respectivamente leidas. La primera del registro eléctrico o - inducción, y la normal de la tendencia de la recta que resulta de graficar resistividad v.s. profundidad.

$\Delta T_n$  y  $\Delta T_o$ . son también los tiempos de tránsito. normal y observado respectivamente.

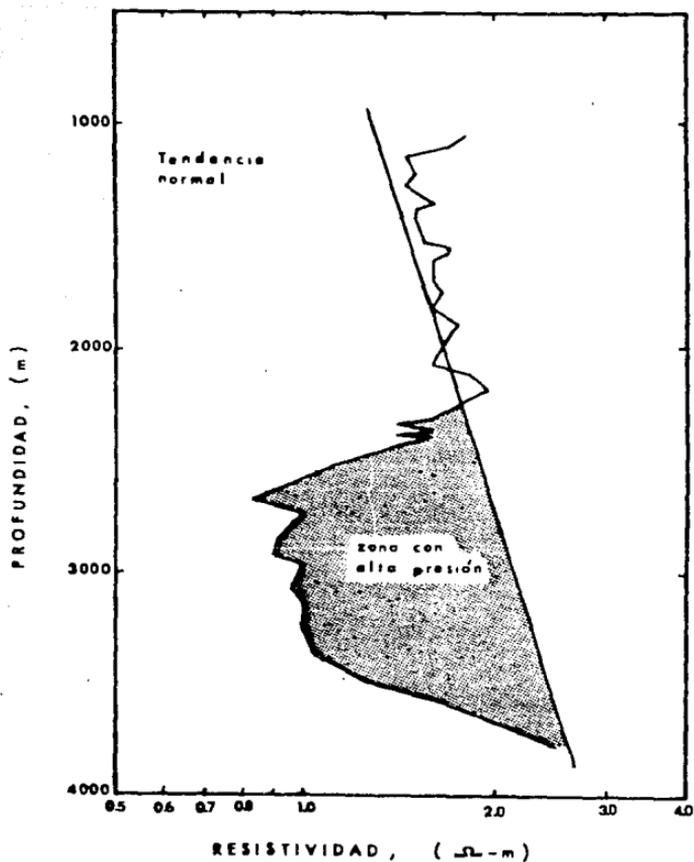


FIG.V.II.2

Gráfica de Valores de Resistividad  
Contra Profundidad y Tendencia  
Normal.

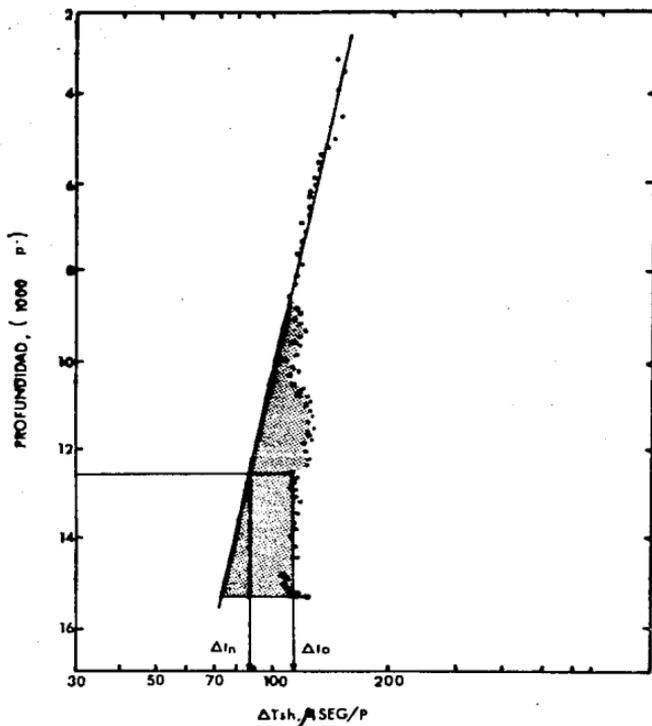


FIG. VII.3

Comportamiento del Tiempo de Tránsito.

## VII.5 METODOS DE PREDICCIÓN DE LA PRESIÓN DE FRACTURA

La información sobre la presión de formación y el gradiente de fractura son los dos parámetros básicos en cualquier trabajo de perforación y terminación de pozos. En general, el gradiente de presión de fractura de la formación esta relacionada con la presión de formación, la litología, edad y profundidad de la formación y con los esfuerzos a que esta sometida la roca en el yacimiento.

## A. METODO DE HUBBERT Y WILLIS.

Postularon que en ambientes geológicos con fallas normales, el menor esfuerzo es el horizontal y probablemente su rango varía de 1/3 a 1/2 de la presión efectiva del peso de los sedimentos suprayacentes.

Básicamente la presión de fractura tiene que superar la presión de poro y la tensión horizontal de la matriz.

$$P_{\text{frac}} = P_{\text{for}} - \nabla h \quad \text{VII.8}$$

Según Hubbert y Willis

$$\nabla h = (1/3 \text{ a } 1/2) (S - P_{\text{for}}) \quad \text{VII.9}$$

donde  $P_{\text{frac}}$ .- Presión de fractura

$P_{\text{for}}$ .- Presión de formación

$\nabla h$  .- Esfuerzo de tensión horizontal

S .- Sobrecarga.

Finalmente expresándolo matemáticamente.

$$G_{\text{frac}} = \frac{P_{\text{for}}}{L} + (1/3 \text{ a } 1/2) \left( \frac{S - P_{\text{for}}}{L} \right) \quad \text{VII.10}$$

La figura VII.4 muestra los gradientes mínimo y máximo - según Hubbert y Willis. Nótese que para todas las formaciones con presiones normales los gradientes de presión permanecen - constantes cuando aumentan las profundidades. La diferencia - entre los límites máximo y mínimo en el gradiente de fractura disminuye con el incremento del gradiente de presión de formación.

Generalmente la experiencia de campo ha demostrado que - un gradiente de presión de fractura no es constante con el incremento de la profundidad. Las predicciones hechas con el método de Hubbert y Willis sobre la presión de fractura son menores que las obtenidas con mediciones de campo reales.

#### B. METODO DE MATTEWS Y KELLY.

La diferencia de este método con el de Hubbert y Willis es que este considera variable el coeficiente de esfuerzos matriciales.

$$G_{\text{frac}} = \frac{P_{\text{for}}}{L} + K_i \frac{\nabla}{L} \quad \text{VII.11}$$

donde:  $G_{\text{frac}}$ .- Gradiente de fractura

$P_{\text{for}}$ .- Presión de formación

$K_i$  .- Coeficiente de esfuerzos matriciales

$\nabla$  .- Esfuerzo matricial

$L$  .- Profundidad

El coeficiente de esfuerzos matriciales es la relación variable de resistencia horizontal con respecto a la vertical.

# GRADIENTE DE FRACTURA MAXIMO Y MINIMO HUBBERT Y WILLIS

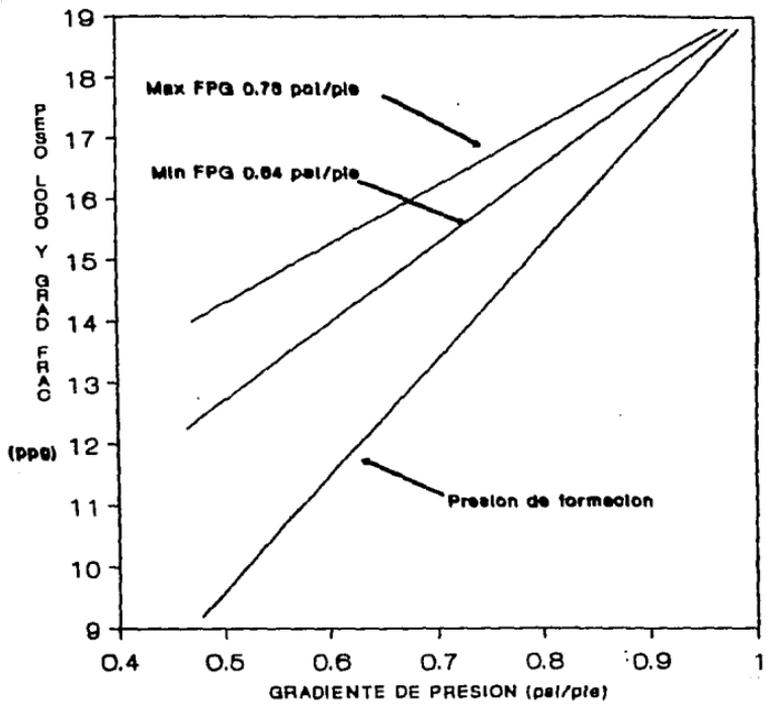


Fig W1-4

La figura VII.5 muestra una gráfica de  $K_i$ , esta se usa estimando la presión de poro a partir de registros geofísicos o de perforación y calculando una profundidad equivalente.

( $L_q$ ), la cual se determina por

$$L_q = \frac{S - P_{for}}{0.535} L \quad \text{VII.12}$$

El valor de  $K_i$  se lee de la figura VII.5 entrando con la profundidad equivalente, posteriormente se calcula el gradiente de fractura a partir de la presión de formación y un gradiente de sobrecarga supuesto, usando el valor de  $K_i$  determinado a la profundidad equivalente.

Para formaciones normales  $L_q=L$  y para la costa del golfo la ecuación se simplifica a:

$$G_{frac} = 0.465 + 0.535 K_i \quad \text{VII.13}$$

La cual se basa en una presión de formación normal con una densidad de 8.9 lb/gal, también se supone un gradiente de sobrecarga constante e igual a 1 lb/pg<sup>2</sup>/pie

### C. METODO DE EATON

Eaton extendió el concepto de Matthews y Kelly introduciendo la relación de Poisson dentro de la expresión matemática del gradiente de fractura.

$$G_{frac} = \left( \frac{P_{for}}{L} \right) + \left( \frac{\mu}{1-\mu} \right) \left( \frac{S-P_{for}}{L} \right) \quad \text{VII.14}$$

## COEFICIENTES DE ESFUERZOS MATRICIALES ( MATTHEWS Y KELLY )

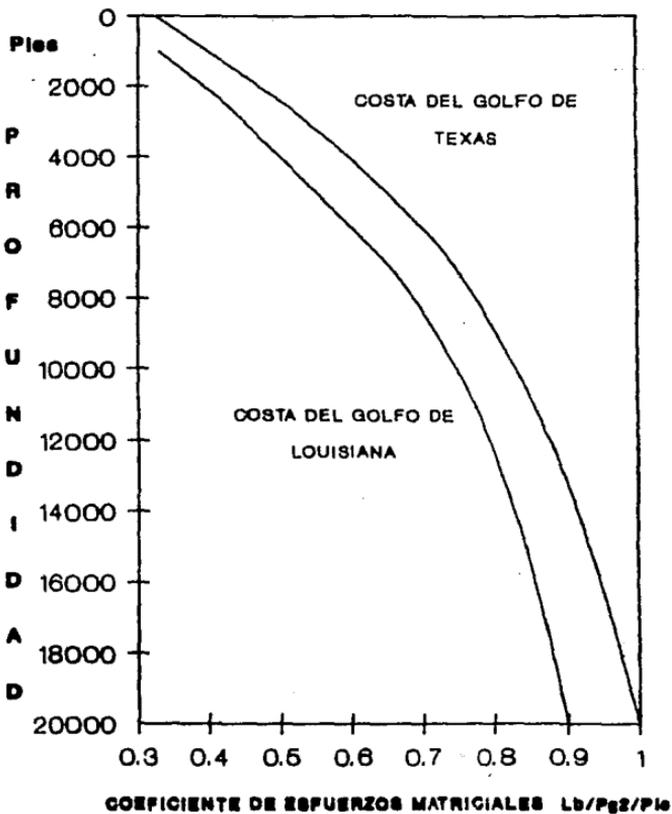


FIG. VII.5

La relación de Poisson relaciona los esfuerzos vertical y horizontal y para su cálculo usa el gradiente de sobrecarga promedio, presión de fractura media y la presión de poro estimada. Ver figura VII.6 o bien con la fórmula empírica siguiente:

$$\lambda = 0.126D^{1.28} \quad \text{VII.15}$$

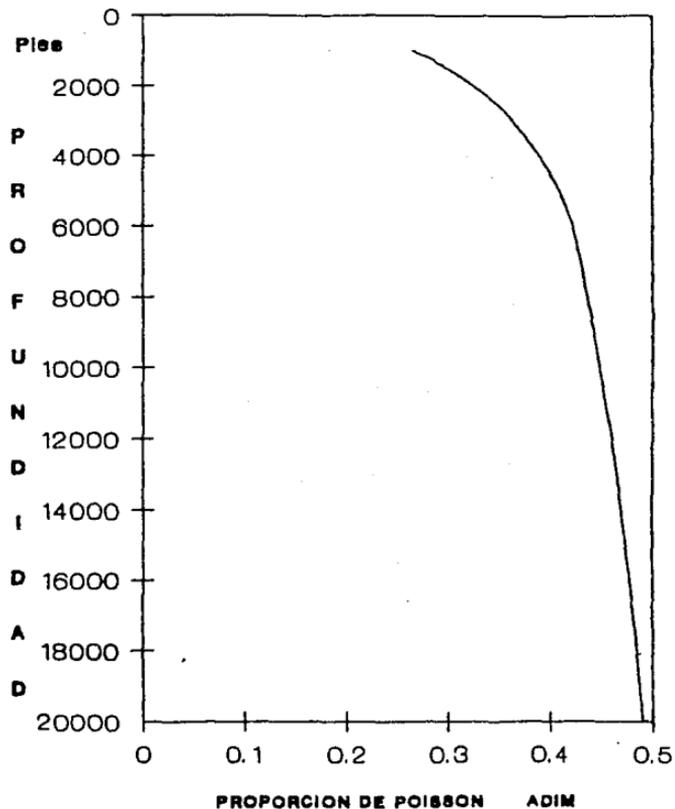
La presión de sobrecarga puede determinarse graficando la densidad de las lutitas contra la profundidad e introduciendo esta información en la curva de carga debido a las capas suprayacentes, así se puede obtener una representación local o regional de las presiones de sobrecarga en un área determinada, ver figura VII.7

#### PLANEAMIENTO DEL ASENTAMIENTO DE TR.

Una vez que se cuenta con todos los parámetros requeridos para evaluar las presiones o gradientes de formación y de fractura a una profundidad dada que servirá para la obtención de una gráfica como la presentada en la figura VII.8

Después de que se establece el gradiente de presión de formación en valor de densidad equivalente, se obtiene la curva de densidad de lodo requerida, la curva de densidad de lodo requerida se grafica para que promedie aproximadamente 0.5 lb/gal ó 0.06 g/cc más que la curva de presión de formación.

**VARIACION DE LA RELACION DE POISSON PARA FORMACIONES  
NORMALMENTE COMPACTADAS COSTA DEL GOLFO ( EATON )**



**FIG. VII.6**

**GRADIENTE DE SOBRECARGA PARA LAS FORMACIONES  
NORMALMENTE COMPACTADAS COSTA DEL GOLFO ( EATON )**

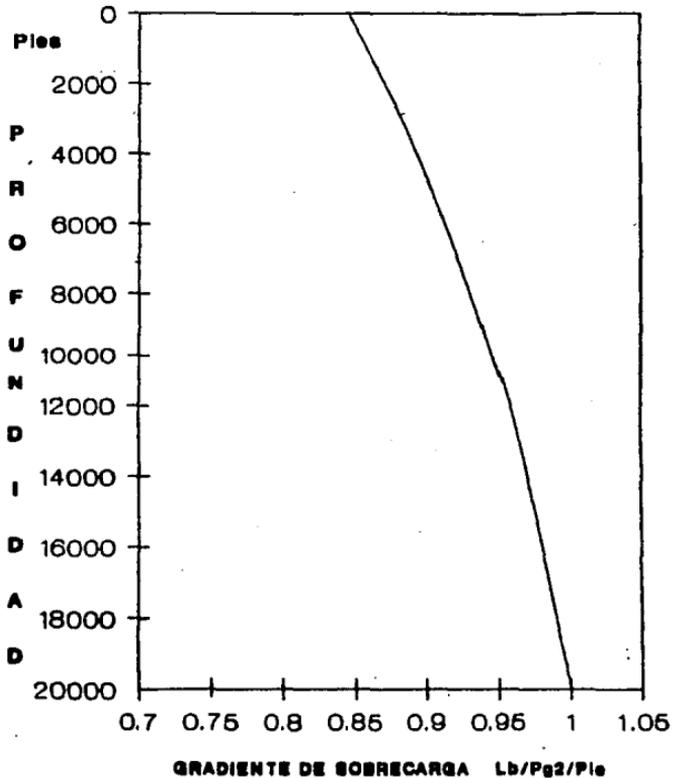
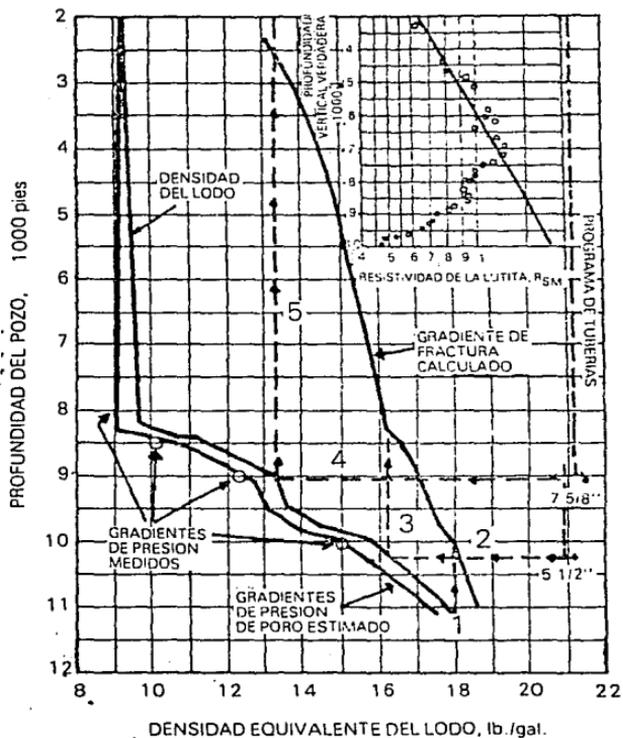


FIG. VII. 7

PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DE LAS  
TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

- 1.- Se traza una línea vertical del punto de densidad -  
máxima de lodo hasta donde intersece la curva de --  
gradiente de fractura, en el punto donde se intersecta  
ta, indica la densidad máxima de lodo con la cual se  
puede trabajar sin que la formación llegue a fractu-  
rarse, por lo que a esa profundidad se deberá de --  
asentar una tuberfa de revestimiento, en el tramo lo  
calizado abajo del punto donde interseca la curva -  
de gradiente de fractura, pudiendo ser esta una T.R.  
corta.
- 2.- Se traza una horizontal a partir del punto donde in-  
tersecto la línea gradiente de fractura hasta inter-  
sectar la curva de densidad de lodo requerida a esa  
profundidad.
- 3.- Partiendo desde donde la línea horizontal cruzó la -  
curva de densidad de lodo, trazamos ahora una línea  
vertical hasta la curva de gradiente de fractura.
- 4.- La profundidad de la T.R. intermedia se selecciona -  
inmediatamente abajo de la intersección anterior.
- 5.- Para seleccionar la T.R. superficial se usa el mismo  
procedimiento anterior con la línea horizontal y ver-  
tical.

Es importante mencionar que a las profundidades de asentamiento calculadas por este método se le debe de sumar un factor de seguridad, además se deben de tomar siempre estos resultados con ciertas reservas ya que en algunas ocasiones el método indica un espaciamiento de T. R. muy grande, sin embargo, la experiencia de campo ha demostrado que intervalos muy grandes de agujero descubierto son difíciles de cementar debido a que durante la -- corrida de T. R., se pueden ocasionar pegaduras de las mismas, - lo que dificultará el asentamiento y cementación de éstas.



GRAFICA PARA LA SELECCION DE LA PROFUNDIDAD DE ASENTAMIENTO DE LAS TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.

Fig VII-8

## NOMENCLATURA

Co.	Conductividad observada	miliohms
Cn.	Conductividad normal	miliohms
Ki	Coefficiente de esfuerzos matriciales	adimensional
L.	Profundidad	pies
Lq.	Longitud equivalente	pies
Pfor.	Presión de formación	lb/pg <sup>2</sup>
Pfrac.	Presión de fractura	lb/pg <sup>2</sup>
Ro.	Resistividad observada	miliohms
Rn.	Resistividad normal	miliohms
S.	Presión de sobrecarga	lb/pg <sup>2</sup>
Ato.	Tiempo de tránsito observado	Mseg/pie
Atn.	Tiempo de tránsito normal	Mseg/pie
M.	Relación de Poisson	adimensional
Tn.	Esfuerzo matricial horizontal	lb/pg <sup>2</sup>

VIII. HERRAMIENTAS ESPECIALES QUE SE UTILIZAN EN  
LA CEMENTACION DE LAS TUBERIAS DE REVESTI-  
MIENTO.

VIII.1.- GENERALIDADES

Desde el inicio de la perforación de un pozo es indispensable contener las paredes del mismo, esto se logra con la columna de lodo, conforme se avanza en profundidad y a intervalos determinados, la contención se efectúa por medio de tuberías de revestimiento. Para lograr este efecto es necesario que después de introducir la tubería, esta sea cementada.

Cementar una tubería de revestimiento no es una tarea fácil se podría considerar imposible si no se cuenta con una serie de herramientas, que conectadas en diversos puntos de la sarta, ayudan a que la tubería sea introducida hasta la profundidad programada, centrado en el agujero y con un buen control sobre el flujo de lechada de cemento al momento de cementar.

Estas herramientas deberán tener resistencias iguales o mayores a la sección de T. R., en las que sean conectadas, con el fin de que en la sarta no disminuyan las resistencias con que fueron diseñadas.

Existen además otras herramientas que aunque no van conec-

tadas, son de importancia fundamental para una cementación. Generalmente quedan dentro de la T. R., después de ser cementadas por lo que deberán estar construidas de materiales fácilmente molibles.

También es de tomarse en cuenta el equipo superficial empleado para el mezclado y bombeo de la lechada de cemento.

En el siguiente inciso se presenta una breve descripción de estas herramientas.

#### VIII.2.- DESCRIPCION

##### Zapata Gufa

Es una sección corta de tubería de acero con el extremo inferior arredondado, para facilitar el paso de la tubería de revestimiento a través de lugares irregulares del agujero, en la parte inferior de la zapata generalmente contiene cemento para amortiguar golpes, además es compuesta y resistente, y presenta la ventaja de ser perforable. (Figura VIII.1.)

##### Zapata Flotadora

Este tipo de zapata evita que el fluido de perforación entre a la tubería de revestimiento conforme se introduce, de tal manera que la tubería va flotando, liberando así al equipo en la superficie del peso de la tubería.

Estas zapatas consisten esencialmente en una válvula de --

contra presión que permite el paso de fluido en una sola dirección. (Figura VIII.2.)

#### Zapata Flotadora Tipo V.

Se usa principalmente para trabajos donde exista asentamiento de formación o cuando se apoye en el fondo la zapata, ya que el cemento pasa a través de los orificios del fondo y laterales.

#### Cople Flotador.

Al igual que la zapata flotadora tiene una válvula que permite el paso en una sola dirección, se coloca uno o dos tramos arriba de la zapata, lo cual permite que el cemento quede abajo del cople. Su función no es únicamente la de tipo flotador, sino que actúa como asiento del tapón de desplazamiento indicado así que la operación de cementación ha terminado. (Figura VIII.3).

#### Cople Diferencial.

Este dispositivo contiene una válvula de camisa que abre o cierra contra un asiento de la misma, está construida de tal manera que el área de su sección transversal en el fondo es el 90% del área en la sección transversal superior, esta diferencia permite que al introducir la tubería de revestimiento, se limite la acción de llenado de la misma, de tal manera que el nivel interior de la tubería es aproximadamente el 90% del nivel en el espacio anular.



Fig.VIII.1 Zapata Rule



Fig.VIII.2 Zapata Flatdora



Fig.VIII.3 Cople Flatdora



Fig.VIII.4 Cople Diferencial

Aparte de eliminar los fuertes golpes de presión, reduce el tiempo de introducción de la tubería de revestimiento, ya que al llenarse automáticamente puede meterse la tubería más fácilmente. (Figura VIII.4.)

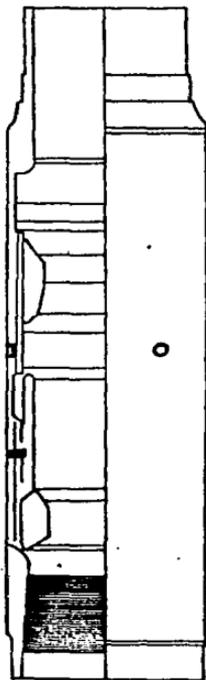
#### Cople de Cementación Múltiple.

Cuando se tienen secciones de tuberías de gran longitud, varios yacimientos productores o el volumen de la lechada de cemento es demasiado, se utilizan coples de cementación múltiples. Este dispositivo está diseñado para conectarse a cualquier profundidad, ya que su resistencia al colapso y a la tensión es semejante a las tuberías de revestimiento empleadas. Consta de dos camisas deslizables, la inferior permanece cerrada durante el desplazamiento de la primer etapa de cementación y la camisa superior cierra los orificios de circulación. Terminada la operación de la primera etapa se abren los orificios por medio de un tapón conocido como torpedo. La primera etapa concluye cuando al tapón de desplazamiento llega al cople de retención, colocado un tramo arriba de la zapata.

Posteriormente al envío del tapón torpedo, que abrirá los orificios del cople, se efectúa la segunda etapa de cementación, el tapón de desplazamiento en esta etapa opera sobre la segunda camisa que cierra el cople de cementación múltiple. (Figura - - VIII.5.)

#### Raspadores.

**Cople de comentación múltiple**



**FIG. VIII.5**

La película de lodo adherida en la pared del agujero, por el fluido de perforación, deberá eliminarse si es posible, en el intervalo el cual se va a colocar la lechada de cemento. Si el enjarre de lodo es grueso y compacto, será necesario recurrir a métodos mecánicos para desprenderlo.

Los raspadores están diseñados para este trabajo de limpieza. (Figura VIII.6.).

### Centradores

Es conveniente que el tramo por cementar de una columna de tubería de ademe, esté centrado con las paredes del pozo, de modo que la lechada de cemento sea de un espesor uniforme en el espacio anular. Para conseguir esto se utilizan los centradores, éstos consisten de una serie de muelles o flejes metálicos, que se apoyen contra la pared del pozo y van unidos al cuerpo del tubo, actuando como patines y facilitando el descenso de la tubería de revestimiento, en el pozo.

Los muelles con que se fabrican estas piezas son de acero de una aleación que recibe un tratamiento térmico que mejora sus características físicas.

Existen diferentes diseños, siendo las más comunes los centradores rectos.

Se denomina así por que sus flejes siguen una dirección paralela al eje de la tubería, dentro de este tipo existen dos clases, atendiendo a la forma de los anillos que limitan su movi-

Respadores

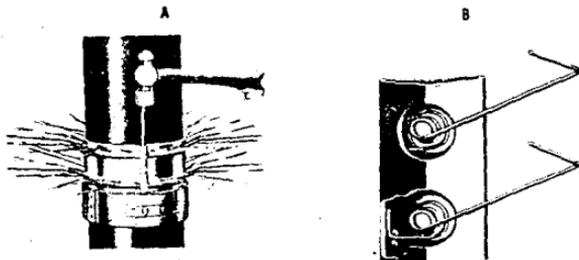


FIG. VIII. 6  
Contrador



FIG. VIII. 7

miento: de bisagra y sólidos.

Los primeros permiten su colocación en los puntos deseados en momento que se introducen los tramos de tubería correspondiente, los segundos tiene que colocarse antes de la introducción de la tubería de revestimiento o sea cuando ésta se encuentra estibada junto al equipo de perforación. (Figura VIII.7).

#### Colgador Mecánico

Esta herramienta es de uso común en las Tuberías de Revestimiento cortas (liners) y está construida con las mismas especificaciones de diámetros, pesos y grados de la tubería de revestimiento que se va a introducir al pozo.

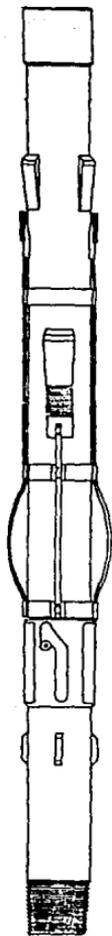
La característica principal del colgador mecánico, es que las cuñas se desplacen a su cono al accionar un mecanismo de ---candado "J" alojado en el cople inferior de los flejes de las cuñas que aseguran a un perno instalado en el cuerpo del mandril principal.

El mecanismo de "J" es construido para accionarlo con vueltas a la izquierda levantando a la tubería y volviéndola a bajar para anclar las cuñas a la tubería de revestimiento.

Este tipo de colgador se recomienda para T. R., cortas de poca longitud y/o peso. (Figura VIII.8.)

#### Colgador Hidráulico

El colgador hidráulico, está construido con un sistema hí-



Colgador  
Mecánico

FIG. VIII. 8



Colgador  
Hidráulico

FIG. VIII. 9

dráulico con conos, cuñas y flejes; mientras no se aplique una presión diferencial suficiente, su funcionamiento hidráulico no actuará, lo que permite mantener las cuñas en posición de poder introducir la tubería de revestimiento hasta la profundidad programada para cementarla.

Se recomienda para T. R., cortas de mucho peso. (Figura -- VIII.9).

#### Herramienta soltadora

La herramienta soltadora está diseñada para bajar y anclar una T. R. corta. La parte inferior de la herramienta tiene una conexión especial, con una unión giratoria integrada, a la cual se fija el aditamento a conversión de sellos para realizar la cementación. (Figura VIII.10).

#### Receptáculo Pulido

Este es el dispositivo donde hacen contacto los sellos de la herramienta soltadora e impiden que la lechada de cemento se dé vuelta, y de esta forma la circulación es hasta el fondo, a través de la zapata para salir al espacio anular. (Figura VIII.11).

#### Unión Giratoria

Es instalada abajo del colgador, para permitir el asentamiento de éste, siempre que la tubería corta debajo del colgador se encuentre en tensión, permite la rotación arriba en la sarta -

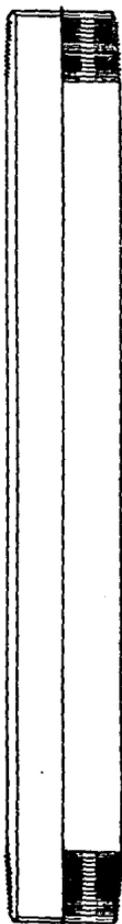


Fig.VIII.11  
Receptaculo  
Pulido

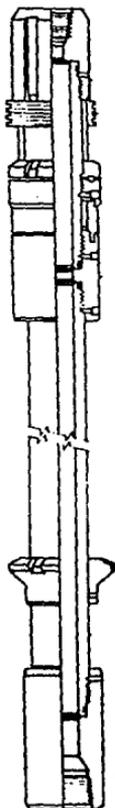


Fig. VIII.10  
Herramienta  
Saltadora

Unión giratoria

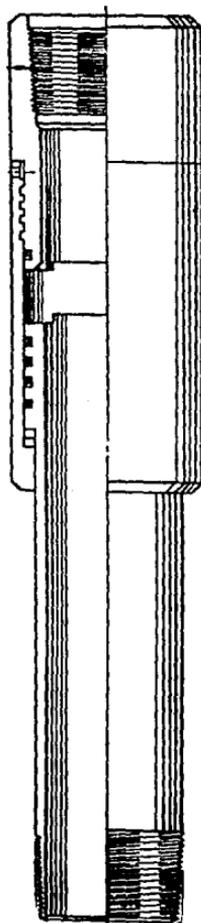


FIG. W111.12

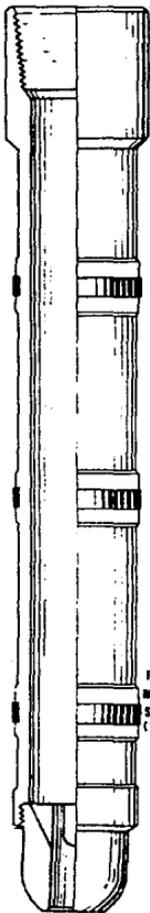


FIG. VI4  
MANDRIL DE  
SELLOS  
(TIE BACK STEM)

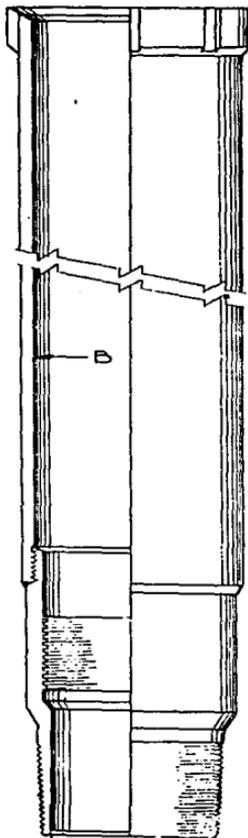


FIG. VIII.13  
COUPLE SOLTADO  
CON EXTENSION

para realizar el anclaje. (Figura VIII.12.)

Cople soltador con extensión.

Es la última herramienta que se coloca en la sarta de la tubería corta, inmediatamente arriba del receptáculo pulido y se utiliza en todas las cementaciones de tubería corta que provean una extensión de la misma.

La extensión del cople, consiste en un cuerpo de acero con diámetro interior maquinado de longitud estándar, el cual se utiliza para prolongar la tubería hacia arriba por medio de un mandril de sellos (Tie - back), ya sea por rotura de la T. R., altas presiones esperadas o algún motivo especial. (Figura VIII.-13).

Cuando no se tiene contemplado extender la T. R., corta me diante una extensión o complemento entonces no es necesaria la extensión del cople soltador.

Mandril de sellos.- (Tie back stem)

Se instala en el primer tramo de la extensión o complemento de tubería corta, que se va a introducir al pozo, y se utiliza cuando se desea extender la tubería hacia la superficie, acoplándose dentro de la extensión del cople soltador.

Consiste de un cuerpo de acero maquinado, el cual cuenta con una nariz guía para facilitar su acoplamiento y tres sellos de anillo para sellar el espacio anular. (Figura VIII.14).

Una vez acoplada esta herramienta el material de la nariz es fácil de moler.

#### Cople Flotador de Orificio

El cople flotador de orificio para extensiones o complementos se instala un tramo arriba del material de sellos y está diseñado para ayudar en la introducción del mismo dentro de la extensión del cople soldador permitiendo el paso del fluido al interior de la tubería, sin que se dañen los sellos del mandril.

Cuenta con dos pequeños orificios colocados en el inserto, a ambos lados de la válvula, los cuales permiten el paso restringido del fluido, mientras se corre la tubería en el pozo. Cuando se circula durante la cementación la válvula se abre para permitir el flujo del fluido hacia afuera más no el regreso del mismo. Es de material fácil de moler.

#### Tapones de Cementación

El método convencional de cementación incluye el uso de dos tapones de cementación, uno inferior o de diafragma que se envía adelante de la lechada y el tapón superior que se utiliza para desplazar la lechada de cemento, es conocido que el cemento no remueve la película fina de lodo en la pared interior de la tubería de revestimiento, la cual se logra con el tapón inferior depositando estas partículas abajo del cople y quizás en el espacio anular, así también separa la lechada del cemento con el fluido del perforación.

El tapón de diafragma se coloca en la parte inferior de la cabeza de cementación y su objetivo principal como ya se mencionó es la de evitar se mezcle la lechada con el lodo y también -- para limpiar las paredes de la tubería de revestimiento, está -- construido de hule moldeado, sobre una estructura de aluminio, - el diafragma se rompe con una mínima presión diferencial, lo - - cual permite otra vez la circulación a través del mismo. (Figura VIII.15).

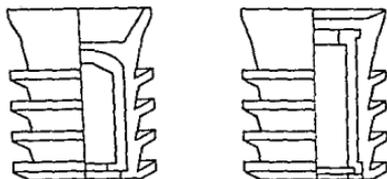
En la cementación por etapas se utilizan los tapones mostrados en la figura VIII.16.

El tapón limpiador para tubería corta va colocado en la -- parte inferior de la herramienta soltadora, mediante un perno de bronce y el tapón de desplazamiento es completamente sólido, con un candado en la parte inferior, una vez bombeada la lechada del cemento, se suelta este tapón y se ancla al tapón inferior por medio del candado de bronce, formando solo cuerpo al romperse el perno, de esta forma, continúa desplazando el cemento a través - de la tubería de revestimiento corta, al llegar al cople de retención se produce un cierre hermético por el asiento especial - que tiene el cople, evitando así el regreso del cemento hacia el interior de la tubería de revestimiento. (Figura VIII.17).

#### Equipo de Alta Presión.

Es necesario conocer las características del equipo hidráulico disponible para llevar a cabo una buena cementación por lo que debe considerarse, si dicho equipo reúne las características -

**Tapones para cementación**



**A.- Superior**

**B.- Inferior**

**FIG. VIII.15**

**Tapones para cementar por etapas**



**TAPON LIMPIADOR**

**A**



**BOMBA PARA ABRIR  
COPLÉ V**

**B**



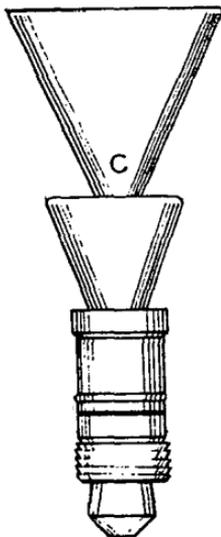
**TAPON PARA CERRAR  
COPLÉ V.**

**C**

**FIG. VIII.16**

TAPONES PARA CEMENTACION DE T.R. CORTA

A..Para T.P.



B..Para T.R.

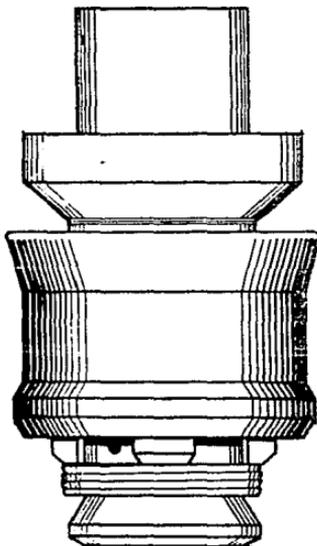


FIG. N° 111-17

para proporcionar el gasto y presión de desplazamiento programados.

Las unidades móviles de cementación requeridas en la industria petrolera están diseñadas para operar y rendir el mejor servicio en condiciones extremas de altitud, temperatura y humedad.

Los equipos de cementación o unidades de alta presión consisten de las siguientes partes principales:

Emplean un par de motores diesel de gran capacidad, los que proporcionan presiones y gastos requeridos para cada tipo de operación a realizar, consta además de una transmisión mecánica, un par de bombas triplex, un par de presas o cajas de mantenimiento de fluidos (con capacidad de 10 bls., cada una), una caja de succión para fluidos mezclados, un mezclador de chorro, comúnmente llamado embudo mezclador, una serie de válvulas de control, las cuales regulan la entrada y salida de los fluidos que se trabajen, medidores de presión y gastos.

Mezclador tipo chorro. Es una unidad compacta que tiene un embudo en forma de tolva, una mezcladora lineal de descarga, colector y una línea de alimentación de agua.

La unidad trabaja mediante la inyección de agua a presión, a través de la mezcladora, donde se produce un vacío que hace que el cemento se succione y mezcle con el agua, posteriormente la lechada pasa por la línea de descarga al recipiente de donde es succionado por las bombas.

La caja metálica para la lechada, tiene como función principal la de abastecer la succión de la bomba seleccionada para el bombeo de la lechada al pozo.

Indicador de presión; (manómetro tipo Bourdón), este manómetro basa su funcionamiento en la deformación que la acción de la presión provoca sobre un tubo de metal doblado llamado Bourdón, que tiene la particularidad de regresar a su forma original al cesar la acción de la presión.

Densímetro.- Este dispositivo está diseñado para indicar el peso específico de la lechada de cemento o de otros fluidos - mediante una curva de densidad, la cual es registrada sobre una carta. En caso de no contar con este dispositivo en la unidad de cementación, se emplea la balanza de lodos con la cual será comprobada la densidad de la lechada manualmente.

Cabezas de cementación.- El desplazamiento del cemento, en el interior de la tubería de revestimiento, es necesario hacer uso de una herramienta que permita hacer una conexión exterior entre la unidad de cementación y la tubería de revestimiento a cementar. Este tipo de herramienta se conoce con el nombre de cabeza de cementación. Es un niple cuyo extremo interior tiene una conexión para roscarse al cople de la tubería de revestimiento, consta también de una o más válvulas por medio de las cuales se va a llevar a cabo la introducción de la lechada de cemento y del fluido desplazante al interior del pozo.

El cuerpo de la cabeza de cementación está especialmente -

diseñado para poder alojar en su interior los dispositivos necesarios durante la cementación.

### VIII.3.- COMBINACIONES COMUNES

Es conocido que el introducir la tubería de revestimiento dentro de un agujero determinado con equipo de flotación, con -- orificio reducido; ésta; actúa como un pistón gigante que se des<sup>pl</sup>aza dentro de un cilindro de paredes irregulares, y que la presencia del fluido de perforación, el cual se hace más pesado por la adición de los recortes, actúa como un sello que hace el efecto de los anillos del pistón, esto ocasiona presiones elevadas - que a su vez originan rupturas de la formación causando fractu<sup>ras</sup>; pérdidas de circulación o bloqueos de las formaciones pro<sup>ductores</sup>. La eliminación de estos golpes de presión, se logra - mediante una combinación adecuada de dispositivos (zapata y cople) que permiten introducir la tubería de revestimiento a velocidad normal.

Las diferentes combinaciones que se pueden efectuar con estos accesorios son:

- |                 |  |
|-----------------|--|
| 1) T.R. 20"     | Zapata guía y cople flotador                                     |
| 2) T.R. 16"     | Zapata guía y cople flotador                                     |
| 3) T.R. 13 3/8  | Zapata guía y cople flotador                                     |
| 4) T.R. 10 3/4" | Zapata guía y cople flotador<br>(hasta 900.0 m. de profundidad). |

- 5) T.R. 9 5/8" Zapata guía y cople diferencial a mayor profundidad.
- Zapata guía y cople flotador (hasta 900 m. de profundidad)
- Zapata guía y cople diferencial (a mayor profundidad)
- 6) T.R. 7 5/8" Zapata guía y cople diferencial
- Zapata flotadora tipo "V" y cople de retención en los casos de tuberías cortas.
- Complemento de 7 5/8" Cople de orificio y conector (Tie Back)
- 7) T.R. 7" Zapata guía y cople diferencial
- Zapata flotadora tipo "V" y cople de retención en el caso de - tuberías cortas.
- Complemento de 7" Cople de orificio y conector (Tie Back)
- 8) T.R. 6 5/8" Zapata flotadora y cople de retención (hasta 1200 m. de profundidad).

Zapata guía y cople diferencial  
a mayor profundidad.

9) T.R. 5"

Zapata flotadora tipo "V" y co-  
ple de retención.

## IX. EJEMPLOS DE DISEÑO PRACTICO PARA LA CEMENTACION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.

### IX.1.- GENERALIDADES

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para que la T.R., cumpla satisfactoriamente sus objetivos, es necesario que esta sea cementada.

En este capítulo se presenta una breve explicación y ejemplos de cementaciones primarias de T.R., para que de una manera clara y rápida se pueda entender que es una cementación y la importancia que reviste su correcto diseño.

La cementación de un pozo de aceite es el proceso de mezclar cemento con agua, formando lo que comúnmente se conoce como lechada, y bombearla abajo a través de la T.R. desplazándola hasta que sube por el espacio anular. Este proceso se le conoce como cementación primaria.

Las funciones principales de una cementación primaria son:

1. Cementar y sostener la T.R.
2. Restringir el movimiento de los fluidos entre estratos.
3. Auxiliar y prevenir los descontrolados.

4. Proteger la T.R. de la corrosión y los golpes
5. Sellar las zonas con pérdida de circulación.

#### IX.2.- MECANISMOS DE DESPLAZAMIENTO

Para lograr que la cementación sea eficiente es necesario que el desplazamiento de la lechada y el lodo se realicen en la forma más adecuada posible, para lo cual se recomienda lo siguiente:

1. Centrar la tubería en el pozo
2. Mover la T.R. durante el acondicionamiento del lodo y la cementación.
3. Acondicionar el lodo antes de la cementación
4. Evitar reacciones adversas lodo-cemento
5. Controlar los gastos de desplazamiento y la reología de la lechada

#### IX.3.- ETAPAS EN UN PROYECTO DE CEMENTACION

Quando se manejan proyectos de cementación de pozos, se pueden definir cinco áreas de actividad, estas pueden ser clasificadas como sigue:

- A) Definición de las condiciones conocidas y de las variables esperadas.

- B) Proposiciones iniciales de solución
- C) Diseño detallado
- D) Ejecución del proyecto
- E) Evaluación de resultados.

La etapa (A) constituye la búsqueda y anotación de los datos necesarios para la etapa (B), la cual consiste en proponer - posibles soluciones, estas soluciones son cuidadosamente revisadas en cuanto a factibilidad y eficiencia, por medio de cálculos y pruebas de laboratorios en la etapa (C). La etapa (D) consiste en la cementación en sí, una vez que la sarta de T.R., ha sido cementada entonces la eficiencia de la cementación es analizada en la etapa (E).

Las conclusiones obtenidas en (E) pueden ser usadas como - bases para la etapa (A) del siguiente proyecto.

En este capítulo se centra la atención sobre una parte de la etapa (C), que consiste en el diseño.

#### IX.4.- DISEÑO

El diseño de una proposición tentativa de solución involucra dos etapas importantes:

- Trabajo de laboratorio:

Determinar la concentración de aditivos requerida para

producir una lechada con las propiedades más ventajosas posibles y la medida real de los valores de esas propiedades bajo condiciones simuladas.

- Cálculo de volúmenes, gastos y presiones

De acuerdo a los valores de las propiedades reológicas de la lechada se diseña la cementación, ésta podrá programarse en flujo turbulento o flujo tapón.

## ANALISIS HIDRAULICO PARA LA OPERACION DE CEMENTACION

"El análisis hidráulico de un pozo es de gran importancia para el diseño de las operaciones de cementación y la selección de equipo, materiales y técnicas, que complementaran las prácticas modernas para una mejor terminación de los pozos". La tecnología de los fluidos no-newtonianos ha avanzado y un análisis -- adecuado definirá las propiedades del fluido que intervendrá en la operación. Estas propiedades permiten calcular el número de Reynolds y la velocidad crítica, o sea la velocidad que establece el patrón de flujo de fluido sea éste laminar o turbulento.

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.

Se ha establecido por varios investigadores que cuando se utiliza el régimen de flujo turbulento, se obtiene un desplazamiento más efectivo del lodo, en el espacio anular, lográndose -- por consiguiente una mayor adherencia del cemento. Este patrón de flujo genera altas caídas de presión, por lo que la aplicación de esta técnica queda limitada a formaciones cuyo gradiente de presión de fractura sea mayor que el gradiente de presión generado durante la operación de cementación.

## B. ECUACIONES DE FLUJO Y PROCEDIMIENTO DE CALCULO

La ecuación básica para el análisis hidráulico es la ecuación del número de Reynolds que define el patrón de flujo de acuerdo a las propiedades del fluido, al diámetro y a la velocidad, ver tabla IX.1, y permite el cálculo del factor de fricción.

ECUACIONES PARA  $N_{Re}$  Y FACTOR DE FRICCIÓN

		NEWTONIANOS	PLASTICOS DE BINGHAM	PSEUDOPLASTICOS
NUMERO DE REYNOLDS		$N_{Re} = \frac{928 \rho V D}{\mu}$	$N_{Re} = \frac{928 \rho V D}{\mu_p}$	$N_{Re} = \frac{1.86 v^{2-n'} D^{n'}}{(96)^{n'} K' \left( \frac{3n'+1}{4n'} \right)^{n'}}$
NUMERO DE REYNOLDS CRITICO		$N_{Re} = 2100$	$N_{Re} < 2000$ : laminar $N_{Re} > 3000$ : turbulento	$N_{Rc} = 3470 - 1370 n'$
FACTOR DE FRICCIÓN	LAMINAR	$f = \frac{16}{N_{Re}}$		
	TURBULENTO	$f = 0.057 (N_{Re})^{-0.2}$	$f = \frac{c}{N_{Re}^b}$ $c = \frac{\log n' + 2.5}{50}$ $b = \frac{1.4 - \log n'}{7}$	

TABLA IX - 1

Las pérdidas de presión por fricción se calculan con la siguiente ecuación:

$$P_f = \frac{0.039 f \rho L V^2}{D}$$

El gasto en las diferentes secciones del sistema se calculan de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Gasto} = \text{área} \times \text{velocidad}$$

En unidades prácticas se tiene:

$$q_b = \frac{V \times D^2}{17.5}$$

La potencia hidráulica necesaria para desplazar los flujos se calcula con la ecuación siguiente:

$$\text{HHP} = 0.0245 P_w q_b$$

donde:

$$P_w = \sum \Delta P + P_{ha} - P_{hc}$$

Un parámetro de gran importancia en una operación donde prevalezca el flujo turbulento, es el tiempo de contacto, el cual se define como "el intervalo de tiempo en que un punto de la pared del pozo permanece en contacto con la lechada de cemento". Las experiencias de campo indican que un tiempo mínimo de 10 minutos da por resultado buenas cementaciones primarias.

#### PROCEDIMIENTO:

- A) Calcular la velocidad crítica, que es la velocidad mínima para alcanzar flujo turbulento, en la zona a cementar, de acuerdo a la ecuación del número de Reynolds.

- B) Calcular el gasto que se tendrá de acuerdo a la velocidad crítica (gasto crítico).
- C) Revisar el volumen de lechada de acuerdo al tiempo - de contacto.
- volumen de > gasto crítico x tiempo de contacto lechada.
- D) De acuerdo al gasto, determinar las velocidades de - circulación en las diferentes secciones (interiores y exteriores) del pozo.
- E) Calcular el número de Reynolds para cada velocidad - obtenida en el paso (D) y también el factor de fricción.
- F) Calcular las caídas de presión en cada sección, de - acuerdo a la posición de los fluidos, en el pozo.
- G) Calcular el gradiente de los fluidos, considerando - las pérdidas de presión y compararlo con el gradiente de fractura.
- H) Determina la potencia hidráulica.

## EJEMPLO 1.

Profundidad total :	14760 pies
T.R. a cementar:	7", 38 Lb/pie.,
Barrena:	8 1/2"

Ultima T.R.:	10 3/4", 55.5 Lb/pie a 7000 pies.
Gradiente de fractura en el fondo:	0.790 Lb/Pg <sup>2</sup> /Pie
Címa de cemento:	7000 Pies
Lechada Óptima (laboratorio)	Cemento tipo G, 1.5% en Peso bentonita, 0.2% retardador

## Propiedades de los fluidos:

	Lechada	Lodo
n'	0.250	0.220
K' $\left[ \frac{\text{Lb Seg}^{n'}}{\text{Pie}^2} \right]$	0.100	0.066
$\rho$ [lb/gal]	15.2	12.5

## Calcular:

- El gasto necesario para obtener flujo turbulento.
- La presión superficial al iniciar el desplazamiento.
- La presión superficial al terminar el desplazamiento.
- La potencia hidráulica necesaria.
- El gradiente total generado en la operación.

## Solución:

- de tablas técnicas obtenemos:

diametro interior de T.R. 7" 38 Lb/pie = 5.920 Pg

diametro interior de T.R. 10 3/4 de 55.5 Lb/pie = 9.760 Pg

Capacidad volumétrica de T.R. 7" 38 Lb/pie = 0.0340 hl/pie

Capacidad volumétrica entre T.R. 10 3/4" y 7"=0.0449bl/pie

Capacidad volumétrica entre T.R. y agujero=0.0226 bl/pie

- Velocidad crítica en espacio anular T.R. 7"-agujero.

$$N_{Re(c)} = 3470 - (1370)^{n'} = \frac{1.86 (15.21) (Vc)^{2-0.25} (8.5-7)^{0.25}}{(96)^{0.25} (0.1) \left(\frac{3 \times 0.25 + 1}{4 \times 0.25}\right)^{0.25}} =$$

$$\frac{31.288 Vc^{1.75}}{0.36}$$

Vc = 8.22 pies/seg.

- Gasto crítico

$$b = \frac{(8.5^2 - 7^2) (8.22)}{17.15} = \underline{11.14 \text{ Bl/min.}}$$

- Revisión tiempo de contacto.

Volúmen de lechada= 0.0226(14760-7000)=175.4 Bl.

Tiempo de contacto= 175.4/11.14= 15.7 min. > 10 min.

- Velocidad en el Sistema. Para mantener flujo turbulento en el espacio anular.

$$1. \text{ Interior de T.R. } v = \frac{11.14 \times 17.15}{(5.920)^2} = 5.45 \text{ pies/seg.}$$

$$2. \text{ Entre T.R. 10 3/4 y 7" } v = \frac{11.14 - 17.15}{9.760^2 - 7^2} = 4.13 \text{ pies/seg.}$$

- Pérdidas de Presión por fricción. (para cada 1000 pies)

1. Cemento dentro de T.R.

$$N_{Re} = \frac{1.86 (15.2) (5.45)^{1.75} (5.920)^{0.25}}{0.36} = 857 < 3463.9 \therefore$$

régimen laminar

$$f = \frac{16}{857} = 0.0187$$

$$P_f = \frac{0.039 \times 1000 \times 15.2 \times 5.45^2 \times 0.0187}{5.920} = 55.6 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies}$$

## 2. Cemento en espacio anular T.R. agujero

$$C = \frac{\log(0.25) + 2.5}{50} = 0.038 \quad b = \frac{1.4 - \log(0.25)}{7} = 0.286$$

$$f = \frac{0.038}{(3464)^{0.286}} = 0.0037$$

$$P_f = \frac{0.039 \times 1000 \times 15.2 \times 8.22^2 \times 0.0037}{8.5-7} = 98.8 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies}$$

## 3. Lodo dentro de T.R.

$$N_{Re} = \frac{(1.86) (12) (5.45)^{2-0.22} (5.920)^{0.22}}{(96)^{0.22} \times 0.066 \left(\frac{3 \times 0.22 + 1}{4 \times 0.22}\right)^{0.22}} = 3259$$

$$N_{Re(cc)} = 3470 - (1370)^{0.22} = 3465 > 3259 \therefore \text{flujo laminar}$$

$$f = \frac{16}{3259} = 0.0049$$

$$P_f = \frac{0.039 \times 1000 \times 12 \times 5.45^2 \times 0.0049}{5.920} = 11.9 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies}$$

## 4. Lodo en espacio anular T.R. agujero.

$$N_{Re} = \frac{1.86 \times 12 \times (8.22)^{2-0.22} \times (8.5-7)^{0.22}}{(96)^{0.22} \times 0.066 \left(\frac{3 \times 0.22 + 1}{4 \times 0.22}\right)^{0.22}} = 5007$$

$$5007 > 3465 \therefore \text{flujo turbulento}$$

$$c = \frac{\log (0.22) + 2.5}{50} = 0.0368$$

$$b = \frac{1.4 - \log (0.22)}{7} = 0.2939$$

$$f = \frac{0.0368}{(5007)^{0.2939}} = 0.0030$$

$$f = 0.0030$$

$$P_f = \frac{(0.039 \times 1000 \times 12 \times 18.22)^2 \times 0.003}{8.5 - 7} = 63.2$$

$$P_f = 63.2 \text{ lb/pg}^2/1000 \text{ pies}$$

5. Lodo en espacio anular T.R. 7" y 10 3/4"

$$N_{Re} = \frac{(1.86) (12) (4.13)^{2-0.22} (9.76-7)^{0.22}}{0.20715} = 1682 < 3465 \therefore \text{flujo laminar}$$

$$f = \frac{16}{1682} = 0.0095$$

$$P_f = \frac{0.039 \times 1000 \times 12 \times (4.13)^2 \times 0.0095}{9.76 - 7} = \frac{28.6 \text{ Lb/Pg}^2}{1000 \text{ pies.}}$$

- Análisis hidráulico.

1. Lechada dentro de T.R.

$$\text{Altura de la lechada en T.R.} = 175.4/0.0340 = 5158.8 \text{ pies}$$

$$5158.8 \text{ pies} \times 55.6 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies} = 286.8 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$9601.2 \text{ pies} \times 11.9 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies} = 114.2 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$7760 \text{ pies} \times 68.2 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies} = 490.4 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$7000 \text{ pies} \times 28.6 \text{ Lb/Pg}^2/1000 \text{ pies} = \underline{200.2} \text{ Lb/Pg}^2$$

$$\text{Pérdida de presión por fricción} = 1091.6 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$Phc = (5158.8 \times 0.790) + (9601.2 \times 0.624) = 10066.6 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$Pha = 14760 \times 0.624 = 9210 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$Pw = 9210 - 10066.6 + 1091.6 = 235.2 \text{ Lb/Pg}^2$$

es la presión que se manifestará al iniciar el desplazamiento.

## 2. Cemento en el espacio anular

$$14760 \text{ pies} \times 11.9 \text{ Lb/Pg}^2 / 1000 \text{ pies} = 175.64 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$7760 \text{ pies} \times 98.8 \text{ Lb/Pg}^2 / 1000 \text{ pies} = 766.69 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$7000 \text{ pies} \times 28.6 \text{ Lb/Pg}^2 / 1000 \text{ pies} = \underline{200.20} \text{ Lb/Pg}^2$$

$$\text{Pérdida de presión por fricción total} = 1142.53 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$Phc = 14760 \times 0.624 = 9210.24 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$Pha = (7760 \times 0.790) + (7000 \times 0.624) = 10498.4$$

$$Pw = 10498.4 - 9210.24 + 1142.53 = 2430.69 \text{ Lb/Pg}^2$$

es la presión con la que finalizará el desplazamiento.

$$HHP = 0.0245 \times 2430.69 \times 11.14 = 663.4 \text{ HP}$$

es la potencia hidráulica necesaria para el desplazamiento.

- Gradiente máximo, generado en la operación

$$\text{Presión máxima en el fondo} = \left[ \text{Presión hidrostática lodo-cemento} \right] + \left[ \text{Pérdida por fricción en espacio anular} \right]$$

$$\text{Presión máxima en el fondo} = 10498.4 + 766.69 + 200.20 = 11465.29 \text{ Lb/Pg}^2$$

$$\text{Gradiente máximo} = \frac{11465.29}{14760} = 0.776 \text{ Lb/Pg}^2 / 1000 \text{ pies}$$

0.776 < 0.79 ∴ La operación de cementar si se puede --  
realizar en régimen de flujo turbulento.

#### CALCULOS DE CANTIDADES DE MATERIAL Y DE TIEMPOS.

Una vez que se ha diseñado la cementación se procede a -  
calcular las cantidades de los materiales que componen la lechada, así como los tiempos de mezclado y de desplazamiento de - -  
acuerdo al volúmen de lechada y al gasto de desplazamiento.

Las ecuaciones más importantes en estos cálculos son los  
del rendimiento , densidad y gasto.

$$\text{Rendimiento} = \text{Vol. agua} + \text{Vol. cemento} + \text{Vol. aditivo}$$

$$\text{Densidad} = \text{Masa} / \text{volumen}$$

$$\text{Gasto} = \text{Velocidad} \times \text{tiempo}$$

#### RENDIMIENTO:

El rendimiento de lechada se refiere a el volumen de esta,  
obtenido cuando se mezcla un saco de cemento con una cantidad es  
pecificada de agua y aditivos.

#### EJEMPLO 2:

Tomando los datos del ejemplo 1 y los siguientes datos --

adicionales.

Requerimiento de  
agua para cemento = 44%

Requerimiento de  
agua para bentonií  
ta = 53% / 1% bentonita

1 saco de cemento = 110.13 lb

$f$  cemento = 26.2 lb/gal

$f$  bentonita = 22.09 lb/gal

considerar despreciable la concentración de retardador.

**CALCULAR:**

- Volumen de lechada
- Rendimiento de la lechada
- Cantidad de cemento requerida.
- Cantidad de agua requerida.
- Tiempo para mezclar.
- Volumen de lodo para desplazar.
- Tiempo para desplazar.
- Tiempo de bombeabilidad.
- Volumen de lechada

del análisis hidráulico, volumen de lechada = 175.4  
barriles.

- Rendimiento.

Rendimiento = V cemento + V bentonita + V agua/cemento + V agua/bentonita.

$$V \text{ cemento} = \frac{110.13}{26.2} = 4.20 \text{ gal.}$$

$$V \text{ bentonita} = \frac{110.13 \times 0.015}{22.09} = 0.075 \text{ gal}$$

$$V \text{ agua/cemento} = \frac{110.13 \times 0.44}{8.33} = 5.82 \text{ gal}$$

$$V \text{ agua/bentonita} = \frac{110.13 \times 0.053 \times 1.5}{8.33} = 1.05 \text{ gal}$$

$$V \text{ agua total} = 5.82 + 1.05 = 6.87 \text{ gal.}$$

$$\text{Rendimiento} = 4.20 + 0.075 + 6.87 = 11.15 \frac{\text{gal}}{\text{saco}}$$

$$\text{- cantidad de cemento} = \frac{175.4 \text{ Bl} \times \frac{42 \text{ gal}}{1 \text{ Bl}}}{11.15 \frac{\text{Gal}}{\text{saco}}} = 660.7 = 661 \text{ sacos}$$

$$\text{- cantidad de agua} = 661 \times 6.87 = 4541 \text{ gal} = 108.1 \text{ Bls.}$$

- Tiempo para mezclar.

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{volumen}}{\text{gasto}} = \frac{175.4}{11.14} = 15.75 = 16 \text{ minutos.}$$

- Volumen de lodo para desplazar.

$$\begin{aligned} \text{Vol} &= \text{Cap. T.R.} \times \text{Profundidad} \\ &= 0.0340 \times 14760 = 500.8 = 501 \text{ barriles} \end{aligned}$$

- Tiempo para desplazar

$$\text{Tiempo} = \frac{501}{11.14} = 45 \text{ minutos}$$

- Tiempo de bombeabilidad.

$$\text{Tiempo} = 45 + 16 = 61 \text{ min.}$$

Considerando un 200% de exceso.

$$\text{tiempo} = 183 \text{ min.} = 3 \text{ hrs.}$$

#### NOMENCLATURA

C, b.-	Constantes -----	adimensional
D.-	Diámetro -----	pg
f.-	Factor de fricción -----	adimensional
HHP.-	Potencia hidráulica necesaria-----	HP
K'.-	Índice de consistencia del fluido--	lb seg <sup>n'</sup> /pie <sup>2</sup>
L.-	Longitud por analizar -----	pies
n'.-	Índice de comportamiento del fluido	adimensional
N <sub>Re</sub> .-	Número de Reynolds -----	adimensional
P <sub>f</sub> .-	Pérdida de Presión por fricción----	lb/pg <sup>2</sup>
Pw.-	Presión de operación en la superfi- cie -----	lb'/pg <sup>2</sup>
qb.-	Gasto de flujo -----	bl/min
V.-	Velocidad del fluido-----	pies/seg
.	Viscosidad -----	Cp
p.-	Viscosidad plástica -----	Cp
.	Densidad del fluido -----	lb/gal

## CAPITULO X

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todos los métodos de diseño son realmente sencillos lo - difícil es determinar las cargas a encontrar en el pozo.

Puede verse que el método de diseño de cargas máximas es el más completo de los aquí presentados, pues permite representar las cargas sobre la T.R. en forma real, lo que proporciona más ligeras y económicas o más seguras.

Sin embargo se recomienda su uso sólo en pozos donde los gradientes y condiciones están bien determinadas.

El método analítico se recomienda para pozos explorato- rios debido a las severas condiciones de carga que se conside- ran en el mismo, motivo por el cual los diseños resultan en sa- muy resistentes.

La ventaja de las gráficas youngstown es su rapidez, pero esta ventaja desaparece debido a que los demás métodos pueden - ser fácilmente programados en computadora.

El método práctico es casi tan rápido como las gráficas youngstown y además presenta la ventaja de no requerir elaborar gráficas como el método de cargas máximas, y no presenta calcu- los de ensayo y error como el método analítico por lo que es -- una buena opción donde el método de cargas máximo tenga difícil- tades de aplicación.

El análisis hidráulico para la cementación de una T.R. es muy laborioso, aunque solo se haga en forma práctica, por lo cual se recomienda elaborar programas de cómputo para que se puedan considerar todas las condiciones.

De los métodos empleados para la determinación del gradiente de fractura, se puede observar que el método de Eaton - tiene una mayor facilidad de manejo y exactitud.

## XI. BIBLIOGRAFIA

- B.C. Craft W.R. Holden and E.D. Graves Jr.  
Well Design, Drilling and Production.  
Pretince-Hall, Inic.  
Englewood Cliffs, New Jersey (1962)
- Benitez Hernández M.A.: "Apuntes de Tecnología de perforación"  
UNAM, 1984.
- Benítez Hernández Miguel A.: "Diseño de tuberías de revesti-  
miento y cementación"  
Subdirección de Desarrollo Profesional, IMP, 1983
- Dowell Schlumberger company: "Cementing Technology"  
Nova Communications Ltd for Dowell Schlumberger. 1984.
- Halliburton Company: "Halliburton Cementing Tables"
- Halliburton Company: "Practical casign design"  
Nota Técnica, 1976.
- Martínez G.R. - Islas J.S.: "Diseño de sartas de revestimien-  
to".  
Subdirección de Tecnología de explotación, IMP, 1988.
- Poblano Ordóñez R.: "Cementación de tuberías de revestimien-  
to en pozos con presiones anormales".  
Ingeniería Petrolera, enero/1985.

- Poblano O.R. Martínez G.R.: "Diseño de tuberías de revestimiento por carga máxima".  
Ingeniería Petrolera diciembre/1987.
- Presición mecánica, S.A.: "Manual de tuberías cortas, componentes y cementación".
- Prentice. C.M.: "Maximam load casing design"  
Journal of Petroleum Technology, Julio/1971.
- Rodríguez Patiño, Daniel S.: "Consideraciones teórico-prácticas en el diseño de las tuberías de revestimiento".  
Ingeniería Petrolera, octubre/87.