



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**APUNTES DE
TECNOLOGIA
DE PERFORACION
(PRIMERA PARTE)**

MIGUEL A. BENITEZ HERNANDEZ

TECNOLOGIA DE PERFORACION

"APUNTES"

1a. PARTE

CONTENIDO:

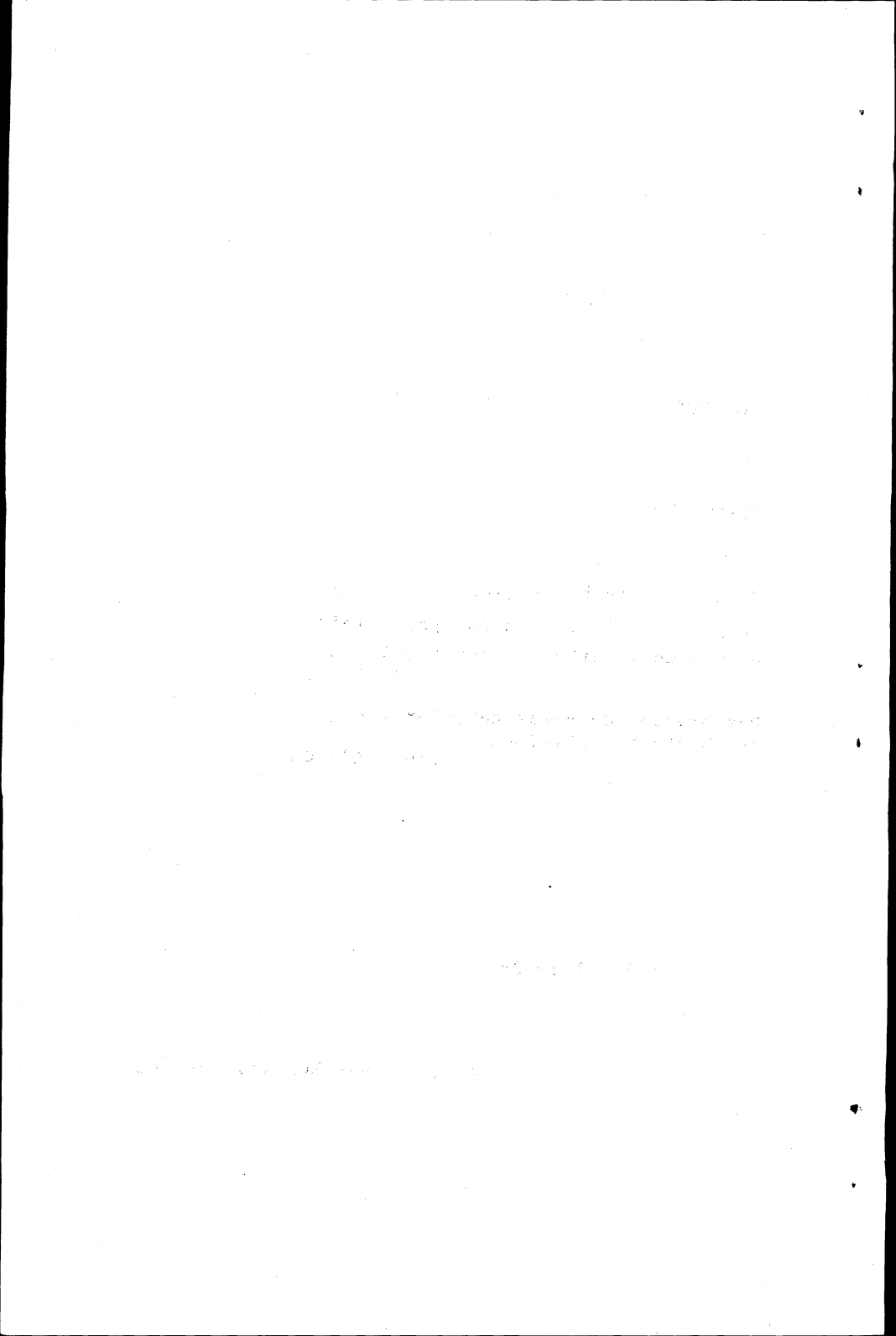
Principios de hidráulica aplicada a
la perforación rotatoria pags. 1-16

Diseño de Tuberías de revestimiento
pags. 17-51

Perforación de pozos petroleros con
orientación controlada. pags. 52-103

AÑO DE 1982

Ing. Miguel Angel Benítez Hernández.



INTRODUCCION.

En el siguiente material sobre hidráulica se presenta una pequeña aplicación a la perforación rotaria, no como una técnica profunda al respecto. Es una recopilación de algunos datos ya existentes; solamente se intenta con ellos mostrar al personal de campo los principios básicos de hidráulica de fluidos.

Se piensa que mucho tiempo y trabajo se ha empleado en la aplicación correcta de los principios hidráulicos en los trabajos de perforación; también es cierto que grandes sumas de dinero se han gastado para proveer a los equipos de perforación de más eficientes dispositivos hidráulicos. Se trata con estas ideas de ayudar a completar esos esfuerzos.

Por ahora es bien conocido que en la mayoría de los equipos se utilizan barrenas con toberas. Estos equipos tienen bombas de alta presión, tuberías con gran diámetro interior y toberas cuidadosamente seleccionadas en las barrenas. Todo este esfuerzo y el equipo, no darán su completo rendimiento a menos que el fluido de perforación se programe con igual cuidado.

Así que el propósito de estos apuntes es motivar a la gente del campo a formular sus programas de lodo, de manera que se ajusten a las capacidades hidráulicas del equipo con que cuentan.

Estos conocimientos permitirán operar con mayor eficiencia y servirán de enlace entre los operadores y los encargados del equipo, para que los resultados sean satisfactorios para ambos.

EQUIPO DE BOMBEO

De todas las operaciones de perforación, en la que más caballos de fuerza-horas se utilizan es en el ciclo de circulación.

Las bombas para lodo, tubería de perforación, uniones, lastrabarreras, toberas de la barrena y líneas de flujo, deben estudiarse con sumo cuidado; pero con principal interés las bombas para lodo evaluando su adaptación a cualquier trabajo con lodo, debiendo de terminarse su tamaño y su presión de trabajo para determinada velocidad del lodo en el espacio anular. Las bombas de potencia, de doble y triple acción, son el tipo más común que se emplea hoy en día.

Como bombas de potencia se entiende aquellas que se mueven por medio de un cigüeñal. Por doble acción se entiende que el lodo es bombeado por ambos lados del pistón. Cuando el pistón hace una carrera, cierto volumen de fluido es bombeado; este volumen se termina por el diámetro del cilindro y la longitud de la carrera, restando el volumen del vástago, para obtener el volumen por golpe o carrera.

Grandes volúmenes y altas presiones se requieren hoy para obtener altos valores de avance en la perforación, particularmente con las barrenas mencionadas, lo que implica severas condiciones de operación de estas bombas.

Consecuentemente, en la mayoría de los equipos se operan las bombas a, o cerca de su máxima capacidad. Esto significa que los Ingenieros en lodos disponen de poca capacidad adicional en casos de problemas en el pozo y deben ayudarse a resolver estos problemas en el pozo mediante principios hidráulicos o por los conocimientos de las propiedades del flujo.

La potencia suministrada a la bomba para su operación se llama "energía recibida" (in-put) en caballos, y la potencia obtenida (out-put) de la bomba se llama potencia hidráulica.

La potencia obtenida (out-put) siempre es menor que la potencia suministrada (in-put). Resumiendo: Las bombas para lodos de perforación se fabrican en una gran variedad de tamaños y de potencia suministrada; proporcionan un gasto y una presión de descarga que son gobernados por cuatro factores:

- (1) Velocidad de la bomba.
- (2) Diámetro de la camisa y el pistón.
- (3) Longitud de la carrera.
- (4) Eficiencia de la bomba.

La mayoría de las bombas operan aproximadamente a 85% de eficiencia mecánica y 100% de eficiencia volumétrica, una reducción del tamaño de la camisa permitirá elevar la presión de descarga, pero se reducirá el volumen.

CAIDA DE PRESION

En cualquier pozo, una cierta presión es necesaria mientras se está perforando. Esta presión se requiere para vencer las pérdidas de presión que ocurren en el sistema. Estas pérdidas ocurren en todo el sistema de circulación y son resultado de la resistencia al flujo.

Las pérdidas son proporcionales a la densidad y a la viscosidad del lodo, al diámetro de la tubería a través de la cual se bombea el lodo y al gasto del lodo que se bombea. Por conveniencia, las pérdidas de presión por fricción se dividen en cuatro grupos para el análisis de cualquier lodo dado y cualquier gasto de circulación, como sigue:

- A.- Pérdidas a través del equipo superficial.
 - a.- Líneas de lodo
 - b.- Tubo vertical
 - c.- Manguera.
 - d.- Unión giratoria.
 - e.- Flecha o vástago.
- B.- Pérdidas a través del interior de la sarta.
 - a.- Juntas de la tubería.
 - b.- Tubería de perforación.
 - c.- Lastrarrenas.
- C.- Pérdidas de presión a través de las toberas o vías de la barrenas.
- D.- Pérdidas debido al retorno del fluido por espacio anular.

- a.- Causadas por los lastrabarrenas.
- b.- Causadas por las juntas de la tubería de perforación.
- c.- Causadas por la tubería de perforación.

Equipo Superficial

Pérdidas de presión en el equipo superficial ocurren principalmente en las conexiones del equipo de perforación, así como en las líneas de lodo. Las líneas de lodo son generalmente de diámetro suficiente para permitir el movimiento fácil del fluido. Las pérdidas superficiales son directamente relacionadas con el diámetro interior y la longitud del tubo vertical (stand-pipe), manguera (rotary hose) unión giratoria (swivel) válvulas, etc., pero generalmente en los análisis de pérdidas de presión no se consideran la flecha o vástago, dado que su valor varía en cada instalación. Por ejemplo para una flecha 3 1/2" DI de 40' de longitud con una circulación de 400 gal/min se produce una caída de presión de 27 lb/pg² y para una flecha de 2 1/2" DI y 40' de longitud la caída de presión con el mismo gasto de lodo es de 125 lb/pg².

PERDIDA DE PRESION EN LA SARTA DE PERFORACION.

Las pérdidas de presión en la sarta de perforación son causadas por la fricción que ocurre por el lodo bombeado dentro de la tubería, juntas y lastrabarrenas. En general las pérdidas de presión son menores en tuberías "internal flush" y de diámetro interior extra (extra hole) y mayores en tuberías reforzadas en su interior y en las de tamaño API.

En los lastrabarrenas con diámetro interior mayor, se producen menores pérdidas por fricción. En resumen entre más grande es el diámetro interior de la tubería menor será la pérdida por fricción. Por ejemplo una tubería de 3 1/2" API con 1 1/2" diámetro interior, con circulación de 400 gal/min produce una pérdida de fricción de 510 lb/pg² por 1000-pies, mientras que el mismo gasto de lodo, circulando por una tubería de 3 1/2" "internal flush" con 2 11/16" de diámetro interior produce una pérdida de presión de solamente 200 lb/pg² por 1000 pies. Un lastrabarrena de 2" de diámetro interior con el mismo gasto de lodo anterior tiene una pérdida de presión de 160 lb/pg² por 100 pies mientras que un lastrabarrena con 3" de diámetro interior tiene únicamente 25 lb/pg² por 100 pies de longitud.

CAIDA DE PRESION A TRAVES DE LAS TOBERAS DE LA BARRENA.

Actualmente sólo se usan las barrenas de toberas. Las barrenas de toberas circulan el fluido hacia la formación.

La caída de presión a través de las toberas de la barrena es proporcional al gasto de circulación y al área de la tobera. Los requerimientos de circulación para barrenas son usualmente los necesarios, si el volumen del lodo que circula es suficiente para proporcionar una velocidad en el espacio anular de aproximadamente 125 pies/min. Las vías de agua en las barrenas regulares están diseñadas para proporcionar una velocidad a través de las toberas menor de 125 pies/seg en condiciones normales, ya que altas velocidades pueden causar daños en los dientes y en los conos, por la acción de golpeo directamente a los conos. El tamaño de -

las toberas debe ajustarse para producir velocidades del rango de 250 a 350 pies/seg. y obtener el máximo beneficio por la acción del chorro en el fondo del agujero. Por lo tanto, para un gasto dado, la caída de presión a través de la tobera de la barrena es alta.

Por ejemplo un gasto de circulación de lodo de 500 gal/min en una barrena con 3 toberas, de 3/4", se tendrá una caída de presión de únicamente 131 lb/pg².

Con el mismo lodo y el mismo gasto, una barrena con 3 toberas de 1/2" proporcionará una caída de presión de 664 lb/pg².

CAIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR.

Las pérdidas de presión aquí son debidas al retorno del fluido a través del espacio anular entre la parte exterior de la tubería de perforación y las paredes del agujero. Generalmente la sarta de perforación está formada por la tubería, las juntas y los lastrabarreas (drill collars). Cada pieza de este equipo tiene un diámetro exterior diferente, por lo tanto la caída de presión será diferente en cada caso. En resumen el diámetro del agujero, el diámetro exterior de cada pieza de la sarta y el gasto de circulación son los factores a considerar para determinar la caída de presión en el retorno del fluido por el espacio anular.

PROPIEDADES DEL FLUJO, MODELOS Y FLUIDOS

En cualquier consideración relativa a la aplicación de las propiedades del flujo en los problemas del lodo de perforación, se hace evidente que para propósitos de estudio, los fluidos se deben separar en categorías de acuerdo con su tiempo y con el modelo de flujo.

Tipos:

- 1.- Fluidos verdaderos o fluidos Newtonianos (agua, etc.)
- 2.- Fluidos plásticos o fluidos no Newtonianos (Lodo de perforación etc.)

Modelos:

- 1.- Flujo turbulento
- 2.- Flujo plástico o laminar.

Fluidos verdaderos.- Consideremos como un ejemplo de fluido verdadero agua compuesta, en reposo en una tubería, con velocidad cero y la presión cero. Si cualquier fuerza mayor que cero es aplicada, el agua se empieza a mover y se moverá tanto como sea la presión aplicada.

Si la presión se aumenta, la velocidad también aumentará igualmente. Esto es, con un fluido verdadero la velocidad es directamente proporcional a la presión. El agua que es un fluido verdadero, no permanece como tal cuando se usa como fluido de perforación, ya que los sólidos que se perforan son retenidos en el fluido y la viscosidad y densidad gradualmente se incrementan en el sistema.

A medida que la densidad y la viscosidad aumentan, el fluido deja el estado de Newtoniano o flujo verdadero y pasa a la clasificación de fluido plástico (o no Newtoniano).

Fluidos Plásticos.- Un fluido plástico difiere de un fluido verdadero de la manera siguiente:

- 1). Una presión definida se requiere para iniciar y mantenerlo en movimiento; y si la presión se disminuye, el movimiento puede cesar antes que la presión sea cero.
- 2). La velocidad no es directamente proporcional a la presión. Casi sin excepción los fluidos usados en la perforación de pozos caen dentro de esta clasificación.

Las pérdidas de presión, en sistemas de lodos que tengan propiedades plásticas, se determinan considerando: la densidad, la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

Los requerimientos de potencia y pérdidas de presión en fluidos plásticos aumentan rápidamente a medida que sus características se incrementan. Por ejemplo, un sistema de lodos de 10 lb/gal de densidad y una caída de presión total de 950 lb/pg²; tendrá una caída de presión de 1575 lb/pg² si la densidad del lodo aumenta a 15 lb/gal y las otras variables permanecen constantes. Por lo que es fácil ver que la caída de presión es proporcional a la densidad del lodo.

Flujo Turbulento.- En flujo turbulento, las partículas del líquido no se mueven individualmente en líneas recta o curva paralela a las paredes del agujero, si no que lo hacen en forma de remolino y casi en desorden dentro de la tubería o en el agujero.

La fuerza o la presión aplicada en el bombeo del fluido tendrá -- que ser tal que la acción de deslizamiento de las partículas las haga rolar en desorden. Aquí la densidad del fluido es el factor más importante en la caída de presión y la viscosidad asume una menor función y puede desaparecer enteramente en casos de un alto valor de flujo.

Ambos, Fluidos verdaderos y Fluidos Plásticos.- Pueden asumir características o modelos de flujos turbulentos.

Hay dos maneras de lograr turbulencia en el espacio anular, donde las condiciones del flujo laminar prevalezcan:

1. Reducir el valor de cedencia o la viscosidad plástica o ambas.
- 2.- Aumentar la velocidad anular a un punto más allá de la velocidad crítica.

Estos trabajos hacen que un flujo laminar en un sistema se pueda hacer flujo turbulento. La mayoría de las autoridades están de acuerdo en que el modelo de flujo laminar tiene las condiciones más deseables para limpiar el agujero.

FLUJO LAMINAR

Cuando este tipo de flujo existe, cada partícula individual del líquido se mueve en línea paralela al tubo. No todas las partículas se moverán a la misma velocidad, las partículas de líquido -- que están en contacto con las paredes del agujero igual que las partículas cercanas a la pared de la tubería de perforación están casi estacionarias, mientras que las que están más alejadas de las

paredes se mueven con diferente velocidad.

En este tipo de flujo, las partículas de fluido se mueven en línea recta o ligeramente curva. El flujo laminar ocurre en cualquier porción del sistema de lodo donde el número de Reynolds sea menor de 2000.

Los componentes de viscosidad de un lodo que tenga propiedades de flujo plástico presentan amplio rango de valores; dependiendo del valor de la velocidad de bombeo. Por consiguiente a velocidades de turbulencia (velocidad mayor que la crítica), la viscosidad permanece como el punto principal que concierne a la caída de presión. Sin embargo una vez turbulento, la densidad del lodo se torna en el punto más importante.

VISCOSIDAD.

Viscosidad es la resistencia de un fluido al movimiento. La palabra "Viscosidad" representa las propiedades del flujo, pero la sola palabra puede describir las características como: espeso, delgado, fluido, pastoso, aceitoso, cremoso, etc. Tampoco es razonable esperar un instrumento tan simple que proporcione un número de características para un fluido el cual permita predecir con seguridad su comportamiento bajo condiciones muy diferentes que aquellas suministradas por el instrumento.

La ciencia que trata el flujo de fluidos es la Reología y de acuerdo con esta ciencia los fluidos resisten al flujo principalmente por:

1. Fricción por resbalamiento entre las capas moleculares del fluido.
2. Fuerzas que se forman en la estructura del fluido, que tratan de formar estructuras semirígidas, que se quiebran temporalmente durante la agitación inducida por el flujo actual.

VISCOSIMETROS.

Cuando se mide la viscosidad de fluidos tixotrópicos, todos los tipos de instrumentos indican un número de valores, los cuales representan a dos fuerzas (fricción por deslizamiento y formación de la estructura) que actúan simultáneamente y cuyo valor es determinado por separado, cuantificando de esta manera la intervención que tendrán en el trabajo por desarrollar.

De acuerdo con su diseño, los viscosímetros varían en la sensibilidad relativa, de una u otra de las fuerzas, por lo tanto aquellos viscosímetros que hayan sido diseñados para conocer los valores de velocidad de corte, son capaces de evaluar apropiadamente la naturaleza de los fluidos de perforación.

Los viscosímetros se construyen en varios diseños, pero se clasifican de acuerdo con las diferencias básicas en el movimiento relativo del fluido y la superficie confinada del fluido bajo prueba.

Por consiguiente, se tienen diferentes tipos de viscosímetros:

- 1.) Diseñados para fluidos que fluyen entre las paredes estacionarias confinadas. Esta clase son los de orifi-

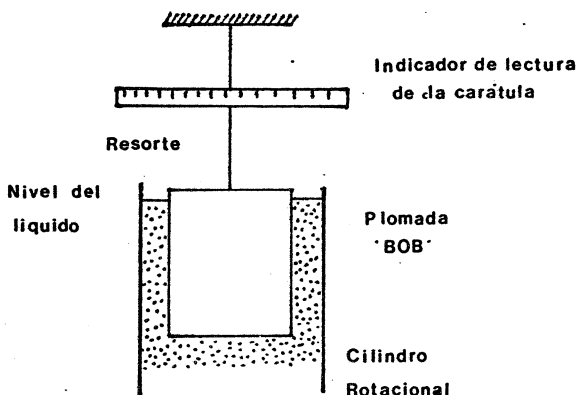
cio de embudo y los viscosímetros capilares.

Instrumentos conocidos de este grupo son: Saybolt, - -
Übbelohde, Engler, Norcross.

- 2.) Donde el fluido se localiza entre superficies diseñadas con separación específica y con movimiento relativo entre una y otra. De este tipo hay tres diseños básicos.
- a- De caída, como son el Hoespler, el Falling Ball, el Gardner Bubble.
 - b- Rotatorios; como el Stormer, el Fann, el Brookfield, el Fisher.
 - c- Vibratorios; como el Vibrating Reed, el Ultrasonic.

La introducción del viscosímetro Fann como un instrumento confiable, ha tenido muy buena aceptación, pues proporciona datos exactos de viscosidad y otras propiedades de los lodos. Además de guías para el control de los lodos y los valores determinados en él se usan directamente en los cálculos hidráulicos, a continuación se desarrolla el principio básico de trabajo del viscosímetro Fann.

(De Rogers 4ª Edición pag 190).



La figura anterior muestra un esquema del viscosímetro rotacional con sus elementos esenciales.

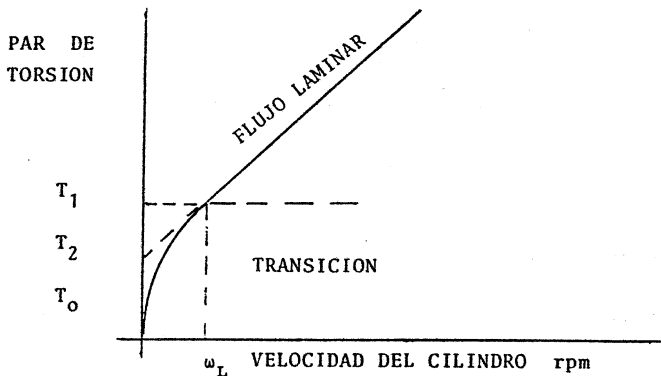
El cilindro gira concéntricamente al rededor de la plomada ("BOB") la cual está suspendida de un resorte. El espacio anular entre la plomada y el cilindro es de 1 mm.

La carátula y el indicador determinan el valor del ángulo resultante de la deformación del resorte, al haberse creado una reacción de la plomada, por el movimiento rotacional del cilindro.

Esta deformación en el resorte, se crea por un esfuerzo cortante en la superficie de la plomada, mayor que la resistencia al corte

de la estructura plástica del líquido que se encuentra en el espacio anular

A continuación se presenta un análisis de estos esfuerzos a partir de la curva de consistencia de un fluido plástico de Bingham donde se tiene un flujo laminar en el espacio anular a partir de ω_L rpm.



En el punto donde τ_o es el par de torsión del punto cedente, R_b es el radio de la plomada y h su altura, el esfuerzo cortante es:

$$\tau_o = \frac{\tau_o}{2 \pi R_b^2 h} - \left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} \right) \text{ - - - - - (1)}$$

El flujo laminar se inicia sobre la superficie de la plomada (BOB) y progresa en forma continua hasta que este flujo es total en el espacio anular.

En el punto donde T^1 , es el par de torsión crítico, R_c es el radio interior del cilindro, se tiene el siguiente esfuerzo cortante

$$\tau_o = \frac{T}{2 R_c^2 h} \text{ - - - - - (2) con una rotación continua a una velocidad constante el par de torsión se incrementa, hasta un valor de equilibrio, el cual será función de las características reológicas de el fluido.}$$

La relación entre el par de torsión y la velocidad de rotación del cilindro es lineal siempre que el fluido en el espacio anular esté en flujo laminar.

Reiner y Rialin, en su teoría del flujo plástico de los viscosímetros rotacionales, deducen la siguiente ecuación:

$$\bar{\omega} = \frac{T}{4 \pi h \mu p} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) - \frac{\tau_o}{\mu p} \ln \frac{R_c}{R_b} \text{ - - - (3)}$$

donde $\bar{\omega}$ es la velocidad angular en radianes/seg. y T es el par -

de torsión correspondiente.

El punto cedente, τ_0 se define por la intercepción T_2 , que es el tramo, lineal extrapolado de la curva en el eje de los pares de torsión. El valor de T_0 se obtiene cuando $\bar{\omega} = 0$

$$\frac{T_2}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) = \tau_0 \quad \text{In } \frac{R_c}{R_b} \quad \text{--- (4)}$$

La pendiente de la línea, arriba de la velocidad angular crítica, ω_L , es la viscosidad plástica μ_p .

El valor del par de torsión del resorte puede obtenerse de la deflexión o giro de la carátula y de su constante de construcción C. la cual es proporcionada por el fabricante.

$$T = C \theta \quad \text{--- (5)}$$

donde T es el par de torsión en dinas - cm. y θ la deflexión en grados ($^\circ$). Sustituyendo (5) en (3)

$$\bar{\omega} = \frac{C \theta}{4\pi h \mu_p} \left(\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right) \quad \text{--- (6)}$$

Todos los viscosímetros se basan en el diseñado por Savins y Roper (API Drill. Prod. Prac. 1954 pgs 722) y que a partir de los datos de lecturas a 300 y 600 rpm, permiten evaluar, la viscosidad plástica y el punto cedente.

La ecuación (3) se simplifica de la siguiente manera:

$$\mu_p = \frac{A\theta - B\tau_0}{\omega} \quad \text{--- (7)}$$

donde A y B son constantes que incluyen: las dimensiones del instrumento, la constante del resorte y los factores de conversión, ω es la velocidad de rotación del cilindro expresada en rpm; luego entonces:

$$\mu_p = VP = A \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{\omega_1 - \omega_2} \right) \quad \text{--- (8)}$$

donde θ_1 y θ_2 son lecturas obtenidas de la carátula a $\bar{\omega}_1$ y $\bar{\omega}_2$ rpm.; VP es el término convencional de campo para la viscosidad plástica.

$$\tau = Y_p = \frac{A}{B} \left(\theta - \left(\frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_2} \right) (\theta_1 - \theta_2) \right) \quad \text{--- (9)}$$

Y_p = Término convencional de campo para el punto cedente de tal manera que los valores de A, B, $\bar{\omega}_1$ y $\bar{\omega}_2$ se determinan:

$$A = B = \bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_2$$

$$\bar{\omega}_1 = 2\bar{\omega}_2$$

bajo estas condiciones.

$$\frac{A}{\omega_1 - \omega_2} = 1, \quad \frac{A}{B} = 1, \quad \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega_2} = 2$$

Las ecuaciones (8) y (9) se simplifican.

$$VP = \theta_1 - \theta_2$$

$$Yp = \theta_2 - VP$$

para satisfacer estas condiciones se requiere que $\omega_1 = 600$ rpm, $\omega_2 = 300$ rpm. y la constante del resorte 387 dinas-cm/grado y como ya se mencionó el espacio anular sea de 1 mm. con estas condiciones se establece que las unidades para la viscosidad plástica son centipoises y para el punto cedente lb/100 pies²

La viscosidad aparente se calculará a partir de las siguientes -- constantes calculadas por Savins - Roper.

$$1^\circ \text{ (giro de la carátula) } = 1.067 \text{ lb/100 pies}^2 \\ = 5.11 \text{ dinas / cm}^2, \text{ esfuerzo cortante}$$

1 rpm = 1.703 seg⁻¹, velocidad de corte.

$$\mu_e = Va = \text{viscosidad aparente} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{5.11}{1.703} \text{ poise/grado/rpm.} \\ = 300 \text{ centipoise/grado/rpm.}$$

$$\mu_e = \frac{300 \times \theta}{\omega}$$

donde θ es la lectura de la carátula a ω rpm; si $\omega = 600$ rpm. que es la práctica común de determinar la viscosidad aparente, y que está dada por la siguiente ecuación.

$$Va = \frac{300 \times \theta \times 600}{600} = \frac{\theta \times 600}{2}$$

θ 300 y θ 600 son las lecturas observadas en la carátula a 300 y 600 rpm.

PROPIEDADES DEL FLUJO

La viscosidad aparente es una función de la viscosidad plástica y el punto de cedencia; donde la viscosidad plástica es aquella parte de la resistencia del flujo en un lodo la cual representa fricción mecánica entre los sólidos en el lodo, entre los sólidos y el líquido que los rodea y las fuerzas de corte entre el mismo líquido.

La viscosidad plástica se mide en centipoises. El punto de cedencia equilibra la viscosidad y se describe como la parte de la resistencia del flujo en un fluido de perforación causada por fuerzas entre las partículas en suspensión.

El punto de cedencia es medido en lb/100 pies². El punto de cedencia es un resultado del grado en el cual el tratamiento químico satisface la atracción entre las partículas. La viscosidad plástica en el lodo puede cambiar si el número y naturaleza de los sólidos cambia.

El agua por lo tanto, puede causar que la viscosidad plástica dis-

minuya debido a la reducci3n del contenido de s3lidos. El punto de cedencia se reducir3 efectivamente por tratamiento qu3mico, - si el sistema no ha sido tratado en exceso, y por consiguiente - es insensible.

Cualquier reducci3n en la viscosidad pl3stica y o en el valor del punto de cedencia resultar3 en menor resistencia al flujo. Un valor alto del punto de cedencia del lodo puede elevar la velocidad cr3tica de ese lodo haciendo m3s dif3cil lograr un flujo laminar. La mayor3a de los lodos est3n bajo flujo turbulento en el equipo superficial, en la tuber3a de perforaci3n, a trav3s de los lastrabarrenas; mientras que el flujo es generalmente laminar en el espacio anular. El flujo turbulento es ideal para remover los cortes en la barrena y el laminar es apropiado en el espacio anular.

Es imposible asignar un valor definido para el punto de cedencia y la viscosidad pl3stica para un lodo en particular; esto se debe dejar al criterio del ingeniero que trabaja en el pozo. Hay sin embargo una correlaci3n definida entre los valores de las propiedades sensibles del flujo y las apropiadas pr3cticas hidr3ulicas. El ingeniero debe hacer el esfuerzo de hacerlos compatibles.

DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION

La p3rdida de circulaci3n del lodo, puede remediarse reduciendo la presi3n de bombeo mientras se circula en la zona de p3rdida de circulaci3n. Esta reducci3n de la presi3n de bombeo produce una baja contrapresi3n en la formaci3n d3bil. La presi3n hidrost3tica actual m3s la ca3da de presi3n total en el espacio anular es la presi3n total de circulaci3n en el fondo del agujero. La densidad del lodo mientras est3 circulando, se le llama "Densidad equivalente de circulaci3n". La Densidad equivalente de circulaci3n puede obtenerse a partir de la siguiente ecuaci3n (se deber3 de utilizar el factor adecuado para la compatibilidad de unidades).

$$\text{Densidad equivalente de circulacion.} = \frac{\text{Presi3n total de circulaci3n en el fondo.}}{\text{Profundidad del pozo.}}$$

VELOCIDAD DE RESBALAMIENTO.

La velocidad de resbalamiento de los cortes o derrumbes en un fluido de perforaci3n es la diferencia de velocidad entre la velocidad del lodo en el espacio anular y la velocidad con que se elevan los cortes. Cualquier estudio de hidr3ulica o hidr3ulica en la barrena y un programa de lodos, debe incluir el problema para remover los cortes de el agujero.

Con el uso m3s frecuente de las barrenas con toberas se hace m3s 3nfasis en el estudio de la velocidad a trav3s de la barrena -- menos lo que concierne a la velocidad en el espacio anular. A menudo por proporcionar suficiente velocidad en las toberas, se desatiende la velocidad anular a tal grado de tener problemas en el agujero. Cuando esto sucede, la viscosidad generalmente aumenta, lo cual hace que la bomba opere a su m3xima capacidad y por lo tanto baja su velocidad (epm), para resistir el aumento -

de caída de presión debida al incremento de la viscosidad.

Si la capacidad de la bomba es suficiente para dar la velocidad adecuada en las toberas y en el espacio anular, la operación es correcta, si no, probablemente lo más prudente será usar mayor diámetro de las toberas, con lo que se tendrá ganancia en el --gasto para remover mejor los recortes.

Recientes pruebas de laboratorio indican que el valor de cedencia de el lodo es la propiedad más importante del fluido en la determinación del efecto en la velocidad de resbalamiento de los cortes. La máxima velocidad de resbalamiento en los cortes de tamaño normal ha sido encontrada del orden de 100 a 110 pies min. para lodos de bajo valor de cedencia. Una reducción de la velocidad de resbalamiento, a casi cero, se ha encontrado en lodos con alto valor de cedencia.

Sin embargo cuando el valor del punto de cedencia se aumenta arriba de 10 lb/100 pies² la velocidad de resbalamiento decrece rápidamente. Estas determinaciones indican que un pequeño beneficio en la capacidad de acarreo se puede esperar por el aumento del punto de cedencia a un valor poco menor que 20 lb/100 --pies². Si bajos valores de cedencia no mantienen el agujero limpio, y no es posible aumentar la velocidad anular, entonces el punto de cedencia probablemente se pueda aumentar a algo más de 20 lbs/100 pies².

La viscosidad aparente y la viscosidad plástica no tienen efecto considerable en la velocidad de resbalamiento; al aumentar la densidad se reduce la velocidad de resbalamiento en forma efectiva, sin embargo, los requerimientos de densidad son generalmente necesarios por las condiciones de trabajo.

En resumen la velocidad anular debe exceder a la máxima velocidad de resbalamiento para desalojar todos los cortes y derrumbes con el objeto de mantener limpio el agujero.

Si esto es imposible, este defecto se puede compensar aumentando el punto de cedencia y o la viscosidad total.

Resumen de fórmulas para evaluar las caídas de presión en el sistema circulatorio

$$v = \frac{17.15}{d^2} q \quad ; \quad v = \frac{q_g}{2.45d^2}$$

$$V_c = \frac{1.62 \mu + 1.62 \sqrt{\mu^2 + 8.20 \rho d^2 P_c}}{\rho d}$$

d = diámetro interior de la tubería de perforación o de los lastrabarrenas (pg)

Para el espacio anular

d = da-de

da = diámetro del pozo o de la barrena.

d_t = diámetro de la tubería o de los lastrabarrenas.

Si $V > V_c$ el flujo será turbulento
 $V < V_c$ el flujo será laminar
 Caídas de Presión

Flujo Laminar dentro de la tubería Flujo Turbulento

$$P = \frac{6.72 \times 10^{-4} \mu V L}{d^2} + \frac{P_c L}{225 d}$$

$$P = \frac{f L v^2 \rho}{25.6 d}$$

$$Re = \frac{2965 dv \rho}{\mu}$$

$$f = \frac{0.046}{Re} \frac{1}{0.23854}$$

en el espacio anular

$$P = \frac{6.72 \times 10^{-4} \mu V L}{d_a^2 - d_t^2} + \frac{P_c L}{225 (d_a - d_t)}$$

$$P = \frac{f l v^2 \rho}{25.6 (d_a - d_t)}$$

para f y Re se utilizan las fórmulas anteriores tomando en cuenta la diferencia de diámetros.

Caída de presión a través de la barrena (toberas).

$$P_b = \frac{q_g^2 \rho}{10858 A^2}$$

también se emplea la siguiente fórmula:

$$P_b = \frac{\rho V_t^2}{1120}$$

$$V_t = \frac{13.44}{A} q \quad ; \quad V_t = \frac{0.32}{A} q_g$$

Potencia hidráulica en la barrena

$$HHP = 0.0245 \times P_t \times q$$

Nomenclatura

- v = velocidad anular, (pies/seg)
- q = gasto, (bl/min) q_g = gasto (gal/min)
- v_c = velocidad crítica, (pies/seg)
- P = densidad del fluido de perforación, (lb/gal)
- μ = viscosidad plástica, (centipoises)
- P_c = punto cedente, lb/100 pies² (Y_p)
- L = Longitud de la tubería o lastrabarrenas (pies)
- f = factor de fricción de fanning (adimensional)

600 r.p.m.

VISCOSIDAD PLASTICA.- Se expresa en centipoises, representa la parte de la resistencia del flujo que contribuye a la fricción mecánica. (1) entre sólidos (2) entre sólidos y líquidos (3) impartida por el líquido mismo, y es la diferencia de la lectura a 600 rpm menos la lectura de 300 rpm.

PUNTO DE CEDENCIA.- Expresado en lb/100 pies² es aquella parte de la resistencia del flujo en un lodo de perforación causada por fuerzas atractivas existentes entre las partículas contenidas en suspensión y representan la fuerza necesaria para iniciar el movimiento, su valor representa la diferencia de la lectura de 300 rpm y el valor de la viscosidad plástica.

VELOCIDAD ANULAR DEL LODO.- Promedio de velocidad con que sube el lodo entre la tubería de perforación y las paredes del agujero, basada en el área anular y el gasto que se bombea.

VELOCIDAD CRITICA.- Es el punto en el cual un fluido llega a ser turbulento. Se asigna un número Reynolds $Re=2000$ al estado del flujo turbulento en este punto.

NUMERO REYNOLDS.- Un número derivado del cálculo, en el cual una combinación de factores asociados que se reflejan en la teoría del movimiento de fluidos. Este número sin dimensiones, sirve como indicador del estado del flujo ya sea laminar o turbulento.

FLUJO LAMINAR.- Este es un tipo de flujo lineal. El flujo parece fluir en capas.

FLUJO TURBULENTO.- Un flujo que a alta velocidad se mueve formando remolinos.

CAIDA DE PRESION.- Es una resistencia a fluir causada por fricción. Una pérdida de presión debida a la fricción del fluido al fluir.

CABALLOS DE POTENCIA.- (in-put). La potencia total proporcionada por motores o máquinas a las bombas.

POTENCIA HIDRAULICA.- (out-put) La potencia total proporcionada por las bombas.

DENSIDAD.- Masa por unidad de volumen para los propósitos del lodo se expresa en lb/gal, gr/cm^3 .

BIBLIOGRAFIA

Applied Mud Technology.
IMCO SERVICES 6a. edición 1978

The Rheology of oilwell drilling fluids
API BUL 13 D 1a. edición noviembre de 1979.

Drilling Practices Manual 1974
Preston L. Moore.

Composition and properties of
oil well drilling Fluids. 4a. edición 1980
Walter F. Rogers.

DISEÑO DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Desde el inicio de la perforación de un pozo es indispensable contener las paredes del mismo. Esto se logra con la columna del lodo. Conforme se avanza en profundidad y a intervalos de terminados, la contención se efectúa por medios tubulares nominados tuberías de revestimiento. Para lograr este efecto es necesario que intervenga otro material que es el cemento.

El conjunto tuberías de revestimiento y cemento ademan el pozo, realizando las siguientes funciones:

- 1.- Evita los derrumbes de las paredes del pozo.
- 2.- Previene la contaminación de los acuíferos dulces de la intrusión de fluidos del pozo.
- 3.- Impide la contaminación proveniente de zonas problema -- (ácido sulfhídrico, formaciones salinas, etc).
- 4.- Confina la producción del intervalo seleccionado al aislar la zona productora del agua del yacimiento.
- 5.- Suministra un medio para la instalación del equipo de control del pozo.
- 6.- Permite la instalación de equipo para la terminación del pozo o para su producción a través de sistemas artificiales.

Naturalmente que el programa ideal sería el de una tubería de revestimiento desde la superficie hasta la formación productora. Sin embargo, debido a que durante la perforación se penetra una variedad de formaciones y cada una de ellas presenta diferentes problemas se introducen en el pozo, en forma -- concéntrica, varias tuberías de revestimiento, que de acuerdo a sus funciones específicas se denominan como se indica a continuación:

- a).-Tuberías de revestimiento conductoras.- Generalmente esta sarta es de corta longitud. Previene la erosión o lavado del pozo, permite establecer, desde el inicio, el retorno del fluido de perforación; también soporta los cabezales de las subsecuentes tuberías.

Los diámetros de estas tuberías serán de 16 a 30 pg. y de penden del programa y profundidad del pozo.

- b).-Tuberías de revestimiento superficiales.- Después de cementada la tubería conductora y perforado el pozo con el siguiente diámetro de barrena, se instala una tubería de me

nor diámetro que la conductora y a una profundidad que protege al pozo de derrumbes, de formaciones con pérdida de circulación, que a menudo se encuentran cerca de la superficie y de acufferos dulces someros.

- c).-Tuberías de revestimiento adicionales.- Dependiendo de la profundidad del pozo o de los problemas que durante la perforación se encuentren, tales como zonas de presiones anormales o de pérdida de circulación, será necesario colocar una o más sargas de tuberías de revestimiento, que aislarán la zona problema. A estas tuberías se les conoce con el nombre de tuberías de revestimiento intermedias.
- d).-Tubería de revestimiento de explotación. Esta tubería es la última en instalarse en el pozo y llega hasta la zona productora. Sirve para aislar los hidrocarburos de fluidos indeseables, tales como agua o gas de formaciones anteriores, además será la protectora de la tubería de producción.
- e).-Tuberías de revestimiento cortas (Liners).- Estas tuberías constituyen una instalación especial que evita utilizar una sarga de la superficie al fondo del pozo. La longitud de esta tubería permite cubrir el agujero descubierto, quedando además una parte traslapada dentro de la última tubería, de aproximadamente 50-150m.

Diseño de tuberías de revestimiento.- Para obtener un programa óptimo de la tubería de revestimiento se deberán conocer la profundidad del pozo y la densidad del lodo respectiva para esa profundidad. También es importante conocer las propiedades físicas de las tuberías y el tipo de conexiones incluyendo en ellas la resistencia a la presión interior, a la presión exterior (colapso o aplastamiento), a la deformación por efecto de peso (tensión).

El Instituto Americano del Petróleo (API) establece normas para la fabricación de productos que se emplean en la industria del petróleo. Las especificaciones que rigen a los productos tubulares son las 5A, 5AC y 5AX, que establecen el peso/unidad de longitud (lb/pie o Kg/m), el rango de la tubería (R1, R2 ó R3), el diámetro exterior, el espesor del tubo, el diámetro de trabajo (drift), el grado de acero, -- los métodos de fabricación y el tipo de conexión del tubo.

Hay tres rangos de longitud para las tuberías:

- rango uno (R1) de 4.88 m - 7.62 m.
- rango dos (R2) de 7.63 m - 10.36 m.
- rango tres(R3) de 10.37 m en adelante.

Los grados de acero son identificados por letra y números, que determinan la calidad del acero. Los números señalan el mínimo esfuerzo a la deformación Y_p , en otras palabras es el esfuerzo que soporta con una elongación menor del 0.5% y la letra indica la calidad y determina el máximo esfuerzo. La siguiente tabla indica los grados de tubería empleados en la industria:

Grados API	Mínimo esfuerzo (lb/pg ²)	Máximo esfuerzo (lb/pg ²)
H-40	40000	80000
J-55	55000	80000
K-55	55000	80000
C-75	75000	90000
L-80	80000	95000
N-80	80000	110000
C-95	95000	110000
P-110	110000	140000
V-150	150000	-----

las tuberías para quedar dentro de especificaciones se someten a la prueba de presión hidrostática que es la más severa y que se basa en 60% ó 80% del valor del mínimo esfuerzo a la deformación, este rango de porcentaje es aplicado dependiendo del grado y diámetro de la tubería, es decir para aceros H-40, K-55 y J-55, diámetros de 10 3/4" y mayores se empleará el 60% y para los otros grados de acero y diámetros menores el 80%. La fórmula empleada para esta prueba es la siguiente:

$$P_h = (2FS t) / D \text{ ----- (1)}$$

P_h = Presión hidrostática (lb/pg²)
 FS = 0.60 Y_p ó 0.80 Y_p (lb/pg²)
 Y_p = mínimo esfuerzo a la deformación (lb/pg²)
 t = espesor del tubo (pg)
 D = diámetro exterior (pg)

Conexiones.- las tuberías son fabricadas generalmente con roscas en ambos extremos y posteriormente es conectada la junta o cople (figura 1) en uno de ellos, con excepción de la tubería denominada de extremos planos (extreme line) cuyas roscas son maquinadas en el cuerpo del tubo.

Las conexiones son nominadas de ocho hilos rosca redonda con cople corto o cople largo (8 h.r.r. c.c. ó 8 h.r.r.c.L). de acuerdo con la longitud de la rosca de la tubería de revestimiento a usar, en la especificación 5-A API se encuentran las dimensiones de las roscas y coples.

La carga axial que puede soportar una junta cople se denomina como resistencia a la tensión. El boletín 5C3-API en la sección 20.4 da las ecuaciones para calcular la resistencia al desprendimiento para roscas de tipo: redondo, "buttress" y extremos planos o lisos.

Generalmente la tubería de revestimiento representa uno de los puntos de mayor costo en el trabajo de perforación de un pozo, por lo que la columna ideal sería aquella cuyo peso -- fuese el más ligero y del menor grado de acero posible, pero que permitiese no fallar, ante los esfuerzos y condiciones ambientales a los que fuese expuesta.

Es por eso que el diseño se efectua para que dichas columnas soporten fuerzas para evitar:

- La ruptura debida a una presión interna.
- El colapso o aplastamiento ocasionado por:
- El exceso de una presión externa
- El desprendimiento o fallas ocasionadas por esfuerzos axiales debido al peso propio de la columna.

FACTOR DE DISEÑO

Debido a que el material de que es construida la T.R. tiene propiedades físicas que son determinadas estadísticamente y que las propiedades de una longitud individual de T.R. pueden desviarse considerablemente del promedio estadístico, se ha introducido el concepto de factor de seguridad que es la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo de trabajo. La selección del factor de diseño en cualquier problema de ingeniería esta gobernado por cuatro consideraciones básicas:

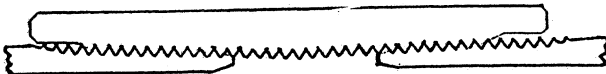
- 1.- La realidad del grado de resistencia utilizado en diseño.
- 2.- El grado de similitud entre las condiciones de servicio y las condiciones de prueba.
- 3.- La realidad del dato de la carga utilizada en el diseño
- 4.- La consecuencia de la falla (posibilidades de peligro personal e incremento de los costos).

En el caso de diseño de las T.Rs. se utilizan las condiciones más drásticas posibles: En colapso, se supone que la presión interior es cero; en presión interna, se desprecia la flotación lo cual resulta en una carga axial aproximadamente 12% mayor que la real. La pérdida económica en cualquiera de los casos es considerable.

Los factores de seguridad a utilizar como norma en el diseño de las columnas de tuberías de revestimiento se tabulan a continuación:

TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

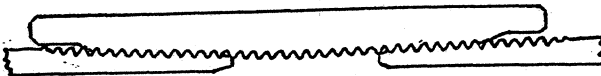
TIPO DE TRABAJO	SUPERFICIAL	INTERMEDIA	EXPLOT.	CORTA
COLAPSO	NO	CON DIFERENCIA DE DENSIDAD ENTRE LODO Y AGUA POR EL FACTOR 1.125 = 1.0	SI	NO
TENSION	SI FACTOR DE SEG = 1.8	SI FACTOR DE SEG. = 1.8 POZOS DIRECCIONALES 2.0	SI EN LA T.R. CORRI DA, NO EN T.R. CORTA FACTOR DE SEG. 1.8 POZOS DIRECCIONALES 2.0	NO
PRESION INTERNA	NO	SI FACTOR DE SEGURIDAD 1.25 DE LA PRESION DE FRACTURAMIENTO	SI FACTOR DE SEGURIDAD 1.25 DE PRESION DE FRACTURAMIENTO	NO
DESGASTE INTERNO	NO	SI EN CASOS ESPECIALES. CONSIDERAR UN 20% ADICIONAL AL DI SEÑO (ESPESOR O GRADO T.R.)	SI EN CASOS ESPECIALES. CONSIDERAR UN 20% ADICIONAL AL DI SEÑO (ESPESOR O GRADO T.R.)	SI POR VIAJES T. PERF.
FATIGA POR FLEXION O COLUMNA	SI, POR CONTINUAR PERFORANDO	SI, (POR CONTINUAR PERFORANDO)	SI, (SI CONTINUA PERFORANDO).	NO
CORROSION	RARA VEZ	RARA VEZ		
DISPAROS	NO	NO	SI SI	SI OCASIONALMENTE.
EROSION	NO	NO	NO	SI



Apriete de la junta (cople)
con llaves de fuerza

Apriete manual

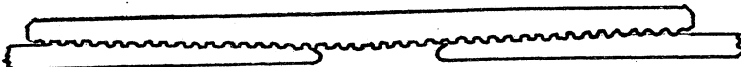
COPLE CORTO ROSCA REDONDA 8 HILOS POR PULGADA



Apriete de la junta (cople)
con llaves de fuerza

Apriete manual

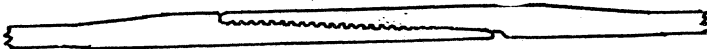
COPLE LARGO ROSCA REDONDA 8 HILOS POR PULGADA



Apriete de la junta (cople)
con llaves de fuerza

Apriete manual

ROSCA "BUTTRESS"



Apriete de la junta con llaves de fuerza.

ROSCA DE EXTREMOS PLANOS (EXTREME LINE)

APIETES BASICOS (API) PARA DIFERENTES TIPOS DE ROSCAS
CON LLAVES DE FUERZA Y MANUALMENTE.

Presión interna.-

El API establece que la presión interna que resiste una --- T.R. (internal yield pressure) estará en función de el diámetro exterior el mínimo espesor de pared, y el mínimo esfuerzo a la deformación del tubo. La siguiente fórmula establece que el valor de la presión interna será:

$$P = \frac{1.75(Y_p)(t)}{D} \text{ ----- (2)}$$

P = mínima presión interna requerida para causar una deformación permanente (lb/pg²)

La presión necesaria para reventar una junta o cople de un tubo tendrá que ser superior a la calculada por la fórmula anterior.

Al diseñar una tubería que por presión interna, se deberá de considerar un factor de seguridad (DFi) que varía entre 1.0 - 1.75. Este factor afectará al valor calculado de la presión en la superficie, la máxima presión en la superficie se obtiene cuando la tubería se llena con gas de la formación. Una ecuación empírica aplicable para determinar esta presión, es:

$$P_s = P_B \pm e^{(34 \times 10^{-6} GL)} \text{ ----- (3)}$$

P_S = presión en la superficie (lb/pg²)

P_B = presión de fondo (lb/pg²) cuando se desconoce la presión de fondo es válido el emplear la presión ejercida por la columna del lodo.

e = logaritmo base natural = 2.7182818

G = densidad relativa del gas, normalmente se usa la del metano (CH₄) = 0.545

L = profundidad del pozo (pies)

de lo anterior se deduce que P_S < P y el valor de P_S será el utilizado para el cálculo de diseño por presión interior.

Presión de colapso o aplastamiento.

La resistencia al colapso de una tubería es función del diámetro exterior el espesor de pared y el grado de acero.

La resistencia al colapso se ha investigado, tanto teórica como experimental. El API emplea cuatro formulas para determinar la presión de colapso, basadas en diferentes tipos de

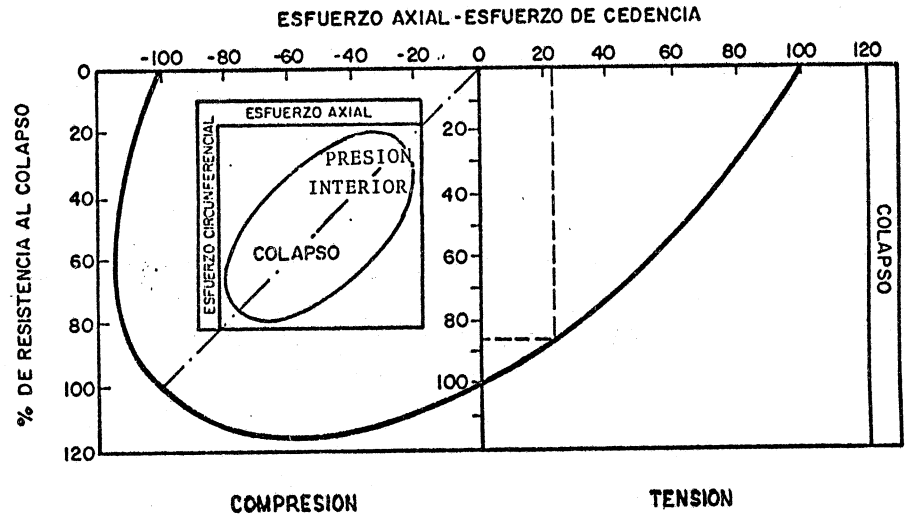


FIGURA 2

fallas: elástica, transición, plástica y de deformación o --
cedencia.

El uso específico de las fórmulas esta gobernado por la rela-
ción del diámetro exterior (D), el espesor de pared (t) y de
las características del material (Yp).

Cabe aclarar que las fórmulas para el tipo de falla elástica
y de deformación o cedencia son del tipo teórico, mientras -
que las fórmulas para el tipo de falla plástica o de transi-
ción se determinaron de datos experimentales.

Otro factor importante que hay que considerar y que es deter-
minante en el diseño, es la fuerza axial a que esta sujeta -
una tubería. Este fenómeno esta determinado por la ecuación
de la elipse de esfuerzos biaxiales, que determina una reduc-
ción sobre la presión de colapso debida al peso de la tube-
ría (carga o fuerza axial).

La ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales es la siguien-
te:

$$X^2 + XY + Y^2 = 1$$

donde

$$X = \frac{T}{Y_p A_s} \quad \text{Adimensional} \text{----- (5)}$$

$$Y = \sqrt{1 - 0.75 X^2} - 0.5X \quad \text{(adimensional) ----- (6)}$$

T = Tensión o peso de la tubería en la sección --
considerada (lb).

As = área de la sección transversal del tubo en la
sección considerada (pg²)

Para corregir la presión de colapso por efecto de la carga --
axial:

$$P_{ca} = y P_{co} \text{ ----- (7)}$$

Pca = mínima presión de colapso bajo efecto de tensión (lb/
pg²).

Pco = mínima presión de colapso sin efecto de tensión (lb/
pg²).

El diseño de una columna de tubería de revestimiento por pre-
sión de colapso se afecta por un factor de seguridad al co-
lapso (DF_C) que varía de 1.0 - 1.5, llegándose a utilizar pa-
ra zonas con presiones anormalmente altas, o formaciones de-
leznales valores mayores.

Para considerar la presión de colapso, es práctica común pre-
sumir que la presión que actúa por fuera de la tubería es 1ā

resultante de la presión ejercida por la columna de lodo. De esta manera el valor mayor de presión se encontrará en el fondo del pozo y el menor valor en la superficie.

El procedimiento matemático se expresa:

$$P_C = (0.052 W L) DF_C \text{ ----- (8)}$$

P_C = presión de colapso (lb/pg²)

W = densidad del lodo (lb/gal)

L = profundidad del pozo (o también una sección considerada) (pies)

0.052 lb/pg²/pie = gradiente de presión para un fluido cuya densidad es igual a 1 lb/gal.

A medida que la profundidad disminuye la presión ejercida por la columna de lodo también disminuye. Por lo tanto una columna de tubería combinada, en pesos y grados, es a menudo empleada, siempre que satisfaga los requerimientos de los factores de diseño, con el menor costo de inversión; de ahí que, $P_C < P_{co}$ cuando este efecto es considerado, la determinación de las profundidades a que deberán de ser introducidas las diferentes tuberías a usarse, involucra un cálculo de ensaye y error o bien por solución gráfica.

Tensión.

La resistencia a la tensión de una tubería es función del área de la sección transversal y de la mínima resistencia a la deformación que depende del grado del acero; resultado de esto es que el cuerpo del tubo es de mucho mayor resistencia que el cople o unión, esta consideración en el diseño depende en gran parte de la resistencia de la unión, igual que en las dos consideraciones anteriores, en esta tercera se involucra el factor de seguridad a la tensión (DF_t) y que es la relación de la resistencia de la junta o unión propuesta a la carga axial pero de la columna de tubería, matemáticamente se expresa:

$$DF_t = \frac{JT \text{ (resistencia a la tensión de la junta)}}{T \text{ (tensión o peso de la columna de tubería)}} \text{ ----- (9)}$$

Los factores de diseño a la tensión varían para el cuerpo del tubo de 1.6 - 1.8 y para la junta o unión de 1.8 a 2.0.

Para efectos de comprensión de lo anterior se emplea el siguiente ejemplo:

Diseñar por el método de ensaye y error, aplicando la ecuación de la elipse de esfuerzos biaxiales, la siguiente tubería de explotación de 7 pg. de diámetro exterior que deberá de introducirse en un pozo a 14760 pies (4500m) con un fondo de 12.5 lb/gal (1.5 gr/cm³), se usarán los siguientes factores de diseño

$$DF_i = 1.1 ; DF_c = 1.125; DF_t = 2.0 \text{ (junta).}$$

Solución:

Se determina la presión en el fondo del pozo.

$$P_B = 0.052 WL \\ = 0.052 \times 12.5 \times 14760 = 9594 \text{ lb/pg}^2$$

Se calcula, con la ecuación 3, la presión que tendría el pozo en la superficie si estuviese lleno de metano. (G=0.545).

$$P_S = P_B + e^{34 \times 10^{-6}} GL \\ P_S = 9594 + e^{34 \times 10^{-6}} \times 0.545 \times 14760 = 7298 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_I = DF_i \times P_S = 1.1 \times 7298.3 = 8028 \text{ lb/pg}^2$$

La T.R. deberá resistir la siguiente presión al colapso:

$$P_C = P_B \times DF_c \\ = 9594 \times 1.125 = 10793 \text{ lb/pg}^2$$

Se presenta a continuación algunos grados y pesos de T.R. de 7" que satisfacen los valores expuestos.

(TABLA ANEXA)

La T.R. de grado C-95 de 35 lb/pie tiene una resistencia a la presión interior de 11830, 10970 y 10050 lb/pg² para el tipo de junta de extremos planos, rosca redonda cople largo y rosca buttress, respectivamente. Su resistencia al colapso es de 11640 lb/pg² para todos los tipos de juntas. Su costo aproximado es de 192 \$ /pie

La T.R. de grado N-80 de 38 lb/pie tiene una resistencia a la presión interior de 10800, 9240 y 8460 lb/pg² para el tipo de junta de extremos planos, rosca redonda cople largo y rosca buttress respectivamente y resistencia al colapso de 11390 lb/pg² para todos los tipos de juntas, con un costo aproximado de 183 \$ /pie

Ambas tuberías satisfacen los valores requeridos y se selecciona la N-80, por su menor costo.

A continuación se calcula la altura o punto de enlace de la siguiente columna de tubería que estará limitada por su resistencia a la presión interior y por el valor menor de la presión de colapso que actúe en dicho punto de enlace - y que bien puede ser una tubería de grado inmediato inferior.

La T.R. grado C-75 de 32 lb/pie tiene una resistencia a la presión interior de 8490 lb/pg² para juntas de extremos -- planos y rosca redonda cople largo y de 7930 lb/pg² para rosca buttress. Su resistencia al colapso es de 8230 lb/pg² para todos los tipos de juntas con un costo aproximado de - 158 \$/pie*

Por el método de ensave error se obtiene la profundidad del punto de enlace, considerando para esta longitud^c calculo de la profundidad "L" = "L₁", "L₂", etc.

$$L_1 = \frac{P_{co}}{DF_c(0.052 \times W)}$$

$$= \frac{8230 \text{ lb/pg}^2}{1.125 \times 0.052 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} \times 12.5 \text{ lb/gal}} = 11255 \text{ pies}$$

El siguiente paso consiste en verificar si la tubería (C-75, 32 lb/pie) a esta profundidad (11255 pies) satisface el factor de seguridad por resistencia al colapso, considerado el efecto de carga axial. Para esto se calcula Pca de la siguiente manera:

$$X = \frac{T}{Y P A_s} ; \quad A_s = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)$$

De = diámetro exterior = 7 pg.

Di = diámetro interior = 6.094 pg.

As = 9.31 pg²

El peso de la tubería en la sección considerada es:

$$T = (14760 \text{ pies} - 11255 \text{ pies}) \times 38 \text{ lb/pie} = 133190 \text{ lb}$$

$$X = \frac{133190}{75000 \text{ lb/pg}^2 \times 9.31 \text{ pg}^2} = 0.191$$

aplicando la ecuación (6)

$$Y = 0.891 \text{ y refiriéndola a (7)}$$

$$P_{ca} = 0.891 \times 8230 = 7333 \text{ lb/pg}^2$$

Se determina ahora el factor de diseño al colapso a la profundidad de 11255 pies, para la presión de colapso afectada por la carga axial y la presión ejercida por la columna de lodo a dicha profundidad:

$$DF_C = \frac{P_{ca}}{P_B} = \frac{7333 \text{ lb/pg}^2}{0.052 \times 12.5 \times 11255} = 1.002$$

Para esta profundidad el factor de diseño resultó menor que el propuesto; por lo tanto se continuará hasta satisfacer la igualdad:

$$DF_C \text{ calculado} \geq DF_C \text{ propuesto (1.125).}$$

cálculo de la profundidad "L₂"

$$L_2 = \frac{7333}{0.052 \times 12.5 \times 1.125} = 10028 \text{ pies.}$$

$$x = \frac{179816 \text{ lb}}{75000 \text{ lbs/pg}^2 \times 9.31 \text{ pg}^2} = 0.258$$

$$y = 0.846$$

$$P_{ca} = 0.846 \times 8230 = 6963 \text{ lb/pg}^2$$

$$DF_C = \frac{6963}{0.052 \times 12.5 \times 10028} = 1.068$$

$$1.068 < 1.125$$

cálculo de la profundidad "L₃"

$$L_3 = \frac{6963}{0.052 \times 12.5 \times 1.125} = 9522 \text{ pies}$$

efectuando operaciones en forma similar a las anteriores

$$X = 0.285$$

$$Y = 0.827$$

$$P_{ca} = 0.827 \times 8230 = 6806$$

$$DF_C = \frac{6806}{0.052 \times 12.5 \times 9522} = 1.100 < 1.125$$

cálculo de la profundidad "L₄"

$$L_4 = \frac{6806}{0.052 \times 12.5 \times 1.125} = 9307 \text{ pies}$$

$$X = 0.297 ; y = 0.818$$

$$Pca = 0.818 \times 8230 = 6732$$

$$DF_c = \frac{6732}{0.052 \times 12.5 \times 9307} = 1.113 < 1.125$$

cálculo de L_5

$$L_5 = \frac{6732}{0.052 \times 12.5 \times 1.125} = 9206 \text{ pies}$$

$$X = 0.302 ; Y = 0.814$$

$$Pca = 0.814 \times 8230 = 6699$$

$$DF_c = \frac{6699}{0.052 \times 12.5 \times 9206} = 1.120 < 1.125$$

los siguientes cálculos confirmarán, la profundidad de 9,160 - pies; es la correcta.

La profundidad a la que la tubería de grado C-75 de 32 lb/pie se introducirá será de 9160 pies (2793m). y la longitud de la tubería de grado N-80 de 38 lb/pie será de 5600 pies - - - (1707 m).

Revisión del factor de diseño a la tensión para la rosca propuesta de la tubería grado C-75, que es la que soportará el peso total de toda la columna de tubería.

La resistencia a la tensión de la tubería C-75 de 32 lb/pie. en miles de libras.

CUERPO DEL TUBO	TIPOS DE ROSCAS		
	ROSCA REDONDA COPLE LARGO	ROSCA BUTTRESS	EXTREMOS PLANOS
699	633	799	761

$$DF_t = \frac{\text{resistencia a la tensión de la junta propuesta}}{\text{peso total de la columna de T.R.}}$$

se designa para este ejemplo la rosca buttress

$$DF_t = \frac{799000 \text{ lb}}{(5600 \text{ pies} \times 38 \text{ lb/pie}) + (9160 \text{ pies} \times 32 \text{ lb/pie})} = 1.58$$

Dado que para cualquier otro valor de las cuerdas propuestas el factor de diseño es inferior, se deberá de efectuar la corrección de la longitud de la tubería C-75

$$DF_t = 2 = \frac{799000}{(5600 \times 38) + (L \times 32)}$$

L = 5834 pies, por lo que falta una cantidad de tubería de 3326 pies y de la tabla de resistencia propuesta para el diseño de la columna de tubería de revestimiento de 7 pg se requiere una rosca que satisfaga la tensión, y verifica que los grados C-95 de 38 lb/pie y P-110 de 32 lb/pie tienen resistencias superiores a un millón de libras.

(para 32 lb/pie)

$$DF_t=2= \frac{\text{resistencia a la tensión de la junta propuesta}}{(5600 \times 38) + (5834 \times 32) + (3326 \times 32)}$$

Resistencia a la tensión = 1,011,840 lbs.

(para 38 lb/pie)

$$DF_t=2= \frac{\text{resistencia a la tensión de la junta propuesta}}{(5600 \times 38) + (5834 \times 32) + (3326 \times 38)}$$

Resistencia a la tensión = 1,051,752 lbs

la T.R. grado P-110 de 32 lb/pie con cuerda buttress satisface la demanda en cuanto a tensión y presiones, internas y de colapso.

RESUMEN FINAL DEL DISEÑO

diámetro (pg)	intervalo (pies) (metros)	peso (lb/pie)	grado	tipo de junta	Factor a la tensión DF _t	Factor al colapso DF _c	Factor a la presión interior. DF _i
7	0-3326 0-1014	32	P-110	buttress	2.00	--	1.59
7	3326-9160 1014-2793	32	C-75	buttress	3.75	1.125	1.09
7	9160-14760 2793-4500	38	N-80	r.r.c.l.	- -	1.187	1.74

* Los costos de las tuberías son del 1ero. de enero de 1981

Diseño de una columna de T.R. empleando las gráficas de la casa Youngstown (figura 3).

Para efectuar el diseño se requiere de la siguiente información:

- a).- diámetro exterior de la tubería
- b).- densidad del fluido de control
- c).- profundidad a la que se va introducir
- d).- factores de seguridad para el diseño

Las gráficas constan de dos partes, en el extremo izquierdo (gráfica II) en el eje horizontal se tienen diversos valores de densidad y de profundidades; en el extremo derecho (gráfica I) las curvas de las tuberías con diferentes grados de pesos, en los ejes vertical y horizontal respectivamente se tienen los valores de la presión de colapso y de la tensión.

Procedimiento.

- 1).- Multiplíquese 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 este 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 se proyecta una línea horizontal hasta el margen izquierdo de la gráfica I y se designa como punto "A₁", este punto indica el grado y peso de la primera sección de tubería que se va a introducir al 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 3048m - - (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 "B₁" 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 formado por la intersección de la línea programa con la línea de flotación de la gráfica II.

En este caso la línea programa se obtiene de la siguiente ecuación:

$$L = 3\ 048.78 \left(\frac{W_s}{W_s - W_a} \right)$$

en donde:

L = longitud de la tubería de ademe suspendida en el fluido.

W_s = densidad del acero (7.853 gr/cm³)

W_a = densidad del fluido de control o de perforación (gr/cm³)

5) A partir del punto pivote o punto "B", se trazan 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 requiera diseñar.

6) A partir del punto "A", trácese la primera paralela a la recta que corresponde al peso de 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 DE LA TUBERIA DE ADEME:

Con lo anterior terminamos el diseño gráfico de la tubería, pero se necesita revisar dicho diseño a los diferentes esfuerzos.

- a) Revisión por tensión.- Del punto formado por la intersección de la paralela con la parte superior de la gráfica I se baja una perpendicular hasta la parte inferior de la misma gráfica, en donde están marcados los valores a la tensión. Con esto obtenemos un valor de la tensión para cada sección de tubería del mismo grado, por lo que se hace lo mismo para los diferentes puntos 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 manual de tablas de resistencias, el valor de la presión interna que resiste la sección de tubería que estamos revisando.

Todos los valores obtenidos de la revisión al colapso, 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 diseñadas 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 esto nos indica que el diseño teórico fue correcto para esta sección de tubería.

- c) En caso contrario en que el valor de resistencia teórico 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 mayor 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 de resistencia fue 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.

COMPROBACION GRAFICA DEL DISEÑO DE LA TUBERIA DE ADEME:

- 1) En una hoja de papel milimétrico o cuadrículado, elijan-se las escalas, una vertical para las profundidades y -- dos horizontales, una en la parte superior para la tensión y la otra en la parte inferior para el colapso.
- 2) Una vez seleccionadas las escalas, determine el valor -- del punto que representa la tensión máxima en el eje vertical (profundidad) el cual corresponderá al último tramo de tubería que se ha introducido al pozo, es decir, - la sección de tubería que está a menor profundidad.

En la escala horizontal superior que corresponde a los valores de la tensión, determine el valor del punto que corresponde a la tensión del último tramo de tubería que se introdujo.

- 3) Dicho punto determinado únase con el punto de la profundidad en el que se ha quedado la zapata que lleva la tubería. Esta línea recta representa la variación del esfuerzo a la tensión respecto a la profundidad.
- 4) Ahora en el eje horizontal inferior, que corresponde a los valores del colapso, búsquese el punto que correspon-da al valor máximo al colapso, el cual caerá en el primer tramo de tubería introducido porque como ya lo mencionamos anteriormente el esfuerzo al colapso es máximo en el fondo del pozo.
- 5) Ya determinado este punto de máximo esfuerzo al colapso, se une con el punto que tenga el menor valor al colapso en el eje vertical de profundidades que corresponde al último tramo de tubería introducido.

Esta línea recta nos representa la variación del esfuerzo al colapso respecto a la profundidad.

Como se sabe el esfuerzo a la tensión disminuye a medida que profundizamos por lo que la tensión es máxima en el último tramo de tubería introducido y es mínimo en el fondo del pozo, o sea, en el primer tramo introducido.

Por el contrario el esfuerzo al colapso aumenta a medida que se profundiza por lo que es máximo en el fondo del pozo (en el primer tramo introducido) y es mínimo en el último tramo de tubería.

Una vez que se tienen trazados los tres ejes a escala -- procederemos a efectuar la comprobación gráfica de la siguiente manera:

- a) Revisión a la Tensión.- Del valor indicado por el diseño real, determínese el que corresponde al de la tubería superficial. Bájese una vertical hasta intersectar la proyección horizontal (profundidad) de la tubería que se está revisando.

Posteriormente bájese una segunda vertical hasta intersectar la proyección de la siguiente horizontal, y únase por medio de líneas rectas, como se muestra en la - - fig. No.3

Si estas líneas no intersectan en ninguna parte a la línea que representa a las tensiones, esto nos indica que el diseño es correcto; pero si existiera alguna intersección deberá de cambiarse el tramo de tubería por otro -- que tenga mayor resistencia a este esfuerzo.

- b) Revisión al Colapso.- El procedimiento para revisar por colapso es similar al anterior, la única diferencia que existe es que el eje horizontal de los valores del colapso está en la parte inferior.

Si al trazar estas líneas se intercepta a la línea que - representa al colapso, deberá cambiarse este tramo de tubería por ser incorrecto su diseño y se cambiará por - - otra de mayor resistencia al colapso.

Para que el diseño de la tubería sea correcto, para el - caso del esfuerzo a la tensión, todas las intersecciones deberán quedar abajo de la línea que representa a este - esfuerzo (tensión).

Para el caso del esfuerzo al colapso, todas las intersecciones de las líneas deberán quedar arriba de la línea - que representa al esfuerzo al colapso.

Presentación gráfica de la comprobación

Datos supuestos:

Peso real de la tubería = 600×10^3 Lbs.

GRAFICA EJEMPLO

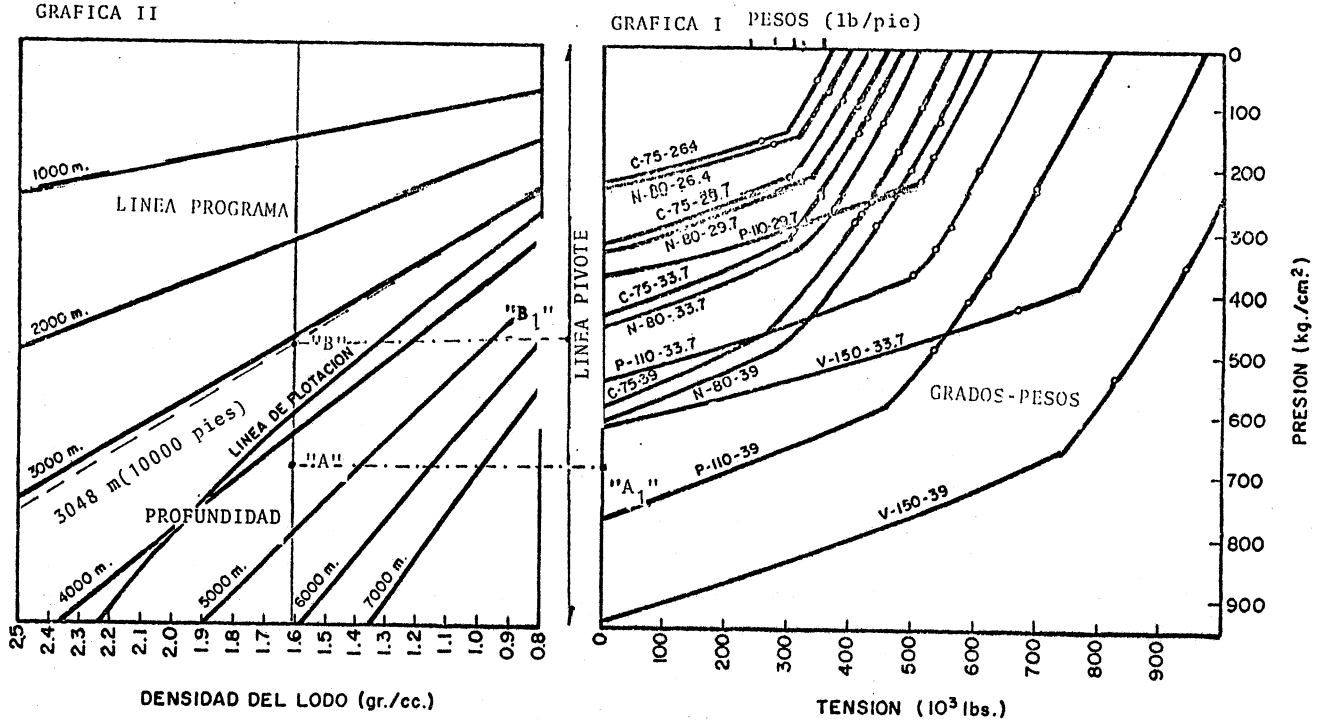


FIGURA 3

Resistencia a la tensión (valor obtenido del manual y --
afectado por el factor de seguridad a la tensión) = - - -
325 x 10³Kg.

Profundidades = las indicadas en la gráfica

Presión hidrostática máxima = 600 kg/cm²

Resistencia al colapso = (valor obtenido del manual y --
afectado por el factor de seguridad al colapso = 650 Kgs/
cm².

Profundidades = las indicadas en la gráfica.

_____ Tensión

- - - - - Colapso

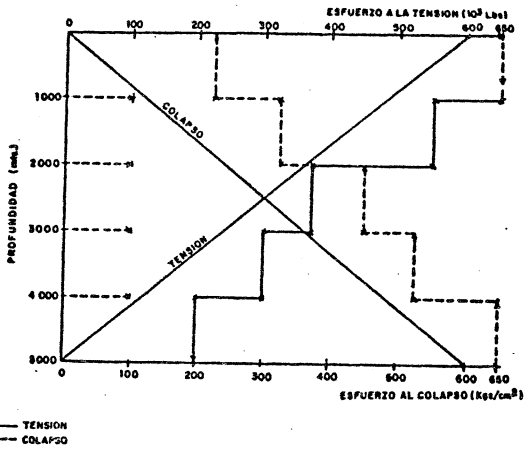
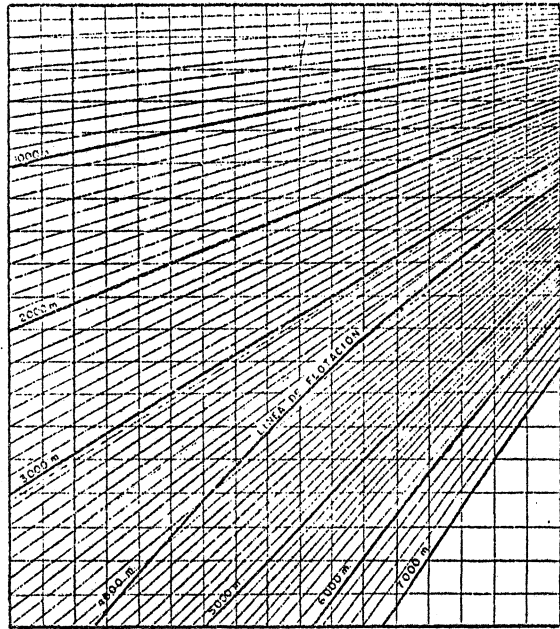
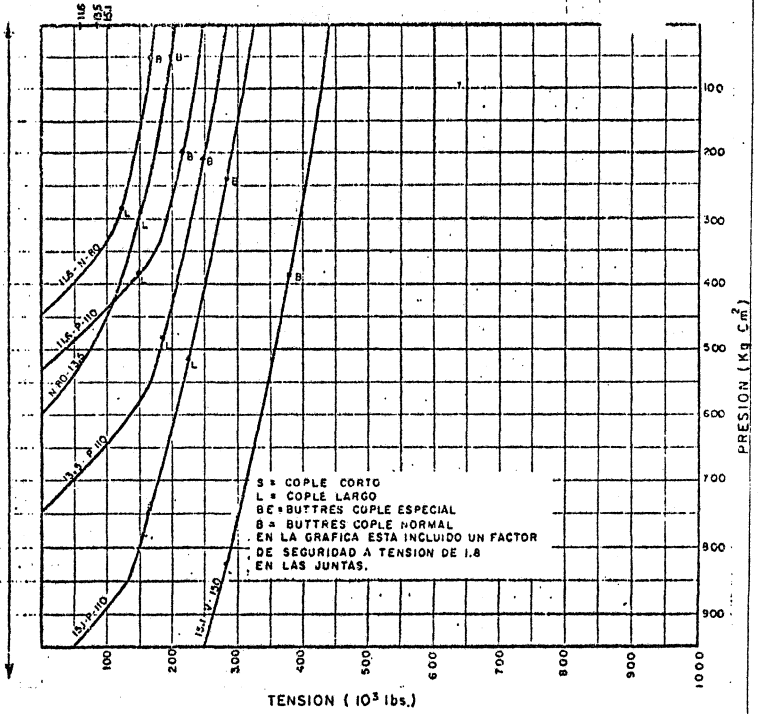


FIGURA 4

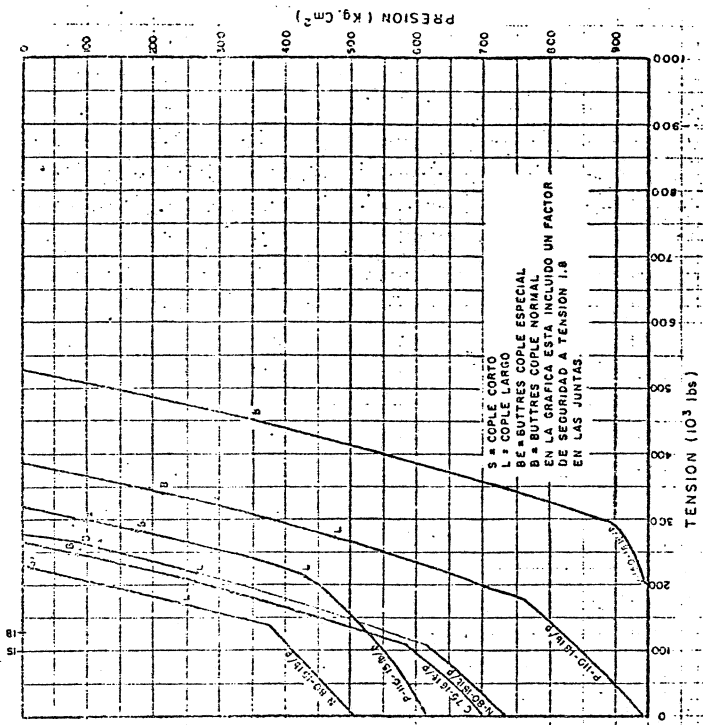
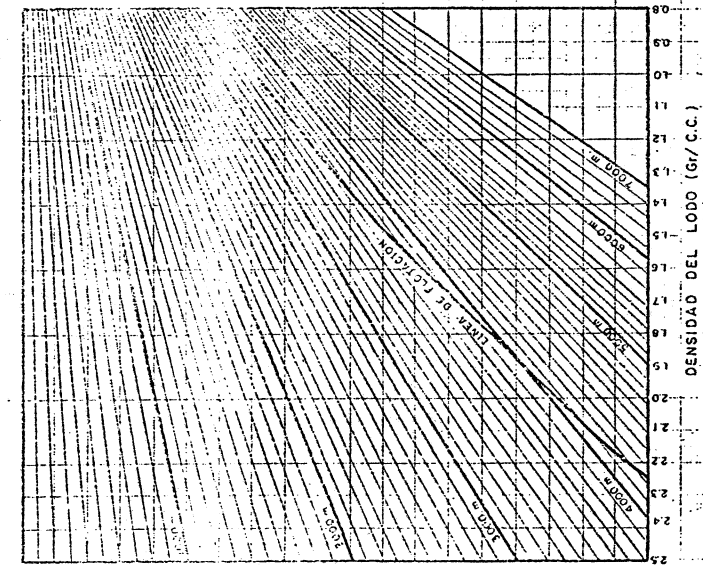


DENSIDAD DEL LODO

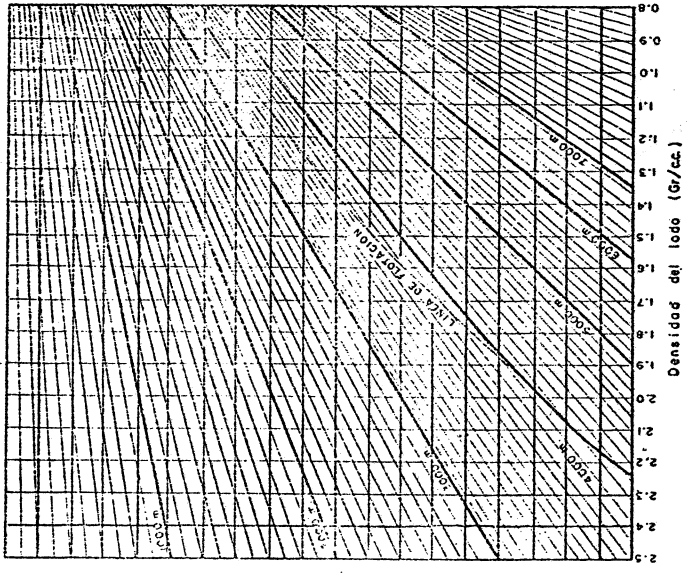
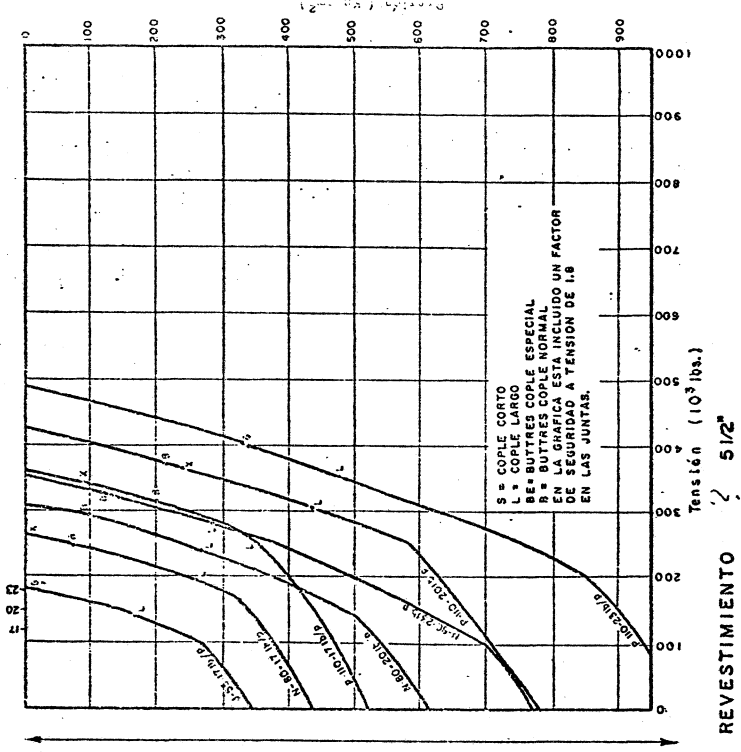


TENSION (10³ lbs.)

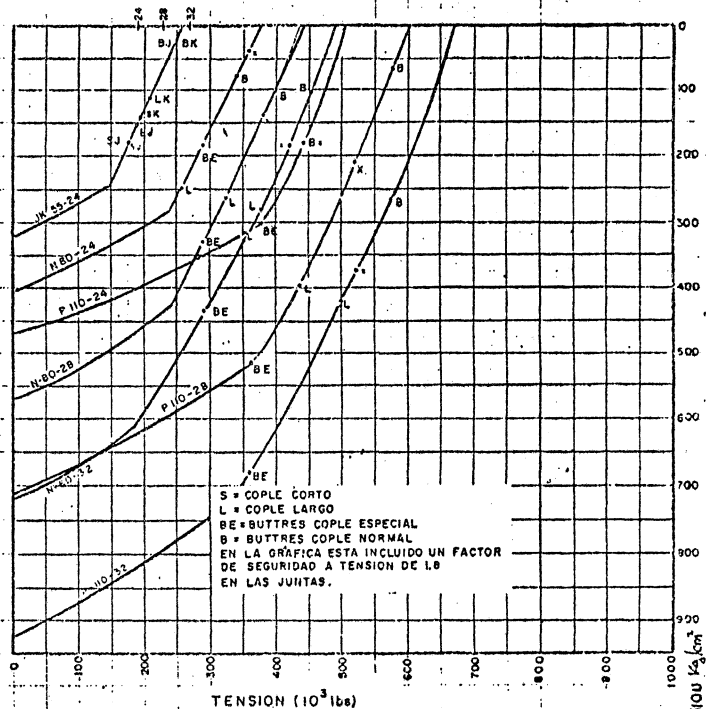
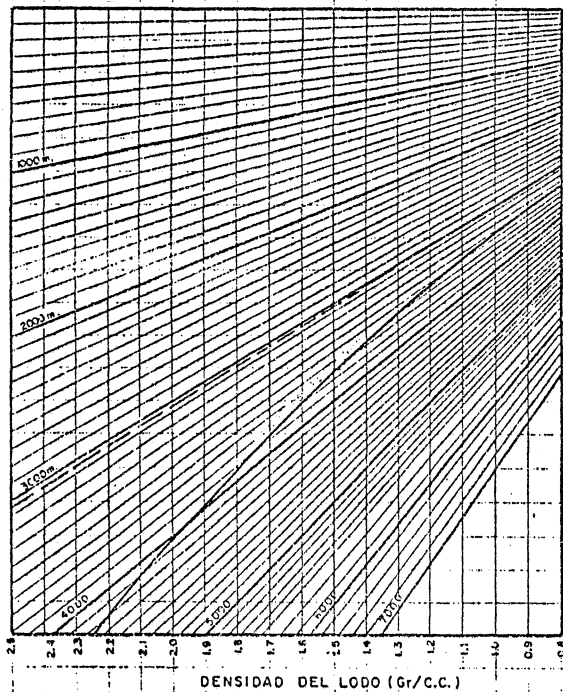
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 4 1/2"



DISEÑO DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO 5"

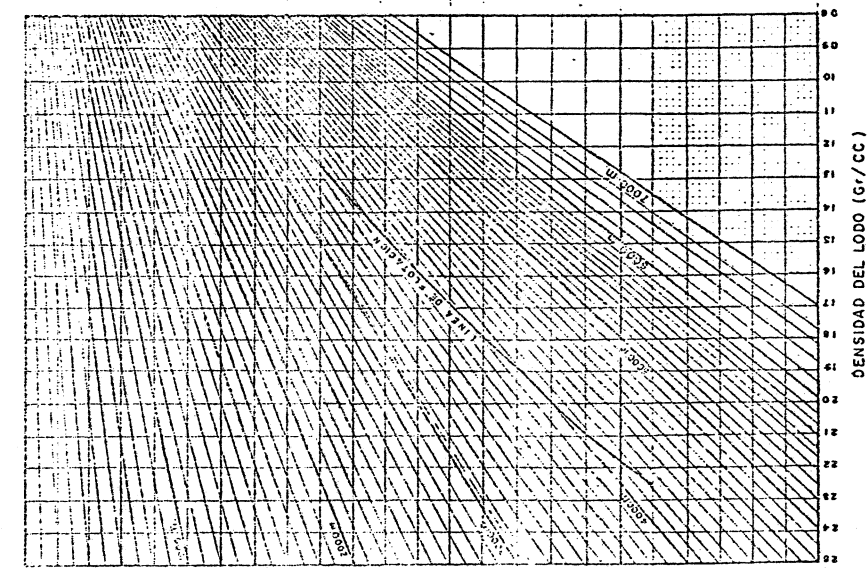


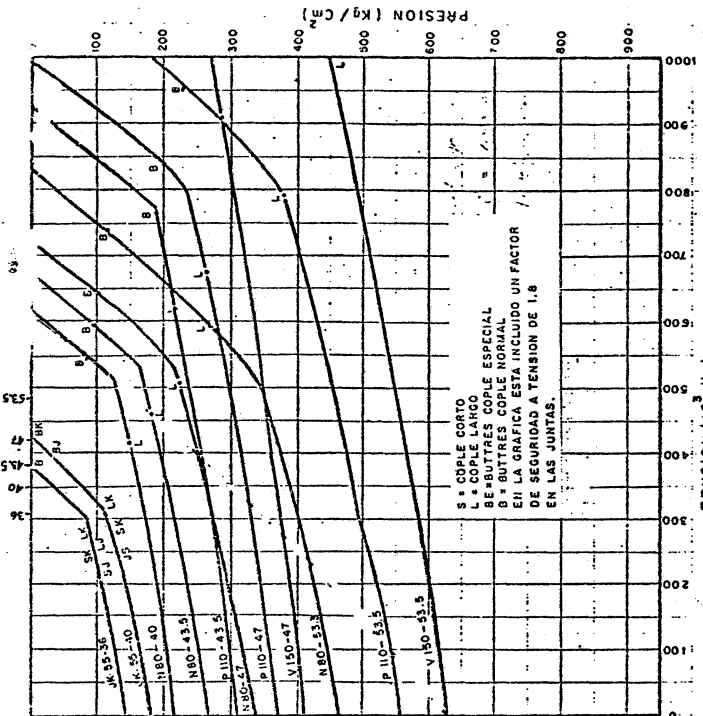
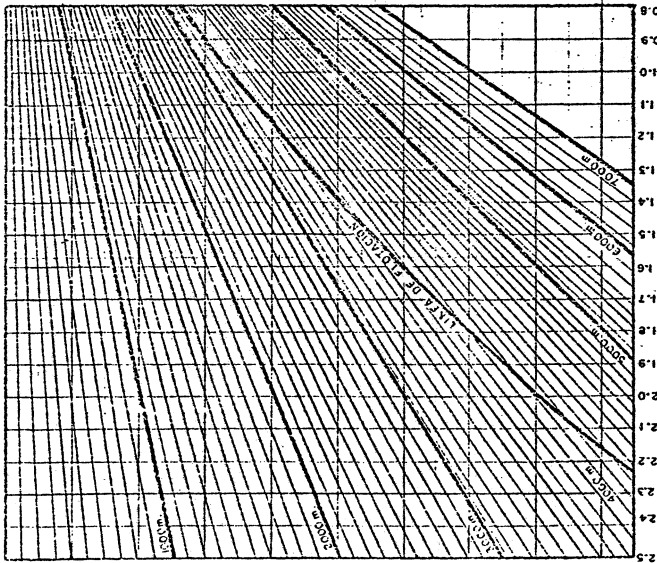
DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO ϕ 5 1/2"



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 6 5/8"

Profesión 123/cm

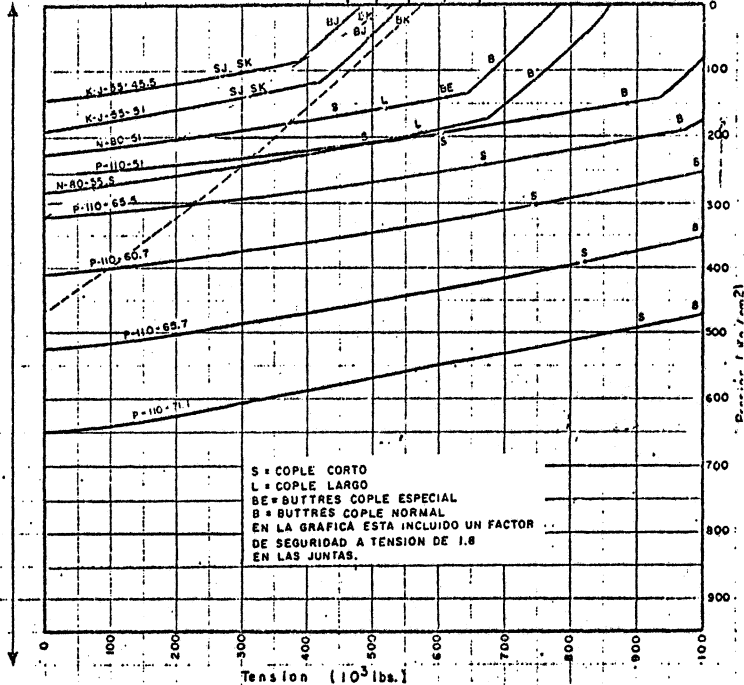
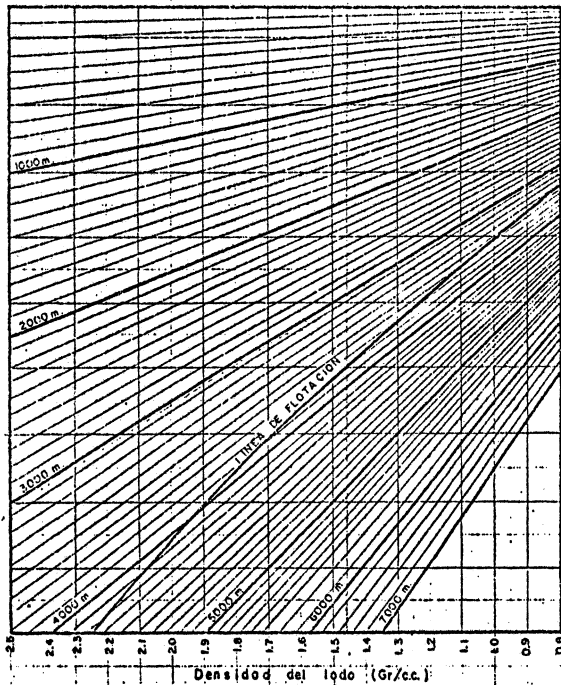




S = COPLE CORTO
 L = COPLE LARGO
 B = BUTRES
 BK = BUTRES ESPECIAL

EN LA GRAFICA ESTA INCLUIDO UN FACTOR DE SEGURIDAD A TENSION DE 1,8 EN LAS JUNTAS.

DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 9 5/8"



DISEÑO DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO 10 3/4"

En la perforación orientada es necesario llevar un control constante de inclinación y rumbo (dirección) a lo largo de todo el curso perforado y así llegar al objetivo programado.

Aplicaciones de la perforación orientada controlada.

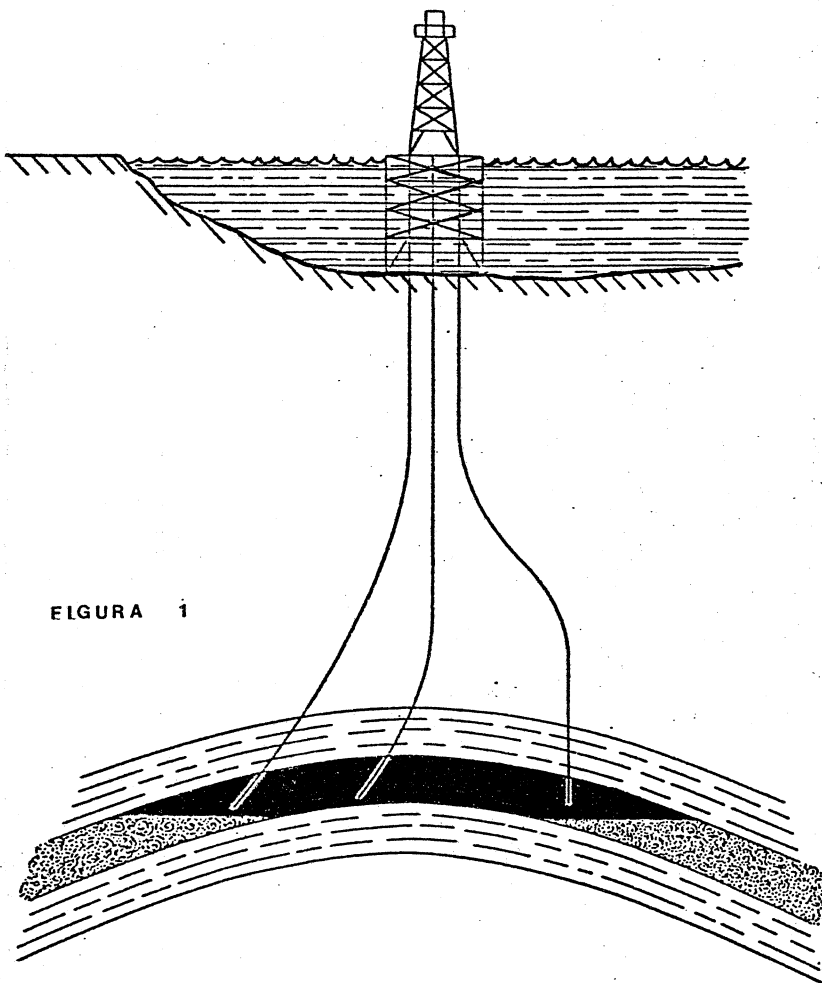
- 1.- Perforación de varios pozos desde plataformas marinas -- (estructuras fijas).- Esta aplicación es la mas común en nuestros días, ya que permite perforar varios pozos desde una sola estructura.
Fig. 1.-
- 2.- Localizaciones inaccesibles.- En ocasiones es necesario perforar uno o varios pozos para cubrir el desarrollo completo de un yacimiento, encima del cual se tiene ya eregida una ciudad, o bien la instalación del equipo de perforación se dificulta por las características del terreno.
Figs. 2 y 3.-
- 3.- Perforación de domos salinos.- En los casos donde se tiene que atravesar domos salinos, los cuales contaminan al lodo seriamente, es conveniente dirigir el pozo hacia -- los flancos del mismo para alcanzar las zonas productoras.
Fig. 4.-
- 4.- Perforación en zonas de fallas geológicas.- La perforación orientada evita perforar pozos adicionales, pues si el pozo vertical cae en una zona invadida de agua salada, será factible colocar un tapón de cemento-arena a -- una profundidad conveniente y, mediante la perforación controlada, dirigir el pozo a una zona que tenga mejores probabilidades de acumulación de hidrocarburos.
Fig. 5.-
- 5.- Perforación en pozos donde se tienen problemas por accidentes mecánicos (pescado).- En este caso es conveniente desviar el pozo, a partir de un tapón cemento-arena que se coloca arriba de la zona problema.
Fig. 6.-
- 6.- Perforación de pozos de alivio.- Esta es otra aplicación de gran importancia, que tiene como finalidad controlar un pozo, en el que por alguna causa han fallado los sistemas de seguridad superficiales.
Fig. 7.-

Planeación de una perforación orientada bajo control.

Este tipo de perforación requiere de varios factores que

Perforacion en Plataformas

Marinas

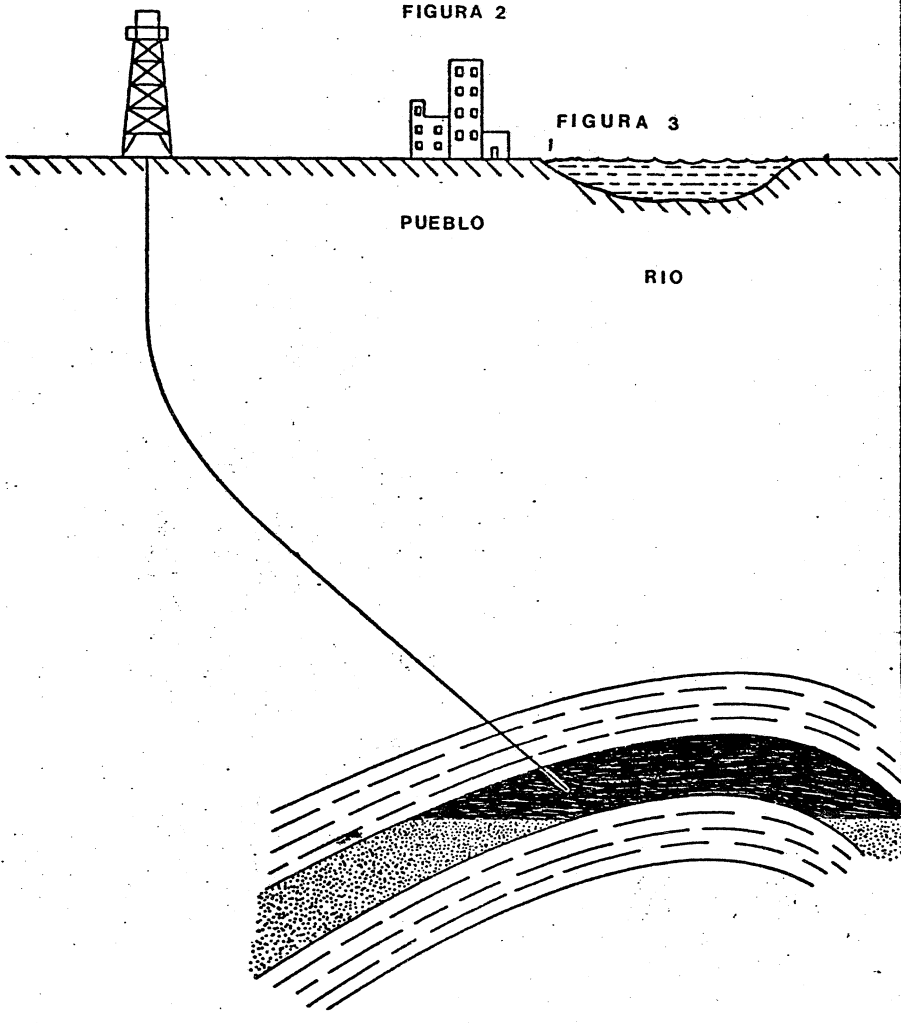


ELGURA 1

LOCALIZACION INACCESIBLE

FIGURA 2

FIGURA 3



PERFORACION DE
DOMO SALINO

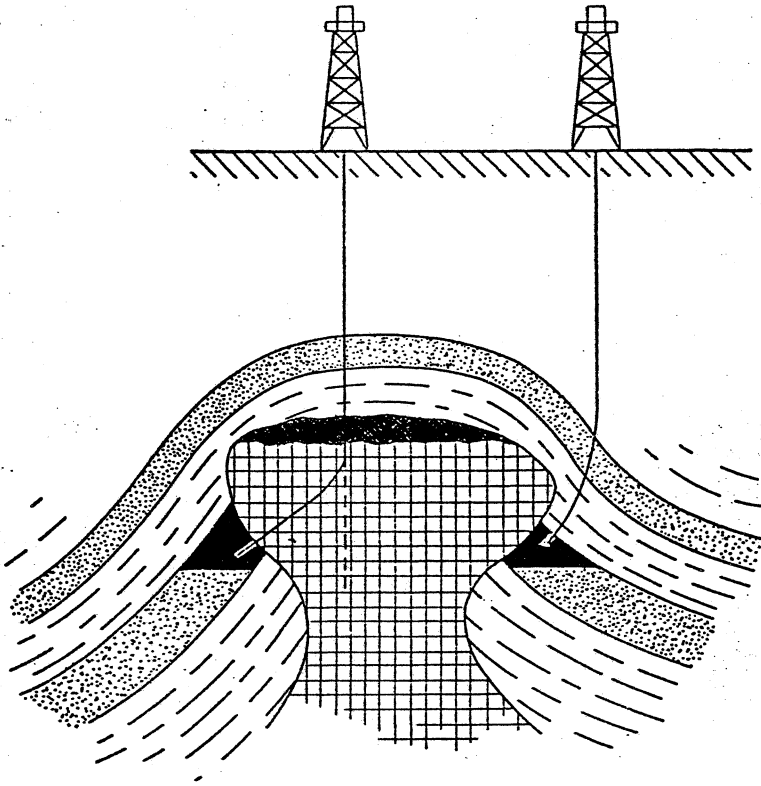


FIGURA 4

PERFORACION EN ZONAS AFALLADAS

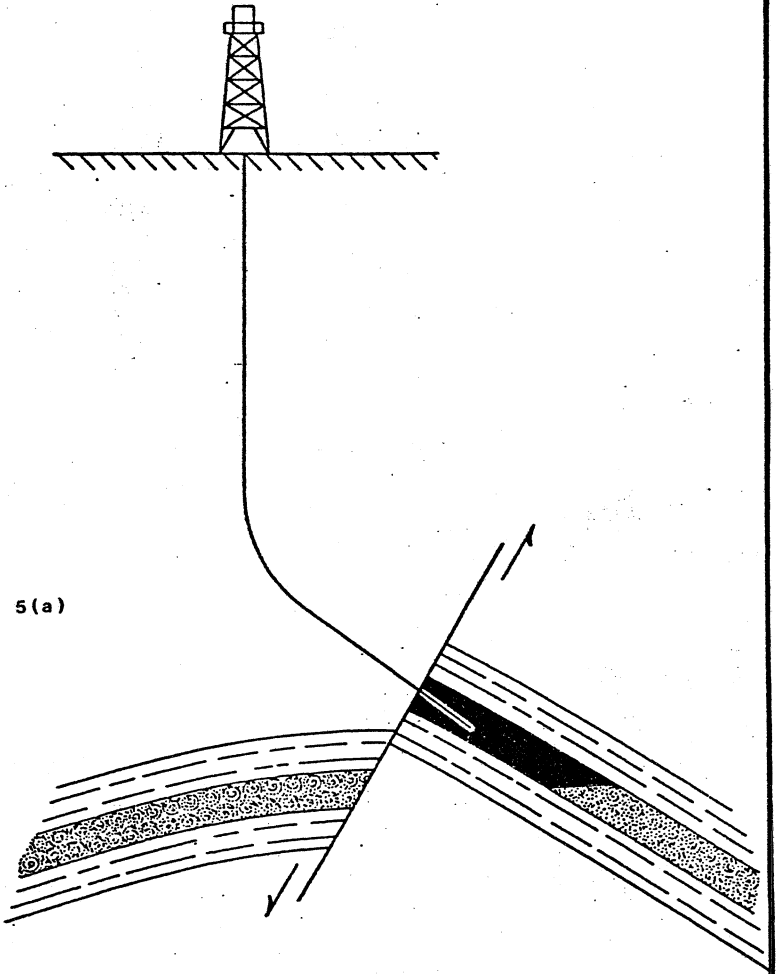


FIGURA 5(a)

Estructura Áfallada

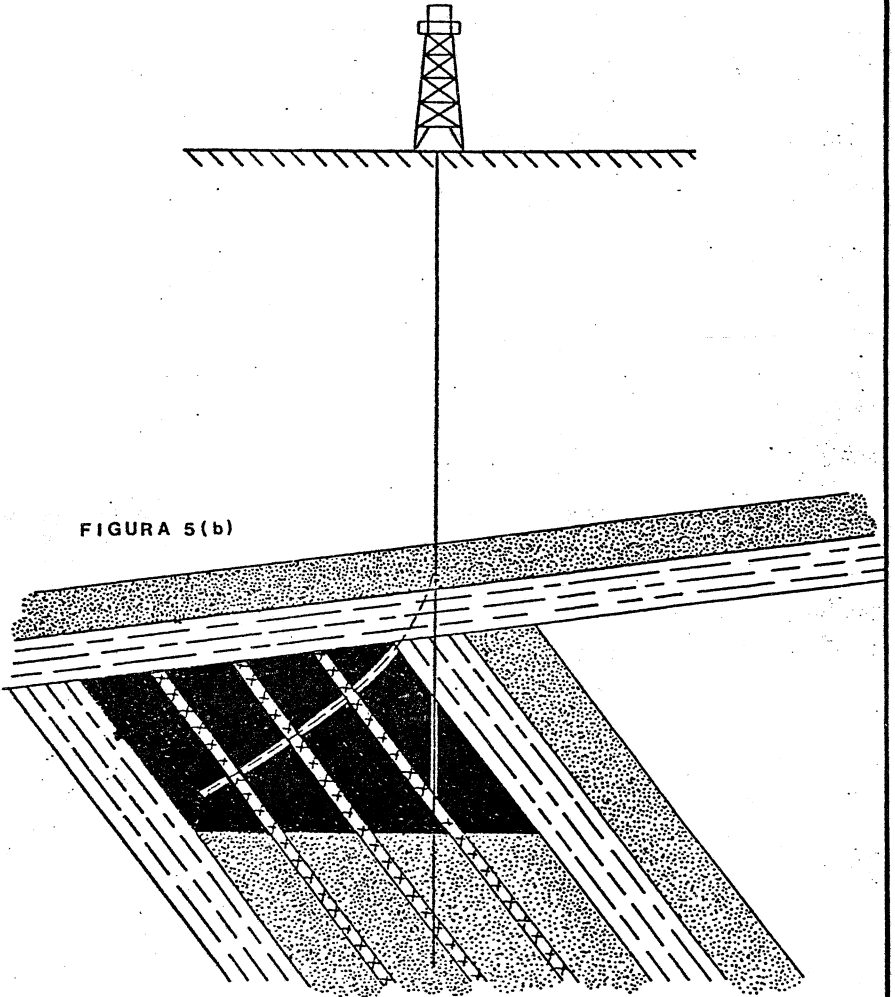


FIGURA 5(b)

PERFORACION POR PROBLEMAS MECANICOS

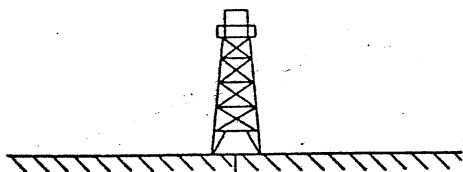
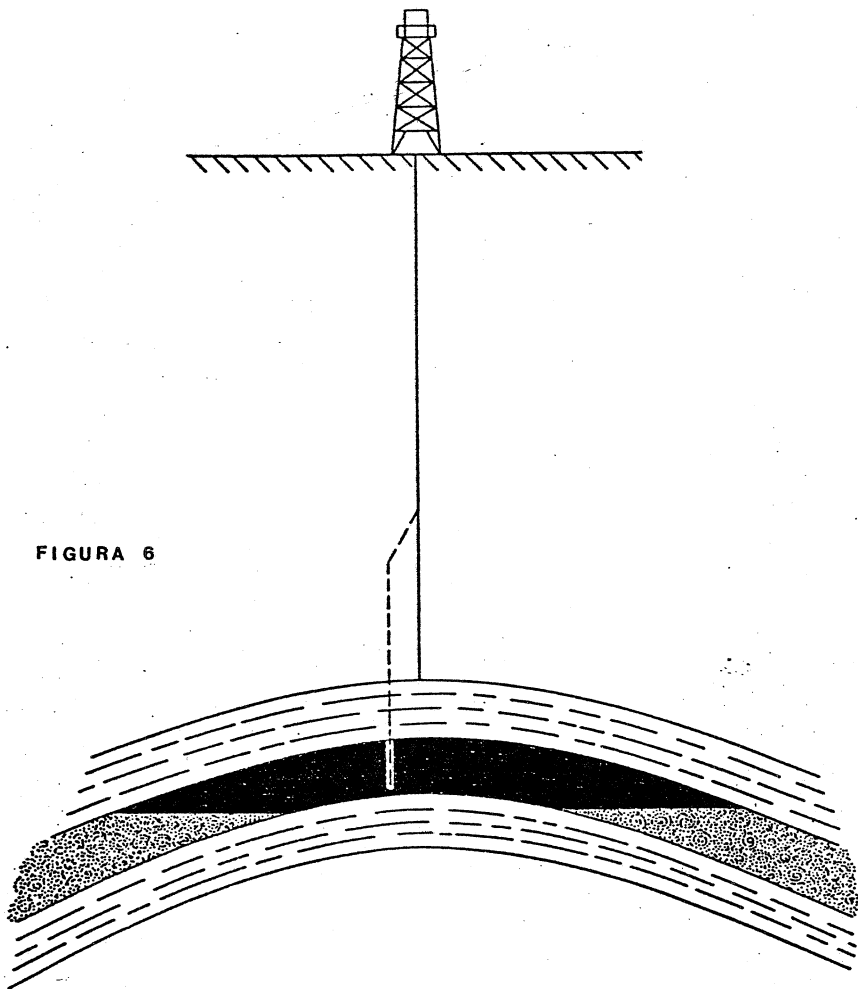


FIGURA 6



Perforacion en pozos de alivio

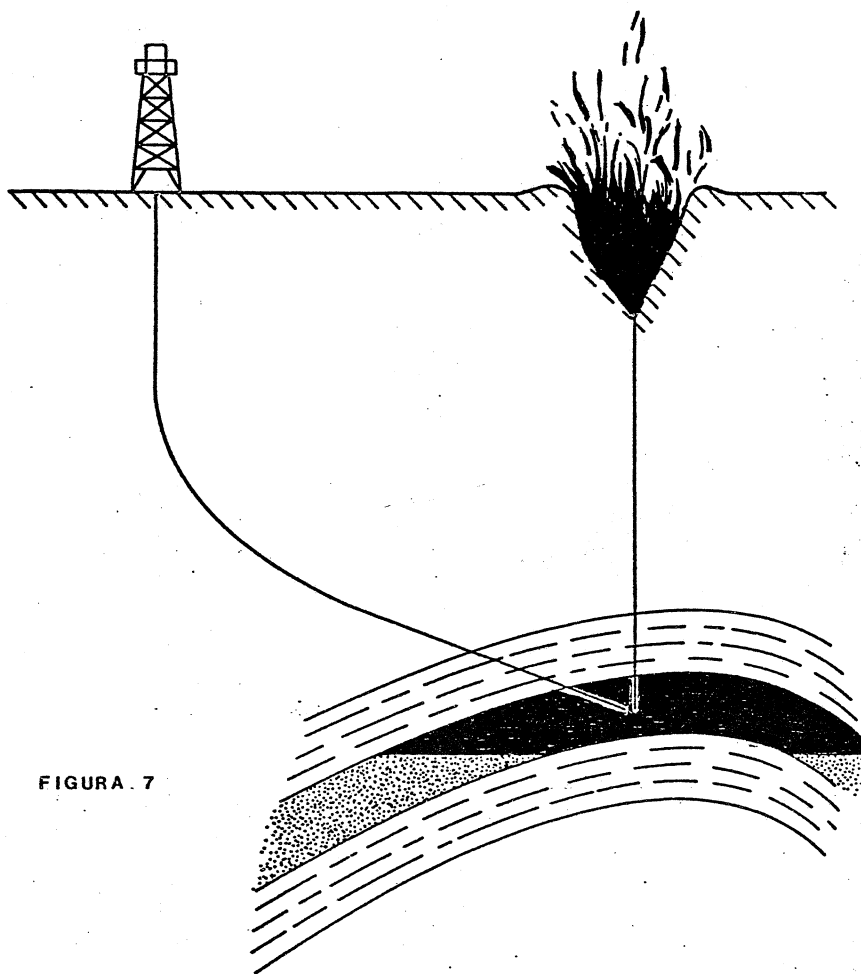


FIGURA. 7

deberán de tenerse en cuenta. La correcta planeación es la -- clave para disminuir el costo total del pozo a perforar, ya - que la selección de la herramienta y el método adecuado redun- dará en la mayor eficiencia de operación y resultados económi- cos.

Factores que deben considerarse:

- a).- Análisis de las formaciones.- Este factor esta ligado a la selección de la localización para situar el equipo de perforación. Es conveniente aprovechar las tendencias de desviación que tienen las formaciones, pues tales tenden- cias ejercen un marcado efecto sobre el grado de inclinación del pozo.
- b).- Diámetro del pozo y programa de tuberías de revestimien- to.

Estos factores deberán permitir la perforación más rápi- da posible y la protección adecuada del agujero de pro- blemas probables de la zona.

De datos estadísticos se menciona que los pozos de diáme- tro grande son más fáciles de controlar que los de diáme- tro mucho menor, dado que en estos últimos se usan con- juntos de lastra-barrenas de diámetro adecuado al de la barrena empleada y por consiguiente estos tubos lastra- barrenas son más flexibles, ocasionando que se pierda el control de ángulo y dirección.

Los programas de tuberías de revestimiento pueden ser si- milares a los programas de pozos verticales, la excep- ción es en aquellos pozos profundos o con demasiado ángu- lo de inclinación.

- c).- El control del lodo de perforación requiere de una conti- nua supervisión, ya que es importante mantener sus condi- ciones para que el arrastre de torsión de las tuberías no sea excesivo.

Configuración de un pozo perforado con orientación con- trolada.

Con base en la información geológica, los programas de - tuberías de revestimiento y las propiedades del lodo de perfo- ración, se podrá escoger la configuración del pozo más apro- piada para la operación.

Existen tres tipos generales de pozos desviados a saber:

Tipo I Fig. 8.- El pozo es programado de modo que el ini- cio de la desviación sea a una profundidad somera. El ángulo- de inclinación se mantiene constante hasta llegar a la profun- dad del objetivo.

Esta configuración se usa principalmente para pozos de - profundidad moderada, en regiones en las que la zona productora corresponde a un sólo intervalo y en las que no se requiere el uso de más de una tubería de revestimiento intermedia.

Tipo II.- Fig. 9.- En esta configuración, denominada "S", se inicia también la desviación a una profundidad somera, la inclinación se mantiene constante, igual que en el Tipo I, hasta casi lograr el desplazamiento o distancia horizontal. Seguidamente se reduce el ángulo de inclinación, hasta llegar el pozo a la vertical y en esta forma se perfora la formación objetivo. Esta configuración tiene como base el perforar en zonas donde hay limitaciones por la localización del objetivo.

Tipo III. Fig. 10.- La desviación se inicia a una profundidad mayor que la impuesta en el tipo I, el ángulo de inclinación sigue el mismo patrón, conservándose constante hasta alcanzar el objetivo. Esta configuración es especialmente para situaciones tales como las perforaciones de fallas o domos salinos, o para reubicar la sección inferior del pozo.

FIGURA 8

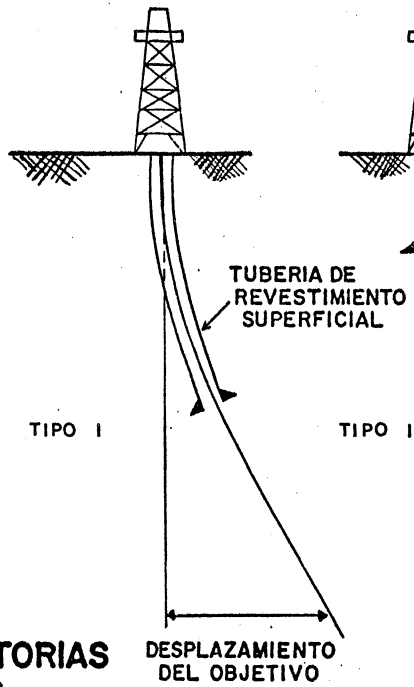


FIGURA 9

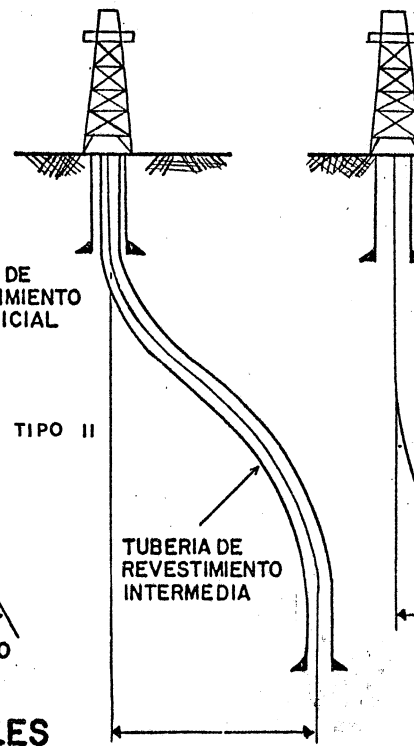
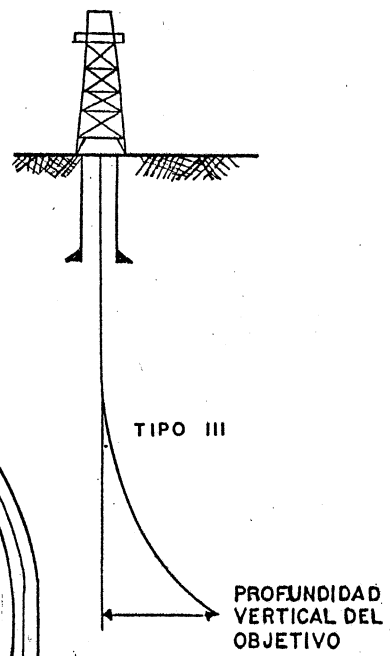


FIGURA 10



**TRAYECTORIAS
BASICAS
DE LOS POZOS DIRECCIONALES**

DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS PARA LA ORIENTACION Y LA DESVIACION.

Para llevar el control de un pozo direccional, se requiere llevar un registro constante de su ángulo de inclinación y su rumbo. Dicha información es proporcionada por medio de los diferentes tipos de instrumentos que se utilizan para medir la orientación y desviación de pozos direccionales.

Si no se contara con estos instrumentos, que permiten de terminar los datos de inclinación y rumbo, la perforación de estos pozos se efectuará practicamente a ciegas, lo cual traería como consecuencia inmediata, una variación en *el programa de trabajo en el cual estos pozos fueron diseñados.*

Entre los instrumentos que se utilizan para determinar la orientación y desviación de pozos direccionales, se tienen los siguientes:

- 1.- Inclínómetros
- 2.- Giroscopios
- 3.- Herramienta de Orientación Direccional (D.O.T.)

1.- Inclínómetros.- Estos instrumentos proporcionan la inclinación del pozo en cualquier momento que se requiere, ya sea en agujero descubierto ó con tubería de revestimiento y sin necesidad de incluir, en la sarta de perforación, herramientas especiales, como los lastrabarrenas o tubos no magnéticos. El dato del rumbo se obtiene con un inclinómetro equipado con aguja imantada, la cual es influenciada por los campos magnéticos permanentes que presentan las herramientas de perforación. Para evitar esta influencia, es necesario incluir herramientas que no provoquen dichos campos (lastrabarrenas no magnéticos).

Entre estos instrumentos se tienen:

1.1.- Inclinómetro de Disparo Unico (Single-Shot), tipo "R". El instrumento de medición direccional de disparo único es un instrumento de precisión construido para trabajo pesado y fácil de operar; registra simultáneamente la inclinación (ángulo de desviación) y la dirección magnética (rumbo) del agujero perforado, sobre un disco de película. Esto es, fotografiando la posición del indicador del ángulo referido a una

brújula con unidad angular calibrada.

Los registros de las mediciones direccionales son necesarios para la perforación direccional controlada de agujeros y para calcular la posición del fondo con relación a la superficie. Estos registros son fáciles de leer, simples de interpretación y permanentes.

El instrumento consiste de un reloj (mecanismo de tiempo), una sección de baterías (fuente de potencia), cámara fotográfica, focos, compartimiento del disco y unidad angular; todas las partes están encerradas dentro de una camisa exterior.

Los relojes del instrumento están disponibles para intervalos de tiempo de 33 ó de 66 minutos. La sección de baterías contiene 3 baterías secas, fabricadas especialmente para usarse con los instrumentos de disparo único. La cámara está enfocada de antemano y no requiere ajuste. El diseño del comportamiento del disco permite la carga y descarga a la luz del día, eliminando la necesidad de un cuarto oscuro o de un saco para la cámara. Las unidades angulares de una sola exposición - 0°- 10°, 0°-20° y 15°- 90°, combinan una brújula magnética para indicar la dirección magnética (rumbo) y un indicador de ángulo para mostrar el ángulo de inclinación con respecto a la vertical. Las partes móviles de todas las unidades angulares están amortiguadas con un fluido, dentro de una unidad sellada (Fig. 11).

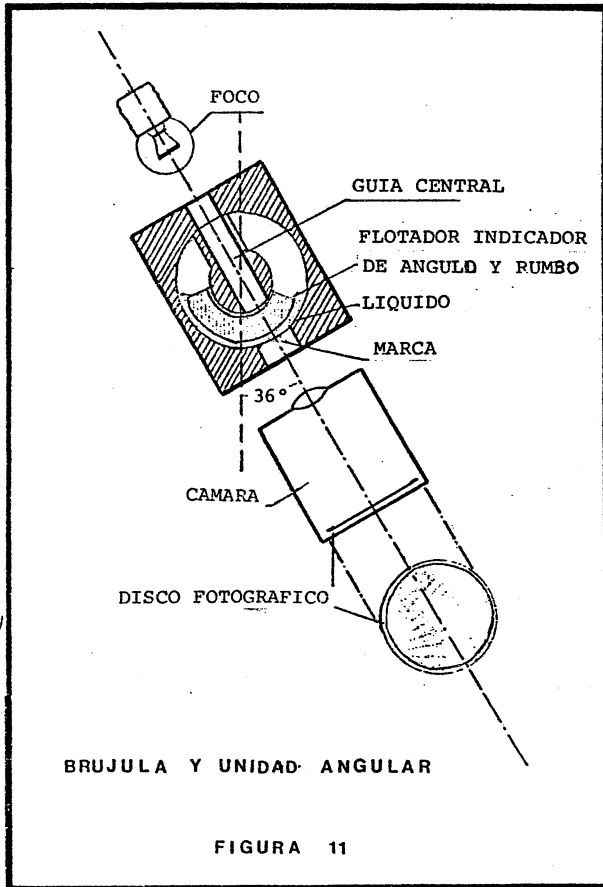
Los discos de disparo único de 0°- 10° y 0°-20° se leen -- utilizando un lente amplificador (visor) que se coloca sobre ellos de tal manera que la línea del visor pase exactamente -- a través del punto central del disco y la intersección de las líneas cruzadas (Fig. 12).

La dirección magnética se lee de Norte a Este u Oeste, o de Sur a Este u Oeste; en la intersección de la línea y las graduaciones sobre el borde exterior del disco.

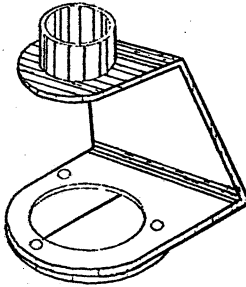
La inclinación (ángulo de desviación se lee contando el número de círculos concéntricos. Cada círculo es igual a un grado, desde el punto central a la intersección de las líneas cruzadas.

Los discos de disparo único de 15° a 90° se leen directamente sin la necesidad de utilizar el visor. La dirección magnética se lee en la intersección de la línea vertical con las graduaciones en la orilla inferior del disco. La inclinación se lee en la intersección de la línea horizontal y la escala calibrada sobre el disco de disparo único.

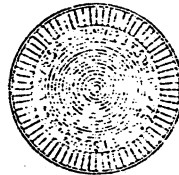
Es necesario que el lugar en donde se vaya a tomar la -- desviación y orientación, no este afectado por ninguna atracción magnética diferente a la de la tierra (Fig. No. 13), por



DISCOS PARA ANGULOS DE RANGO DIFERENTE

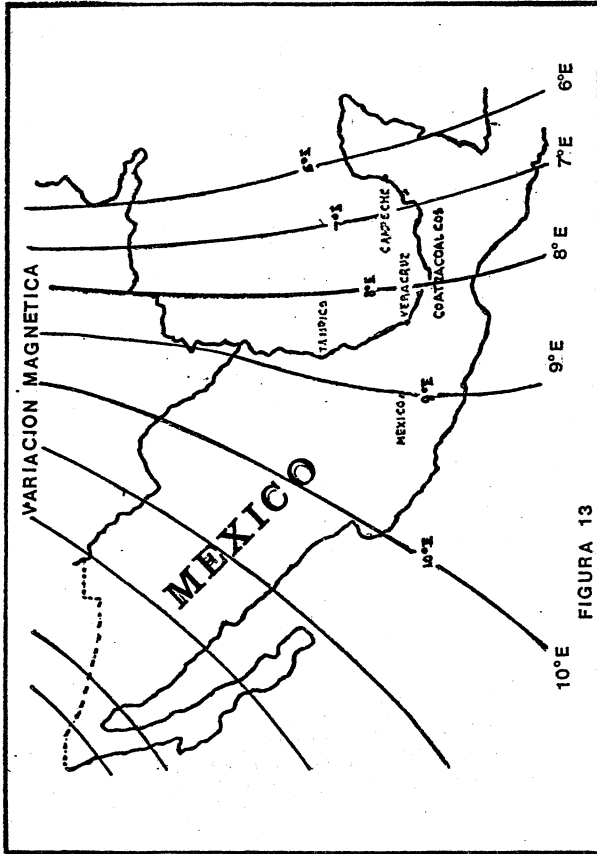


0°-10°



0°-20°

FIGURA 12



lo cual se utilizan lastrabarrenas no magnéticas, que son los que alojan al instrumento.

La camisa exterior, donde están encerradas las partes del instrumento, se coloca dentro de un barril protector, el cual tiene en la parte superior una unión giratoria libre (swivel) y sobre éste está la unión para la línea o cable, con el que se baja por el interior de la tubería de perforación.

I.2.- Inclinómetro de Disparo Múltiple (Multi Shot).- El instrumento de medición de disparo múltiple presenta un método seguro, rápido y preciso para examinar agujeros descubiertos. Este instrumento de medición de 1 1/4" de diámetro, encerrado en un barril protector no magnético de 1 3/4", se deja caer libremente dentro de la tubería de perforación, deteniéndose en el fondo, ya sea en una mampara o sobre el anillo de aterrizaje en la parte inferior del lastrabarrena no magnético.

Se usan las barras espaciadoras no magnéticas arriba o a bajo del barril protector no magnético del instrumento, con el objeto de mantener la posición de la brújula aproximadamente a un pie abajo de la línea central, en las diferentes longitudes de los lastrabarrenas no-magnéticos.

La dirección magnética y la desviación con respecto a la vertical se pueden registrar fotográficamente sobre película de 10 mm al sacar cada lingada de tubería.

Los registros pueden efectuarse en cualquier intervalo o profundidad que se requiera, mientras la tubería de perforación es sacada del agujero. Inmediatamente después de que se ha hecho la medición, la película puede ser revelada, interpretada y calculados los resultados.

2.- Giroscopios.- Para eliminar completamente los problemas que causa la interferencia magnética de los inclinómetros con aguja imantada, se empezó a emplear y a desarrollar la técnica de la aguja giroscópica. La aguja giroscópica es un instrumento electromecánico cuyo funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la precisión y de la inercia o rigidez giroscópica.

La rigidez giroscópica es la tendencia que tienen los giroscopios a mantener su eje constantemente paralelo así mismo, cuando se le mantiene girando y en suspensión pendular. (Fig. 14)

De estos instrumentos se tienen los siguientes:

2.1.- Giroscopio de Disparo Único.- El instrumento estándar "R" de disparo único, con un adaptador a la unidad angular del giroscopio, proporciona un método preciso para orientar las herramientas u otros conjuntos de perforación que re-

quieren orientación direccional.

El instrumento no es afectado por los campos magnéticos, ni afecta la precisión del mismo por la cercanía del fierro - de la subestructura del equipo de perforación.

La película del disco, puede ser revelada y leída tan -- pronto como el instrumento es recuperado del agujero, al igual que la elaboración y graficación de los cálculos.

2.2.- Giroscopio de Disparo Múltiple.- El instrumento - giroscópico proporciona un medio para registrar una medición direccional en forma continua sobre una película de 10mm en - agujeros descubiertos o con tubería de revestimiento. Se usa una unidad de tipo plomada para medir la inclinación del agujero.

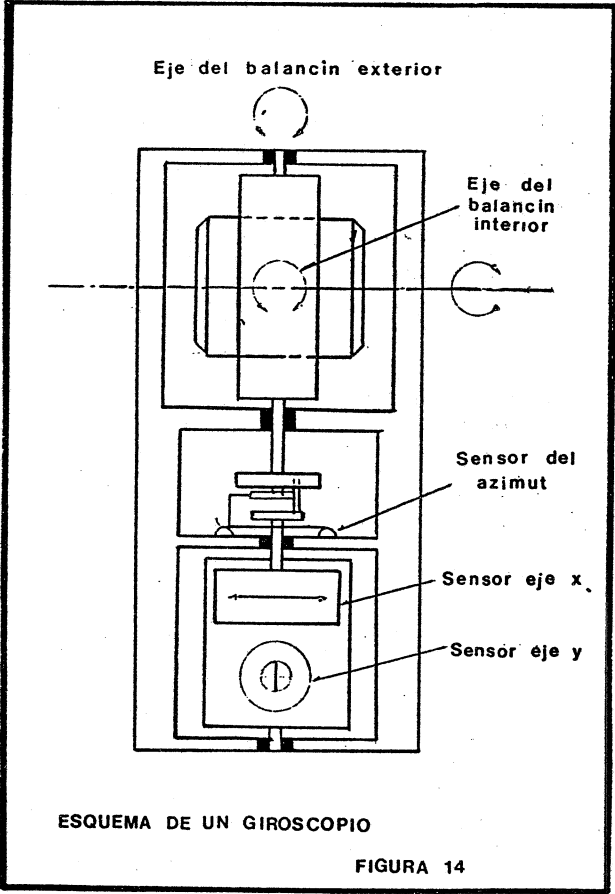
El instrumento direccional giroscópico puede correrse con el cable de sondeo, con una línea de acero o puede ser soltado dentro del conjunto de perforación con centradores en el - cuerpo del instrumento. No puede dejarse caer libremente dentro del agujero debido a que la fuerza del impacto dañaría se veramente al giroscopio.

Los instrumentos de medición tipo "R", de disparo único y de disparo múltiple, junto con la película para agujeros de altas temperaturas, se colocan dentro de una camisa protectora, y está a su vez dentro del barril protector. La camisa -- protectora resiste temperaturas hasta de 260°C (500°F), por - un período de 4 horas.

3.- Herramientas de Orientación Direccional (D.O.T.).- - Es un instrumento electrónico de los más avanzados y de mayor precisión que los mencionados anteriormente, ya que con él se obtienen las lecturas directa de la inclinación y dirección - del pozo, en la superficie y además indica también la orienta ción de los motores que se usan para desviar y controlar la desviación.

El sistema (D.O.T.) permite observar en forma continua - el rumbo de la barrena, la dirección del pozo y el ángulo de desviación a medida que cambian. Este sistema consta de tres unidades separadas, que trabajan en conjunto para suministrar datos precisos, los cuales son:

(a).- Probador a cable.- Esta unidad es la recolectora - de la información del sistema. Se baja el pozo con un cable - conductor sencillo y se sienta en el conjunto orientador de- - bajo de un tubo lastrarbarrena no-magnético. El probador con- - tiene varios sistemas electrónicos necesarios para detectar - las condiciones del pozo desviado y transmitir la información a la superficie.



(b).- Computador de sistema.- El computador organiza, -- combina y efectua cálculos a partir de las señales que recibe del probador y las convierte en información útil. El sistema además, vigila más de 15 señales del probador para verificar las condiciones del cable y el funcionamiento de los circuitos de la herramienta.

(c).- Unidad de Lectura.- Esta unidad del sistema se sitúa en el piso del equipo de perforación, cerca de la consola del perforador. Le da al perforador indicaciones continuas del rumbo magnético del pozo, del azimut de la herramienta desviadora y del ángulo del pozo.

HERRAMIENTAS PARA DESVIAR O CORREGIR DESVIACIONES

El tipo de herramientas y barrenas que más se usan en -- la perforación direccional, son determinadas de acuerdo a las condiciones geológicas y mecánicas.

Las herramientas más usadas son:

1.- Desviador de pared o Cuchara.- Es una pieza de acero sólido, más o menos cilíndrica con un bisel cóncavo e inclinado que dirige a la barrena en la dirección deseada. En la parte superior tiene un anillo o cuello donde se retiene a el portabarrena, a el estabilizador y a la barrena; (ya que este anillo es de menor diámetro). En la parte inferior, termina en forma de cincel que sirve para fijarla en el fondo del pozo.

Existen dos tipos de desviadores o cucharas, que son:

1.1.- Desviador con circulación de chorro.- La circulación es a través de un tubo que se encuentra a la altura de la boquilla que, para este efecto, lleva el portabarrena estabilizador. El tubo pasa longitudinalmente por la cuchara, hasta la parte inferior. Esta circulación es para limpiar el fondo donde será sentada (Fig. 15)

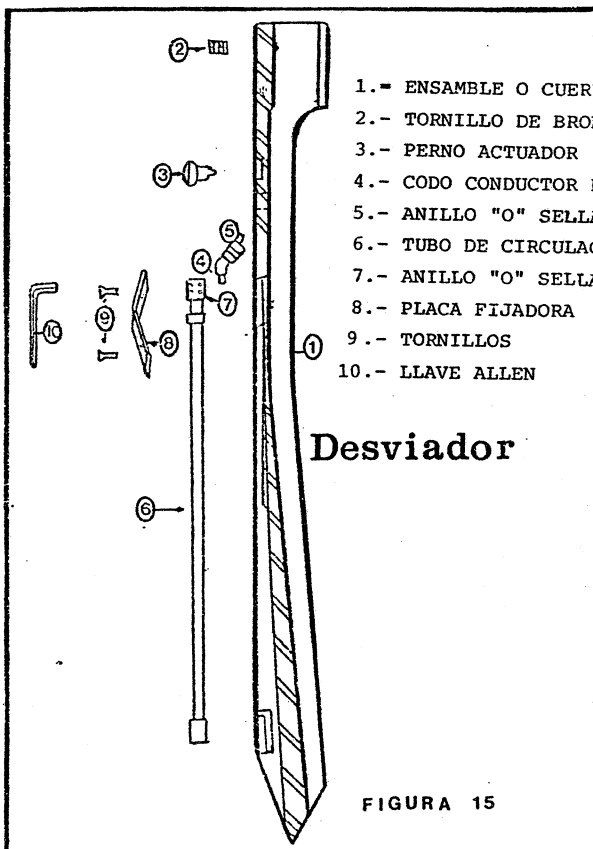
Quando el desviador esté en el fondo y orientado, se para la circulación, se desconecta la conexión de la flecha y se suelta una canica a través de la sarta de perforación. La canica se aloja en el asiento del pistón, se cortan los pernos sujetadores del pistón y se mueve hacia abajo, logrando así que la circulación del fluido de perforación sea dirigido a través de la barrena.

1.2.- Desviador sin circulación (convencional).- Opera de la misma forma que un desviador con circulación, con la única diferencia que la circulación se hace siempre a través de la barrena (Fig. 16).

La conexión de la cuchara o desviador en la superficie se hace de la siguiente manera:

a).- Con el cable de maniobras se levanta la cuchara y se mete parcialmente en el agujero, luego se toma un tramo de tubería de perforación que, según el diámetro de la cuchara, puede variar de 2 7/8" a 4 1/2" de diámetro y se hace pasar por el anillo o cuello de ésta.

b).- En el piñón del tubo van roscadas ya sea la barrena solamente o combinada con estabilizador y junta universal. En la caja de este mismo tubo, o sea en la parte superior, va colocado el sustituto orientador y en seguida un tipo no-magnético.



- 1.- ENSAMBLE O CUERPO
- 2.- TORNILLO DE BRONCE
- 3.- PERNO ACTUADOR
- 4.- CODO CONDUCTOR DE CIRCULACION
- 5.- ANILLO "O" SELLADOR
- 6.- TUBO DE CIRCULACION
- 7.- ANILLO "O" SELLADOR
- 8.- PLACA FIJADORA
- 9.- TORNILLOS
- 10.- LLAVE ALLEN

Desviador

FIGURA 15

Corte longitudinal de un desviador

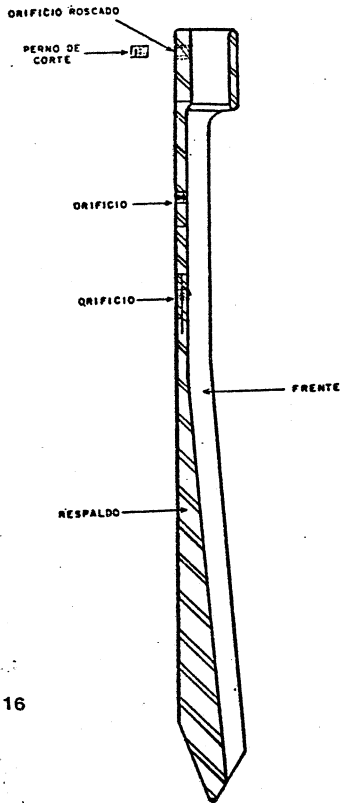


FIGURA 16

c).- Se levanta la herramienta y se colocan las cuñas en la cuchara para lograr la coincidencia del orificio roscado en la parte posterior, con el orificio del estabilizador, por los que se pasa el perno y con el cual queda asegurado el desviador al resto de la sarta. En ciertos casos, cuando la herramienta desviadora se va a utilizar a poca profundidad y no hay suficiente peso para romper el perno, se debilita su sección, cortándolo hasta la mitad y colocándolo de modo que el corte quede hacia arriba.

d).- Después se procede a alinear el centro de la parte cóncava de la cuchara con la cuña que lleva la camisa del sustituto orientador del fondo, por medio de dos pernos con entrada de llave "Allen", colocados en una relación de 90° conectado este sustituto va el tubo no-magnético. (Fig. 17)

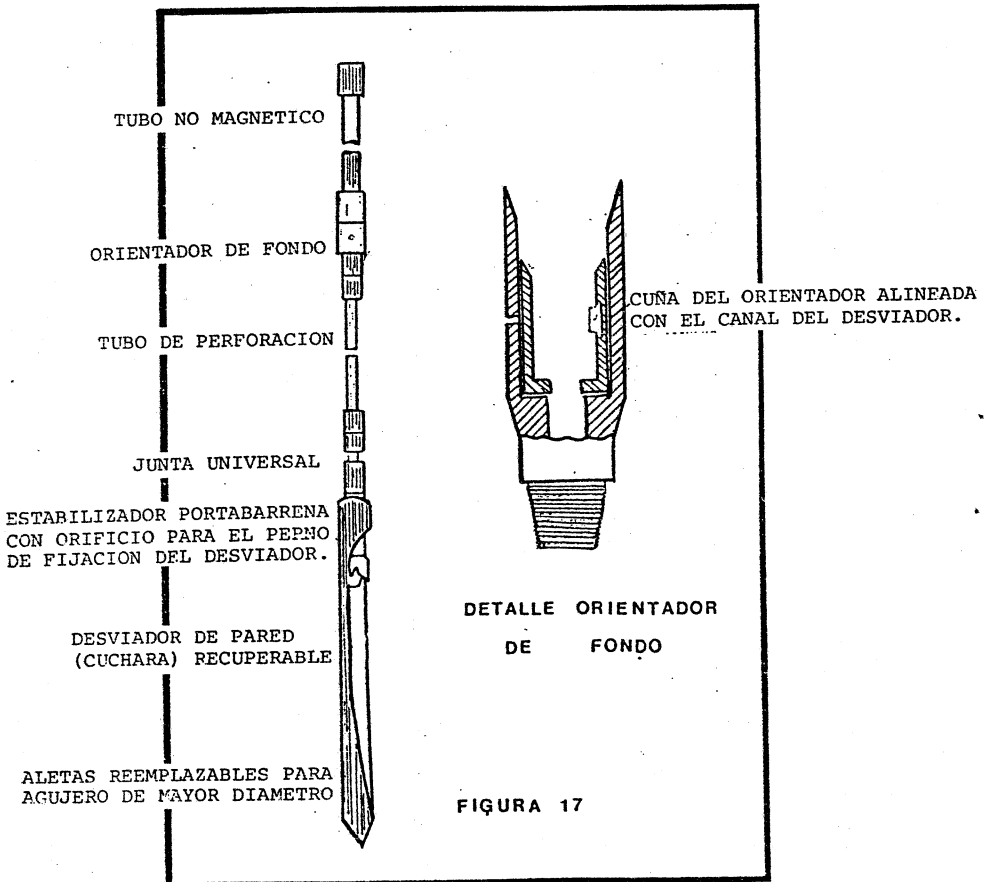
e).- Preparado el desviador, debe ser bajado con precaución, evitando sacudidas fuertes o fricciones con la pared del agujero que pudieran causar la rotura prematura del perno. Al llegar la herramienta al fondo, deberá comprobarse esto con el indicador de peso, basándose en la aguja de más sensibilidad (vernier). Se debe aplicar de una o dos toneladas de peso solamente. La marca del fondo de la flecha coincide con el fondo del pozo. Hecha esta comprobación satisfactoria, se levanta la flecha y se desconecta para tomar una lectura por medio de la cual conoceremos la posición actual de la herramienta.

f).- Logrando lo anterior, se levanta 4 o 5 veces la tubería unos 3 o 4 metros, tocando el fondo con una o dos toneladas de peso; para tratar de eliminar la torsión en la tubería y al mismo tiempo con el extremo de la cuchara hacer un asiento para fijarla en el fondo.

Para independizarla y dejarla hincada en el fondo, hay dos procedimientos.

1.- Con la cuchara ligeramente asentada, se hacen en la flecha tres marcas situadas a 30 centímetros una de otra a partir de la altura de la mesa rotatoria que la primera coincide con el fondo del pozo; y se empieza a bajar lentamente, observando el vernier del indicador cada marca; generalmente un perno de $3/4$ " o 1" se rompe entre la segunda y tercera marca; rotura que claramente se detecta por el movimiento rápido de la aguja (vernier) del indicador de peso, volviendo a su peso original.

2.- En este otro, se logra la rotura del perno mediante descansos rápidos y controlados de la tubería, con lo que se produce movimientos elásticos que golpean al perno hasta romperlo, también es necesario observar el vernier. Este procedi



miento es el más usado porque al hincar la cuchara o desviador en el fondo, se neutraliza el efecto de la fricción contra las paredes del agujero. Como comprobación se tiene en la tubería, rotación libre y sin tensión ya que la barrena se hallará en la parte alta de la cuchara sin tocar aún la formación.

g).- Comprobando esto, se comienza a bajar lentamente y una vez obtenida la resistencia, se inicia la perforación del agujero reducido. Una vez deslizada la barrena la longitud de la cuchara, se perforará de 4 a 5 metros más. (Fig. 18)

h).- El paso siguiente será levantar la barrena hasta el anillo del desviador y se saca. Estas operaciones son delicadas, ya que al sacar la barrena con el desviador se forman derrumbes en las paredes del agujero, causando atoramientos de la herramienta, con el resultado de que si se jala se acuñará más, hasta provocar un aumento de tensión.

Si se observa que la barrena está aprisionada, no se aconseja jalar, sino se tratará de bajar sacudiendo la tubería aplicando también alta presión de bomba para levantar sedimentos o recortes. Al momento en que la barrena alcanza el anillo de la cuchara, ésta se podrá desanclar, por lo que se aplicará la tensión que sea necesaria.

i).- Extraído el desviador, se procede a ampliar el agujero reducido con una barrena piloto. Con ésta herramienta se reparará desde la profundidad en que se colocó la cuchara, hasta la profundidad perforada por la barrena (Fig. 19).

2.- Barrena de Impacto (Spuding Bit).- Esta herramienta en su presentación es semejante a una pala que tiene en la punta inferior una punta en forma de cincel y una tobera para la circulación del fluido de perforación en el lado cóncavo; se trabaja con percusión después de orientarla (Fig. 20).- Se utiliza solamente en formaciones suaves como son: arenas y arcillas poco consolidadas.

Operación:

a).- Se conecta la barrena al sustituto orientador de fondo, se conectan después el lastrabarrena no-magnético, los lastrabarras de acero, la tubería de perforación y se baja a fondo, previendo tocar éste con 2 o 3 metros de flecha.

b).- Se circula en el fondo para limpiarla y se orienta, comprobando que no cambie su posición, moviendo verticalmente (2 o 3 metros) la sarta.

c).- Se colocan los candados a la mesa rotatoria para que no gire, se procede a circular y con percusión de 10 a 15 toneladas, se perforan de 3 a 5 metros.

**Perforando
para
desviar**

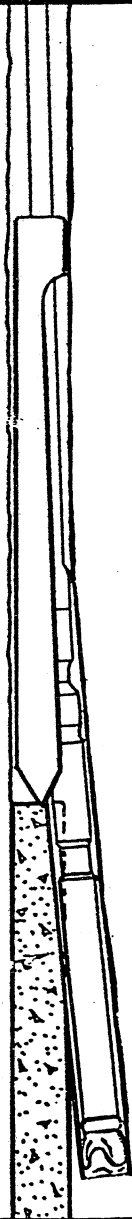


FIGURA 18

Ampliando
Agujero
Desviado

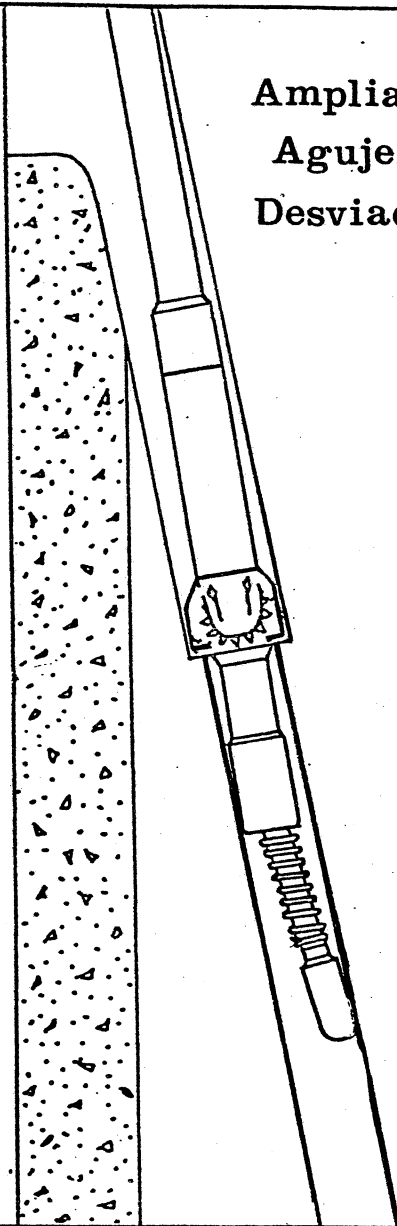
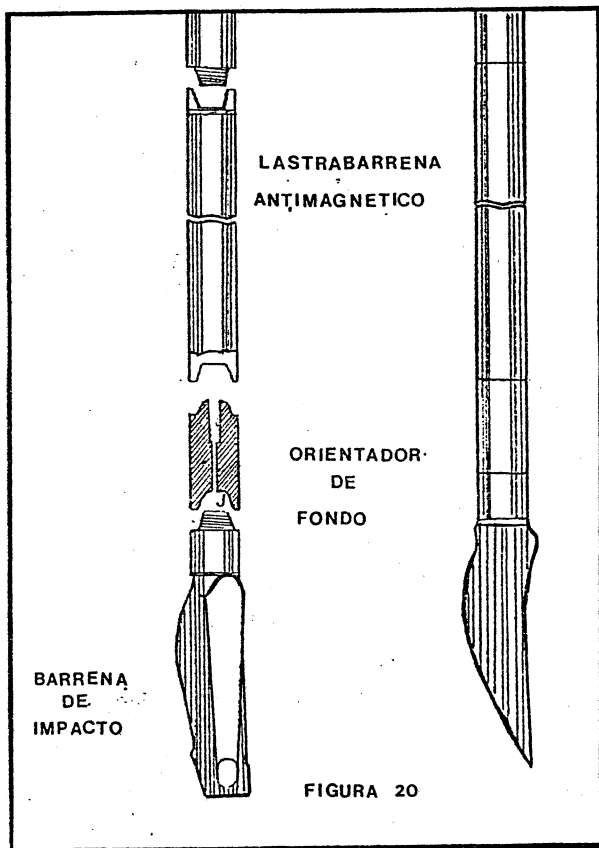


FIGURA 19



3.- Barrena de Toberas.- La barrena de toberas empleada en la perforación normal, puede emplearse para desviación de pozos en formaciones de lutitas suaves o semicompactas, intercaladas con arenaso consolidadas.

La barrena se acondiciona con dos toberas de 1/4", de -- preferencia y una de 3/4" o 7/8" con objeto de que al trabajar la bomba, se obtenga el máximo gasto a través de la tobera de mayor diámetro y formar, por el impacto del chorro de lodo contra la formación suave, una especie de bolsa lateral.

El procedimiento para la orientación y operación de la barrena de toberas, es el siguiente:

a).- En la superficie de la esa rotatoria se alinea la tobera de mayor diámetro con el orientador de fondo, con el objeto de que cuando la barrena esté a la profundidad donde se va a iniciar la desviación, se pueda orientar ahí mismo sin sacarla nuevamente, evitando ésto, perdidas de tiempo y retraso en las operaciones. Una vez estando la barrena en el fondo, se procede a tomar una o varias lecturas con el inclinómetro, hasta obtener la orientación deseada de la tobera de mayor diámetro.

b).- Una vez orientada la tobera de mayor diámetro, la mesa rotatoria se asegura con los candados.

c).- En seguida se procede a acelerar la bomba lentamente hasta obtener el máximo gasto deseado, la presión en la superficie puede alcanzar valores de 112 a 126 lbs./pg², para formaciones suaves. El aumento de circulación a través de la tobera de mayor diámetro, va formando una cavidad lateral causando el principio de la desviación y al mismo tiempo golpeando lentamente con la barrena al fondo, si es formación suave, y si es formación semidura, se le carga de 5 a 8 ton de peso sobre la barrena, causando con esta operación combinada, la desviación inicial deseada del agujero. En la flecha se van marcando de 2 a 3 metros al nivel de la mesa rotatoria, para ver cuanto se avanza en esta operación, con lo que a juicio del operador, es suficiente para continuar dando rotación, disminuyendo el gasto y avanzando la perforación desviada; siguiendo por intervalos el golpeteo y la circulación, tomando en cada tubo que se meta una lectura para conocer el avance de la operación de la desviación. (Fig. 21 (a y b))

4.- Estabilizadores.- En los trabajos de perforación direccional, uno de los objetivos que se persiguen es obtener máxima economía y eficiencia, y el uso de los estabilizadores ayuda en gran parte a esto.

Las funciones principales de los estabilizadores, son -- las siguientes:

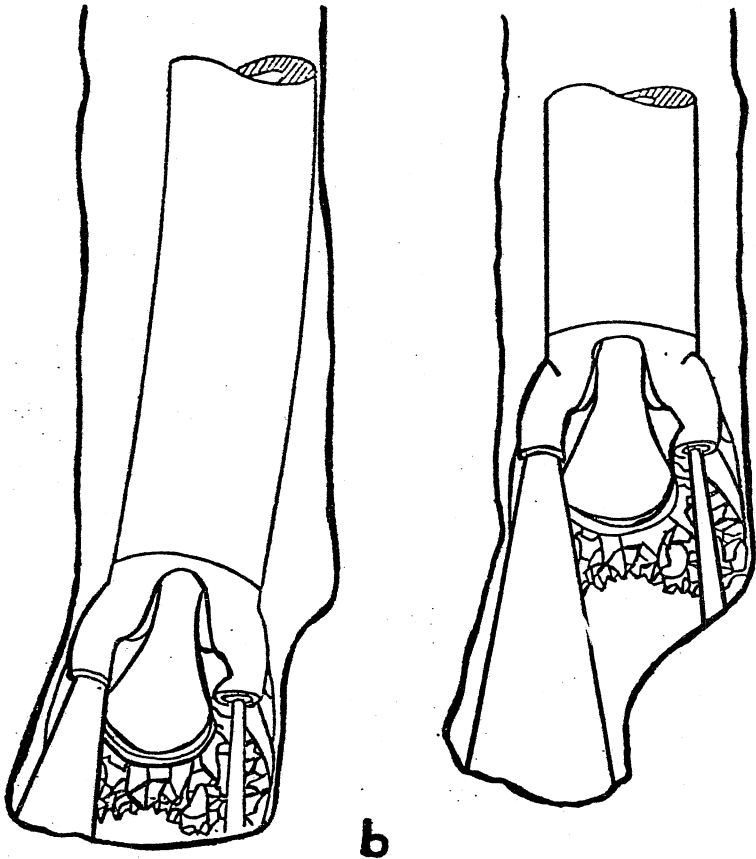


Figura 21

DESVIACION POR CHORRO

- a).- Conservar la orientación y el ángulo de -- inclinación.
- b).- Proporcionar rigidez y efecto péndular a la sarta, según su colocación.
- c).- Evitar en gran parte la fricción de la tubería.

El estabilizador es una pieza de acero de forma cilíndrica y de 0.40 a 0.60 metros aproximadamente de longitud y que lleva a la parte exterior tres aletas en forma espiral o vertical. Estas aletas son de una aleación de aluminio con revestimiento de tungsteno en su cara exterior, se pueden cambiar cuando se desgasten. Se fabrican con aletas soldadas y también con aletas integrales (Fig. 22).

Por lo general, la tubería de perforación en un pozo inclinado se flexiona, descansando en el lecho bajo y tendido en ese punto su máxima fricción, por lo que al intercalar adecuadamente los estabilizadores, estos ayudan en gran parte a evitar la fricción. También se recomienda usar tubería de juntas biseladas a 18°.

Al usar un estabilizador sobre el primer lastrarbarrenas, el punto de contacto estará arriba de la barrena y la única fuerza actuante sobre la barrena se debe al peso de la longitud de la sarta, comprendida entre la barrena y el punto de contacto; esta fuerza ayuda a la barrena a conservar la verticalidad actuando en forma pendular.

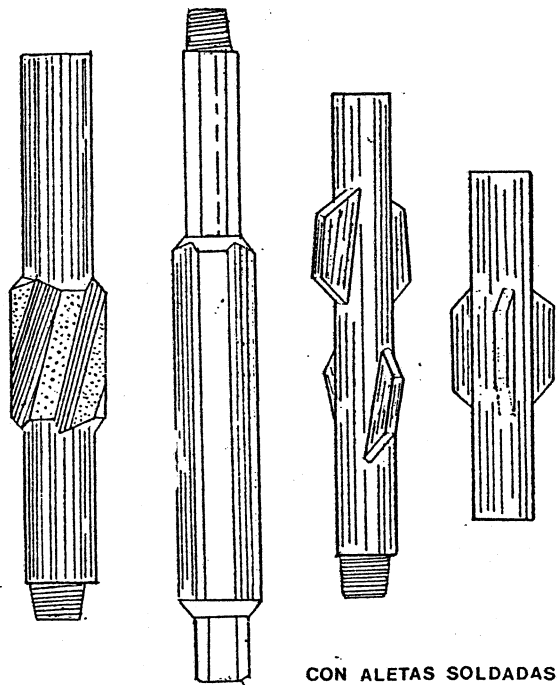
Quando el estabilizador se coloca inmediato a la barrena y se aplica peso sobre ésta, su efecto será desviar el agujero de la vertical, y colocando otro estabilizador a una distancia mayor de la barrena se aumentará continuante el ángulo de desviación y una vez obtenido el ángulo programado, se procederá a calcular un nuevo espaciamiento para conservarlo, así como la orientación. (Fig. 23)

El último estabilizador tiene también la función de calibración y limpieza del agujero perforado.

5.- Lastrarbarrenas no-magnéticas.- Estos lastrarbarrenas son usadas en forma especial durante la perforación orientada. Su diámetro y longitud varían según las necesidades y condiciones de trabajo. Estos son colocados en un lugar lo más cercano a la barrena o sobre un estabilizador portabarrenas.

Es de interés saber que cuando se emplea este tipo de -- lastrarbarrena de 9 m de longitud, es con el propósito de tener una sección no-magnética en la sarta de perforación. Y de obtener un rumbo magnético verdadero en el fondo del pozo. Si una sección en la sarta de perforación no-magnética y de sufi

Tipos de Estabilizadores

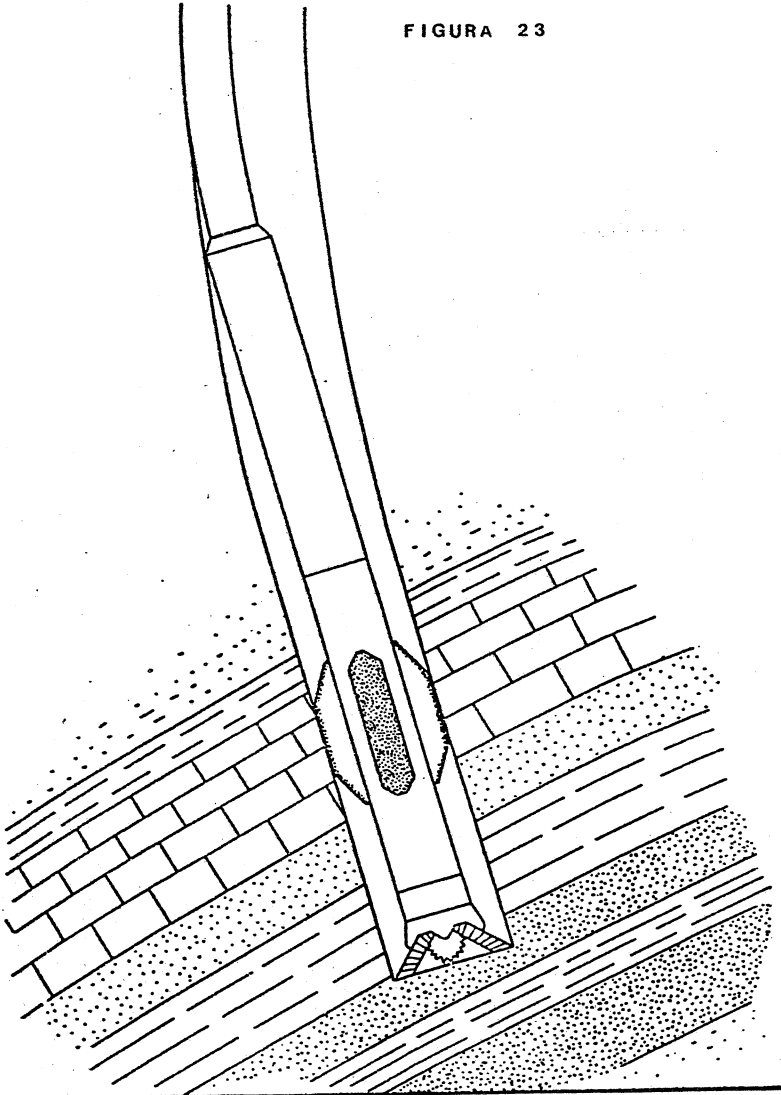


CON ALETAS INTEGRALES

CON ALETAS SOLDADAS

FIGURA 22

FIGURA 23



ciente longitud, variará el campo magnético de ella, tanto -- arriba como abajo de la misma.

6.- Turbo-perforador.- Es una herramienta que produce altas velocidades de rotación por medio de un fluido circulante (lodo de perforación), a través de un conjunto de pasos de turbina (juegos de estatores y rotores), que convierten la -- energía hidráulica de la bomba, en energía mecánica de rotación, la que es transmitida por medio de una flecha a la barrenadora, en forma independiente de la tubería de perforación.

Esta herramienta consta de dos secciones principalmente. La primera sección consta además de los pasos de turbinas, de baleros radiales, baleros axiales, flecha, funda, embrague de fricción, camisa ahulada, camisa de cromo y anillos de ajuste. La segunda sección consta de las mismas piezas, que se tienen en la primera sección excepto los baleros axiales, ya que al ajustarla con la primera sección, el anillo de ajuste intermedio y los baleros axiales de ésta, sirven para las dos secciones.

A continuación se citan las características de un turbo-perforador, de 9" de diámetro, para emplearse en pozos de 11" de diámetro y mayores.

Consta de dos secciones, la inferior de 7.40 metros y la superior de 7.23 metros, con un diámetro de 9" y con 100 y -- 150 etapas respectivamente en cada sección. Las paletas en el rotor y estator son el número de 30, colocadas en un ángulo de 60°;

Sus condiciones de trabajo son las siguientes:

GASTO Gal/min	POTENCIA H.P.	REVOLUCIONES R.P.M.	MOMENTO Kg.m.	CAIDA DE PRESION Kg/cm ²
475	1.15	415	198	41.5
550	182	485	270	56.5
635	472	555	372	74.0
710	385	622	445	93.0

Operación:

a).- Se une la flecha de turbo-perforador a la barrenadora, se prueba con la flecha (Kelly) aplicando un gasto a la bomba, se verifica la rotación de la barrenadora, el sello de las uniones y el juego de la flecha. En caso de que la barrenadora no gire, se procederá a revisar el armado del turbo-perforador.

Si todo ésta bien, se arma la combinación desviadora, -- (codo desviador), el orientador de fondo, el tubo antimagnético y la tubería de perforación (el orientador y el codo se alinean en la superficie).

b).- Unos dos metros arriba del fondo se comprueba que - trabaje el turbo-perforador (incluso puede perforarse un metro para mayor seguridad). Se verifica su orientación después de dar movimiento vertical a la tubería y se procede a perforar-colocando los candados a la mesa rotatoria.

NOTA:.- La regulación del peso sobre el turbo-perforador se hace según el tipo de formación y la velocidad de perforación. El aumentar peso sobre la barrena no implica mayor velocidad de perforación, sino al contrario, puede causar una disminución de ésta por la reducción de las revoluciones en la barrena.

5.7.- Motor de fondo (Dyna-drill). Es un motor accionado hidráulicamente y al igual que el turbo-perforador, convierte la energía hidráulica en energía mecánica de rotación y ésta es transmitida a la barrena por medio de una flecha unida a un vástago equipado con una junta universal en cada extremo, en uno de ellos absorbe la rotación excéntrica de rotor y en el otro transmite ésta rotación a la flecha, que tiene su eje estacionado. Esta flecha se conecta a un sustituto al cual se acopla la barrena y es la única parte externa del dyna drill que gira. El motor se encuentra ensamblado a lo largo de 9 m 50 centímetros recubierto en su parte interior con un hule que lleva otra cavidad elicoidal, a través de toda su longitud.- En esta cavidad se aloja una flecha de acero que actúa como rotor que se mueve excéntricamente en sus extremos, el movimiento es producto de la presión ejercida por el lodo bombeado entre la flecha y la cavidad espiral del hule.

Sobre el motor se encuentra una válvula de doble paso, - con el propósito de permitir que se llene la tubería de perforación cuando se mete y drenarla cuando se saca. Cuando se bombea se fuerza un pistón a su asiento, cerrando los orificios para llenar y drenar, permitiendo que el flujo circule a través de la herramienta. Al detener el bombeo el pistón es empujado hacia arriba por medio de un resorte dejando nuevamente abiertos los orificios. Sobre esta válvula es conectada la herramienta que se desee, bien puede ser para la perforación de un pozo vertical o inclinado.

Al conectar el dyna-drill a un codo desviador se perforan agujeros alejados de la vertical, produciéndose si se desea también cambios de dirección. El peso sobre la barrena es directamente proporcional a la presión de bombeo, por lo que el manómetro del lodo actúa como indicador de peso, ya que -- dependiendo de la presión se controla el peso sobre la barrena.

Operación:

a).- Se acopla la barrena al sustituto del motor de fondo, se prueba con la flecha (Kelly) y bomba; 14 kg/cm² son su ficientes para que trabaje; se verifica también la hermeticidad de las uniones.

Se conecta la combinación desviada con el orientador de fondo, después el tubo no-magnético y la tubería de perforación.

b).- Uno o dos metros arriba del fondo se verifica que trabaje, perforandose en caso de duda hasta un metro, previniendo que la tubería no gire a la izquierda, esta rigidez se logra accionando los candados de la mesa rotatoria.

Antes de iniciar el problema de como proyectar un pozo perforado con orientación controlada, es necesario entender la terminología empleada que servirá para desarrollar los cálculos básicos del pozo durante la perforación.(Fig.24)

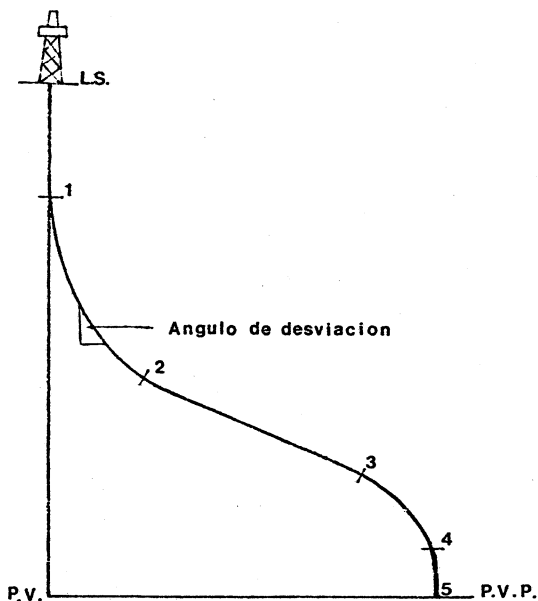


FIGURA 24

L.S.- Punto de referencia desde la mesa rotatoria ya sea en un equipo terrestre o sobre una plataforma marina (localización superficial).

1.- Profundidad a la cual se iniciará la desviación P.D.

2.- Profundidad a la cual se logra el ángulo máximo de inclinación.

- 3.- Profundidad a la cual se inicia la disminución del ángulo de inclinación hasta llegar a la vertical en un pozo de configuración tipo II, o profundidad total en el caso de un pozo de configuración tipo I ó III.
- 4.- Profundidad a la cual el agujero regresa a la vertical en un pozo de configuración tipo II.
- 5.- Profundidad total perforada. P.T.P.

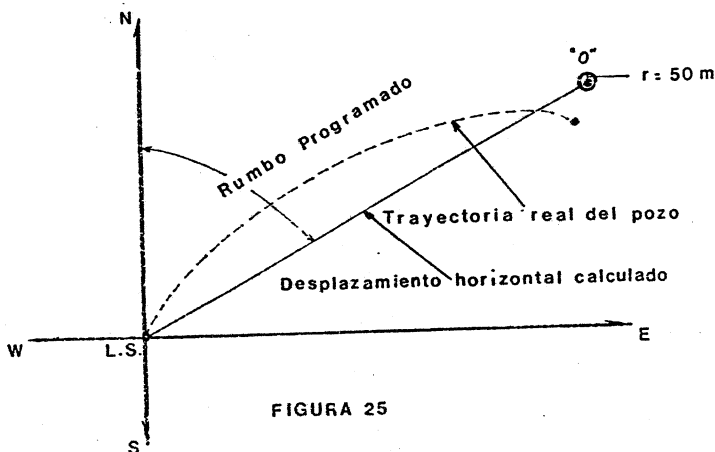


FIGURA 25

El desplazamiento horizontal o simplemente desplazamiento es la distancia horizontal entre dos puntos (Fig. 25) donde "O" es el fondo del pozo y L.S. localización superficial.

El ángulo de desviación es la desviación angular del pozo con respecto a la vertical.

El aumento o variación del ángulo de desviación es conocido como el incremento y se expresa en grados por longitud perforada ejemplo $2^{\circ}/30m$.

La profundidad vertical es la profundidad calculada a partir de la profundidad medida de perforación (PM) y el ángulo con respecto a la vertical. El objetivo es el área a donde debe llegar el pozo (generalmente se dicta una tolerancia de un círculo de 50m. de radio).

A partir del siguiente ejemplo ilustrativo se determinan los datos para planear un pozo perforado en forma desviada bajo control.

Datos:

Coordenadas del objetivo
coordenadas del punto de referencia, (localización superficial)
profundidad vertical.

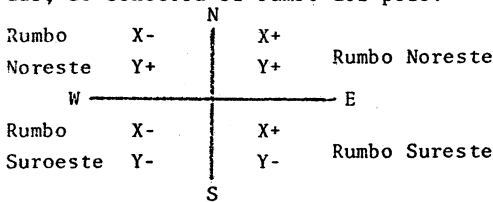
Para determinar el desplazamiento (D) se usa la ecuación de -
distancia entre dos puntos

$$D^2 = (X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2$$

donde (X_2, Y_2) serán las coordenadas del objetivo y (X_1, Y_1) -
las coordenadas de la localización superficial u origen.

Dependiendo de la suma algebraica de estos datos, se --
obtiene el rumbo o dirección, bajo el cual se perforará el po
zo.

Recordando que una brújula determina los cuatro cuadrantes y en función de los valores algebraicos de las coordenadas, se conocerá el rumbo del pozo.



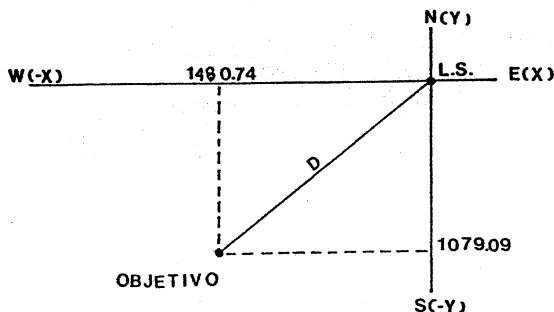
Ejemplo.-

coordenadas de la localización superficial
x=121 987.71 m. y = 286 999.01 m.

coordenadas del objetivo
x=120 506.97 m. y=285 919.92 m.

x= 120506.97 - 121987.71 = - 1480.74
y= 285919.92 - 286999.01 = -1079.09

Al graficar estos valores se tiene.



$$D = (-1480.74)^2 + (-1079.09)^2 = 1832.22m.$$

Dado que el resultado de la suma algebraica de las coordenadas (x) y (y) en ambos es negativo, el rumbo del pozo a perforar será al Suroeste (SW). La determinación del ángulo se puede efectuar por cualquier relación trigonométrica de ángulos por ejemplo.

$$\text{ángulo tangente } \frac{1480.74}{1079.09} = 53^{\circ} 55'$$

Resumiendo

desplazamiento horizontal = 1832.22m con un rumbo S53°55' W.

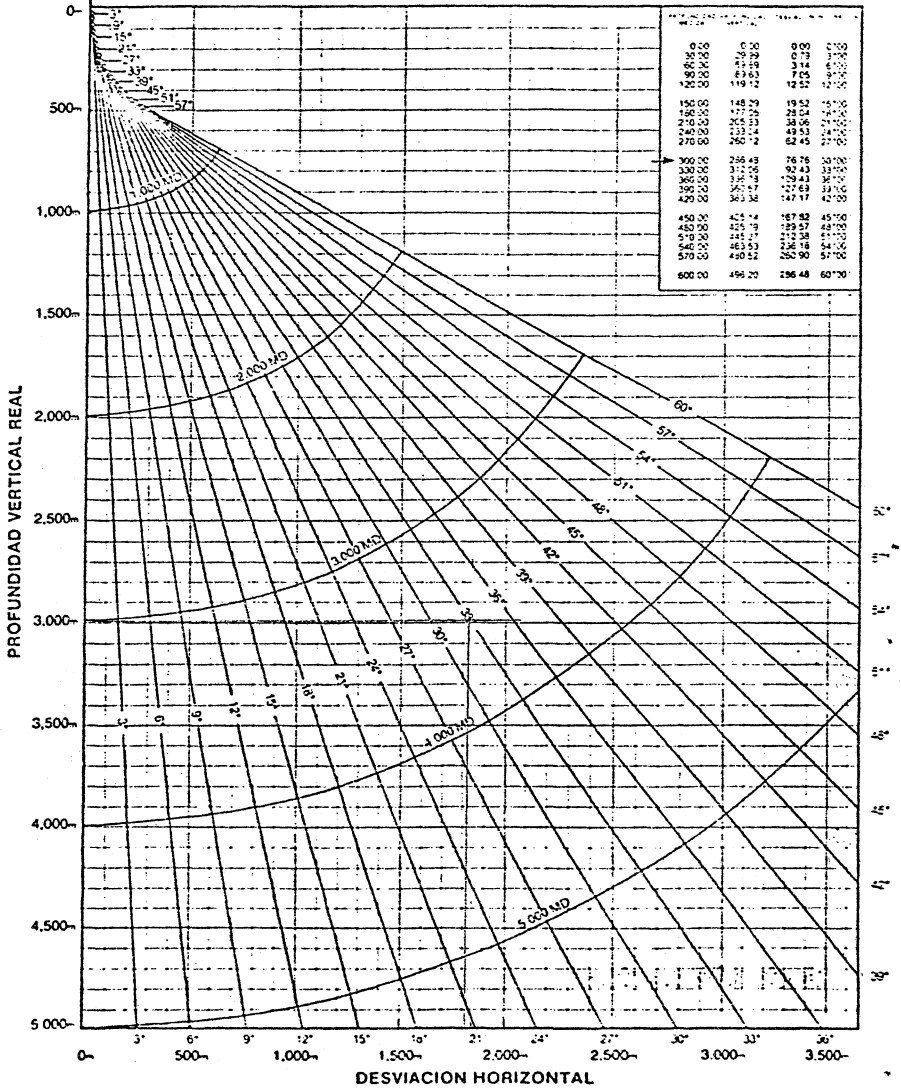
La profundidad vertical para este pozo es de 3445 m. bajo mesa rotatoria (m.b.m.r.). De un estudio conjunto con los departamentos que intervienen en el desarrollo del campo se decide iniciar la desviación a la profundidad de 450m.

- 1.- se determina la profundidad restante a partir de la profundidad de inicio de la desviación Prof. vertical = - Prof. vertical total - Prof. de inicio de la desviación
 $= 3445 - 450 = 2995m.$
- 2.- en la gráfica adjunta de incremento de 3°/30m. a partir de 0 m señalamos en el eje vertical la profundidad de 2995m y en el eje horizontal el desplazamiento de - - - 1832.22m. (punto A) se observa que este punto se encuentra entre las líneas de 30° y 33° siendo indispensable valorar el ángulo máximo de inclinación con que se deberá perforar. En la misma gráfica, en la parte superior derecha existen valores de profundidad perforada o medida y refiriendo el valor de 300 m que corresponde a 30° se tiene una proyección vertical de 286.80m. y una proyección horizontal o desviación de 76.76m.

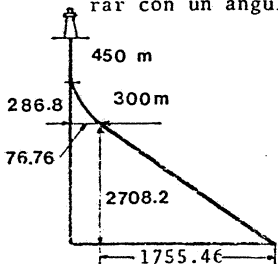
Con estos datos se sigue la siguiente secuela de cálculo que es básica para el valor del ángulo máximo de inclinación.



AUMENTO UNIFORME DE INCLINACION DE 3° 00'
POR CADA 30 METROS DE PERFORACION



- 1.- a partir de la prof. de 2995 - 286.80 (Proy. vert. correspondiente a 300m y 30°) = 2708.2 m y de la long. del desplazamiento 1832.22- 76.76 (Proy. horizontal correspondiente a 300 m y 30°) = 1755.46m., se tiene un triángulo, cuya hipotenusa deberá de ser la longitud a perforar con un ángulo constante.



donde

$$\text{ang. tan. } \frac{1755.46}{2708.20} = 32^{\circ} 57'$$

a contar de la prof. de 750m - - (450 + 300) se perforará con un ángulo constante (ángulo máximo de desviación) de 32° 57'

$$\begin{aligned} \text{longitud a perforar} &= (1755.46)^2 + (2708.2)^2 \\ &= 3227.38 \end{aligned}$$

y la profundidad total del pozo es:

$$450\text{m} + 300\text{m} + 3227.38 = 3977.38 \text{ m.}$$

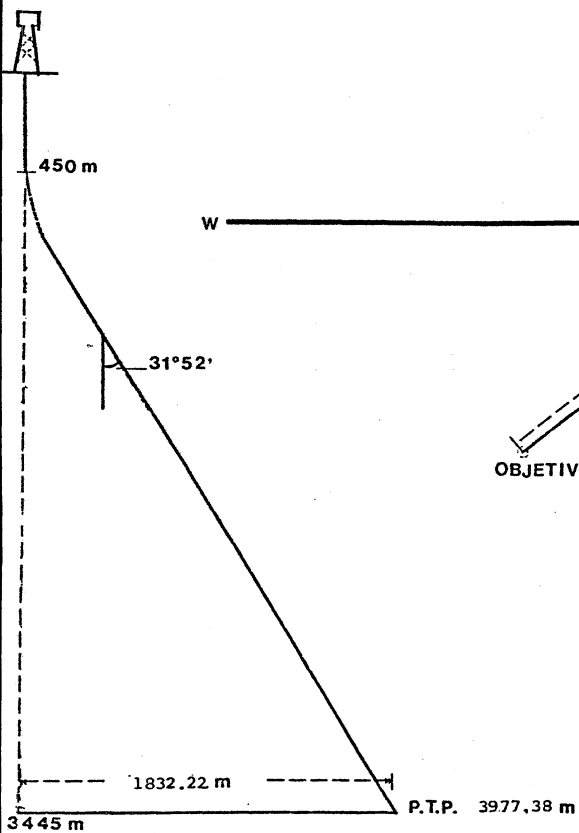
Resumen del proyecto de un pozo perforado con orientación controlada. (Fig. 26)

Se deberá iniciar desviación a 450m; de esta profundidad se incrementará el ángulo con respecto a la vertical en 3° -- cada 50m. hasta 750m. (profundidad perforada 300m y ángulo de 30°), de 750 m a 3977.38m se perforará con un ángulo constante de 32° 57'.

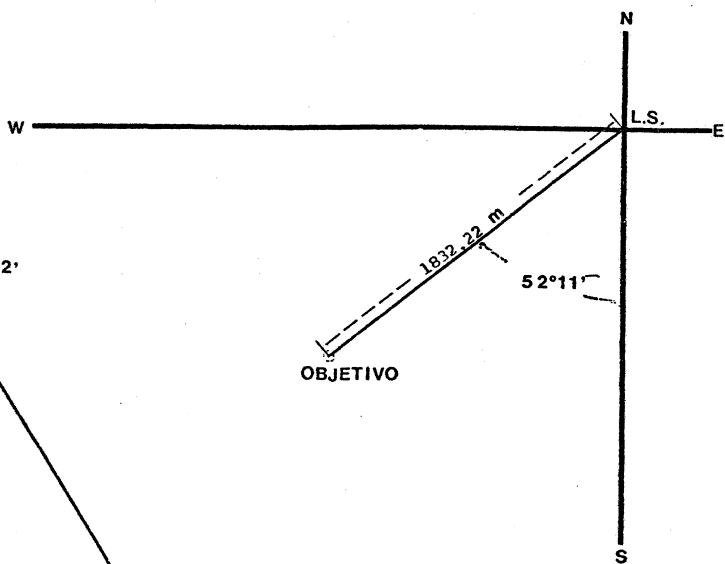
El pozo tendrá un desplazamiento de 1832.22 y un rumbo - de S 53°55' W. (ver plano adjunto, fuera de escala).

Métodos para calcular la trayectoria de pozos con orientación controlada.

Para efectuar los cálculos se requiere de datos obtenidos por la herramienta de registro, (la inclinación o ángulo con respecto a la vertical y el rumbo) y la profundidad perforada entre dos puntos seleccionados (profundidad medida). Con estos datos se procede al cálculo por cualquiera de los métodos que a continuación se mencionan. Los resultados obtenidos se van a continuar en la forma de registro adjunta



PROYECCION HORIZONTAL



PROYECCION VERTICAL

FIGURA 26

—Fuera de escala—

Método de ángulos promedio

Método de radio de curvatura

* Para el método de ángulos promedio es necesario afirmar que la distancia entre dos estaciones consecutivas definirán un segmento de recta.

La descripción de los cálculos para el método de ángulos promedio se realiza a partir del siguiente ejemplo y de acuerdo a los encabezados de la forma de control.

Datos obtenidos

Estación, profundidad, longitud de curso (dif. de profundidades entre 2 estaciones sucesivas), ángulo, ángulo promedio (promedio del ángulo obtenido en cada una de las estaciones), rumbo actual promedio (rumbo promedio obtenido entre las dos estaciones). Es conveniente mencionar que este rumbo ya ha sido corregido por la declinación magnética del lugar, carta isogónica de la República Mexicana Fig.13

estación 1.- corresponde al punto donde se inicia la desviación y que es requisito que el valor del ángulo y el rumbo sean "cero", cabe afirmar que el pozo debió de ser perforado bajo estricto control vertical. Por lo tanto para nuestro ejemplo 450m 0°00' c/rumbo 0°00'.

estación 2.- 481.0m 3°30' c/rumbos 539°00' W.

1er. paso.- promedio de ángulos y rumbos

$$(3^{\circ}30' + 0^{\circ}00') \div 2 = 1^{\circ}45'$$

Los rumbos ya han sido corregidos por la declinación magnética.

$$(39^{\circ} + 0^{\circ}00') \div 2 = 19^{\circ}30'$$

diferencia de rumbos = rumbo programado - rumbo ac. promedio
= 52°11' - 19°30' = 32°41'

2º paso.-
coseno 1°45' = 0.99953
seno 1°45' = 0.03054
coseno 19°30' = 0.94264
seno 19°30' = 0.33381
coseno 32°41' = 0.84170

- 3er. paso long. de curso = prof. est. 2- prof. est. 1
= 481 - 450 = 31m.
- 4o. paso Proy. Vertical = long. de curso x coseno del ángulo promedio
= 31m x 0.99953 = 30.99m
- 5° paso Proy. Horizontal = long. de curso x seno del ángulo promedio
= 31 x 0.03054 = 0.95 m.
- 6° paso Prof. vertical = suma de las proyecciones parciales verticales
= 450 + 30.99 = 480.99
- 7° paso. Dif. de desplazamiento. = Proy. horizontal x coseno de la diferencia de rumbo
= 0.95 x 0.84170 = 0.80m.
- 8° paso Desplazamiento = suma de las diferencias de desplazamiento.
= 0 + 0.80 = 0.80m.
- 9° paso coordenadas parciales eje NS.
proyección al sur = Proyección horizontal x coseno del rumbo promedio
= 0.95 x 0.94264
= 0.90 m
eje EW = Proyección horizontal x seno del rumbo promedio.
proyección al W = 0.95 x 0.33381 = 0.32 m.
- 10° paso coordenadas finales eje NS = suma algebraica de las coordenadas parciales
eje EW = suma algebraica de las coordenadas parciales

Efectuar ejercicio con los siguientes datos

estación 3.- 510 m - 6°00' - S45° W

estación 4.- 542 m - 9°45' - S38° W

estación 5.- 575 m - 12°30' - S50°W

una vez calculados llenar la forma del registro.

Método del Radio de Curvatura.

Este método es el primero que toma en cuenta la trayectoria real del pozo, al suponer un segmento de curva entre puntos consecutivos de registro. Este segmento se analiza en un plano vertical y otro horizontal, ajustando en caso de radio de curvatura cuya magnitud dependerá de la inclinación, rumbo y profundidad perforada.

Dedución de las fórmulas empleadas en este método de la siguiente figura se consideran diferenciales con respecto a los ejes vertical y de desplazamiento (horizontal) (Figura 27)

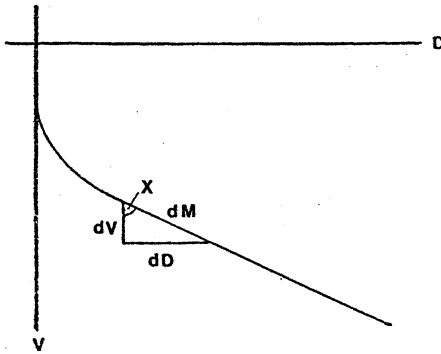


FIGURA 27

si $\emptyset = X \frac{180}{N}$ ----- (1)

\emptyset = ángulo de inclinación

X = ángulo de inclinación en radianes

$\emptyset = bM(x)$ ----- (2)

b = variación del ángulo por longitud perforada

igualando (1) y (2)

M(x) = trayectoria medida en el punto cuyo ángulo es x

$X = \frac{bM}{180}$ ----- (3)

$dV = dM \cos x$ ----- (4)

sustituyendo valores de (3) en (4) e integrando entre dos puntos.

$$\left[V \right]_{V1}^{V2} = \frac{180}{b \pi} \left[\text{Sen} \frac{b \pi}{180} M \right]_{M1}^{M2}$$

de (3) y (2) sustituyendo el valor para ángulos X_1 y X_2 y recordando que: El radio de curvatura en el plano es la reciproca de la variación del ángulo expresado en radianes por unidad de longitud del segmento medido, se tiene que

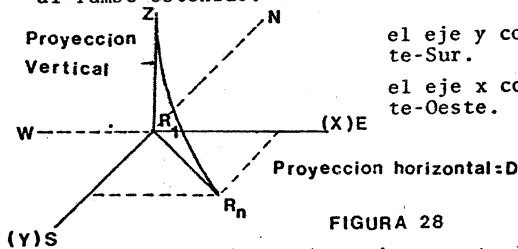
$$V_2 - V_1 = \text{Proyección vertical} = \frac{180 M}{\pi \emptyset} (\text{sen } x_2 - \text{sen } x_1)$$

\emptyset es la variación de la inclinación entre dos estaciones (1 y 2) sucesivas y X_2, X_1 son los valores de la inclinación en cada estación.

Si se realiza la misma deducción para el desplazamiento obtenemos

$$D_2 - D_1 = \text{proyección horizontal (D)} = \frac{180M}{\pi \emptyset} (\cos x_1 - \cos x_2)$$

Una vez obtenida la proyección horizontal del segmento, esta se calculará para proyectarla en el cuadrante correspondiente al rumbo obtenido.



efectuando el mismo razonamiento anterior se tiene

$$\text{proy. eje NS} = \frac{180D}{\pi \emptyset} (\text{sen } R_2 - \text{sen } R_1)$$

$$\text{proy. eje EW} = \frac{180D}{\pi \emptyset} (\cos R_1 - \cos R_2)$$

donde \emptyset = a la variación de los rumbos entre las dos estaciones (1 y 2) sucesivas y R_1 y R_2 los rumbos obtenidos por el registro entre dichas estaciones (1 y 2).

Trabajando con los datos del ejemplo de ángulos promedio y aplicando las formulas anteriores.

est 1	-	450 m	-	0°00'	-	Rumbo	0°00'
"	2	-	481 m	-	3°45'	-	" S39°W
"	3	-	510 m	-	6°00'	-	" S45°W
"	4	-	542 m	-	9°45'	-	" S38°W
"	5	-	575 m	-	12°30'	-	" S50°W

Estos resultados se vacian en la hoja de registro. Y tan to los obtenidos en el método anterior como en este método -- son graficados y comparados con el programa propuesto, de esta manera el encargado de la operación se mantendrá alerta a -- cualquier anomalía que ocurra, decidiendo lo adecuado para -- que la perforación se lleve sin contratiempo y con la menor - erogación.

Resultados para la estación 2.-

$$\text{Proy. Vert.} = \frac{180(481-450)}{\pi(3^{\circ}45' - 0^{\circ})} (\text{sen } 3^{\circ}45' - \text{sen } 0^{\circ}) = 30.98 \text{ m}$$

$$\text{Proy. Hz.} = \frac{180(481-450)}{\pi(3^{\circ}45' - 0^{\circ})} (\cos 0^{\circ} - \cos 3^{\circ}45') = 1.01 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial S} = \frac{180 \times 1.01}{\pi(39^{\circ} - 0^{\circ})} (\text{sen } 39^{\circ} - \text{sen } 0^{\circ}) = 0.94 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial W} = \frac{180 \times 1.01}{\pi(39^{\circ} - 0^{\circ})} (\cos 0^{\circ} - \cos 39^{\circ}) = 0.33 \text{ m}$$

Resultados para la estación 3.-

$$\text{Proy. Vert.} = \frac{180(510-481)}{\pi(6^{\circ}00' - 3^{\circ}45')} (\text{sen } 6^{\circ} - \text{sen } 3^{\circ}45') = 28.89 \text{ m}$$

$$\text{Proy. Hz.} = \frac{180(510-481)}{\pi(6^{\circ}00' - 3^{\circ}45')} (\cos 3^{\circ}45' - \cos 6^{\circ}00') = 2.46 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial S} = \frac{180 \times 2.46}{\pi(45^{\circ}00' - 39^{\circ}00')} (\text{sen } 45^{\circ} - \text{sen } 39^{\circ}) = 1.83 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial W} = \frac{180 \times 2.46}{\pi(45^{\circ}00' - 39^{\circ}00')} (\cos 39^{\circ} - \cos 45^{\circ}) = 1.64 \text{ m}$$

Resultados para la estación 4.-

$$\text{Proy. Vert.} = \frac{180(542-510)}{\pi(9^{\circ}45' - 6^{\circ}00')} (\text{sen } 9^{\circ}45' - \text{sen } 6^{\circ}00') = 31.69$$

$$\text{Proy. Hz.} = \frac{180(542-510)}{\pi(9^{\circ}45' - 6^{\circ}00')} (\cos 6^{\circ}00' - \cos 9^{\circ}45') = 4.38 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial S} = \frac{180 \times 4.38}{\pi(38^{\circ} - 45^{\circ})} (\text{sen } 38^{\circ} - \text{sen } 45^{\circ}) = 3.28$$

$$\text{Coord. Parcial W} = \frac{180 \times 4.38}{\pi(38^{\circ} - 45^{\circ})} (\text{sen } 45^{\circ} - \text{sen } 38^{\circ}) = 2.90$$

Resultados para la estación 5.-

$$\text{Proy. Vert.} = \frac{180(575-542)}{\pi(12^{\circ}30' - 9^{\circ}45')} (\text{sen } 12^{\circ}30' - \text{sen } 9^{\circ}45') = 32.38$$

$$\text{Proy. Hz.} = \frac{180(575-542)}{\pi(12^{\circ}30' - 9^{\circ}45')} (\cos 9^{\circ}45' - \cos 12^{\circ}30') = 6.37$$

$$\text{Coord. Parcial S} = \frac{180 \times 6.37}{\pi(50^{\circ} - 38^{\circ})} (\text{sen } 50^{\circ} - \text{sen } 38^{\circ}) = 4.57 \text{ m}$$

$$\text{Coord. Parcial W} = \frac{180 \times 6.37}{\pi(50^{\circ} - 38^{\circ})} (\cos 38^{\circ} - \cos 50^{\circ}) = 4.41 \text{ m}$$

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

1. Modelos matemáticos para el cálculo de la trayectoria en pozos Direcciones. Tesis Profesional
Mario A. Vega Ibarra
Fco. J. Luna Melo
2. Eastman Whipstock
Catalogo General 1980-1981
3. How to Plan a Directional Well
World Oil, July - 1959
4. Directional Survey Calculation
by J.T. Graig Jr. and B.V. Randall
Amoco Production Co. (Petroleum Engineer, March 1976)
5. Desarrollo matemático relacionado con los calculos de pozos direccionales empleando el método de radio de - curvatura propuesto por el Ing G.J. Wilson
Revista Ingenierfa Petrolera Diciembre 1969.
6. Perforación Direccional
Petroleos Mexicanos, Distrito Frontera Noreste
Antonio Dzib Echeverria
7. Directional Drilling
Serie de ocho artículos
World Oil Nov. 6/1978 - Feb. 12/1979
8. Perforación Direccional Controlada
Unidad III Lección 1 PETEX

