

L3
290



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SELECCION Y OPTIMIZACION DE BARRENAS
TRICONICAS DE PERFORACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

RICARDO HINOJOSA FLORES

ASESOR: DR. DANIEL GARCIA GAVITO



MEXICO, D. F.

1993

TESIS CCN
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION

I. BARRENAS TRICONICAS DE PERFORACION.

I.1 Barrenas tricónicas de perforación	(I.1)
I.1.1 Barrenas de dientes maquinados	(I.1)
I.1.2 Barrenas de insertos de carburo de tungsteno	(I.3)
I.2 Diseño de barrenas tricónicas.....	(I.5)
I.2.1 Diseño del cono y del cuerpo de la barrena	(I.6)
Geometría del cono	(I.9)
I.2.2 Diseño de los cojinetes	(I.9)
I.2.2.1 Chumaceras o cojinetes "journal"	(I.9)
Anillo de retención	(I.11)
I.2.2.2 Cojinetes de rodillos y balines.....	(I.11)
I.2.2.3 Sistema de lubricación.....	(I.13)
I.2.3 Diseño de dientes de carburo de tungsteno.....	(I.15)
I.2.3.1 Barrenas para formaciones suaves a medianas	(I.16)
I.2.3.2 Barrenas para formaciones duras	(I.16)
I.2.3.3 Barrenas para formaciones extremadamente duras	(I.18)
I.2.4 Diseño de dientes de acero	(I.18)
I.2.4.1 Barrenas para formaciones suaves	(I.19)
I.2.4.2 Barrenas para formaciones medianas a medianamente duras	(I.19)
I.2.4.3 Barrenas para formaciones duras	(I.19)
I.3 Evaluación del desgaste de las barrenas	(I.20)
I.3.1 Estructura de corte.....	(I.21)
I.3.2 Sistema de rodamiento	(I.23)
I.3.3 Calibre de la barrena.....	(I.25)
I.4 Clasificación de barrenas IADC.....	(I.27)

II. OPTIMIZACION DE BARRENAS DE PERFORACION.

II.1 Filosofía de la optimización	(II.1)
II.2 Optimización de la perforación.....	(II.2)
II.3 Optimización en la selección de barrenas de perforación	(II.8)
II.3.1 Registros de barrenas de pozos anteriores	(II.10)
Barrenas y días	(II.11)
Localización del pozo.....	(II.11)
Puntos de tubería de revestimiento	(II.12)

II.3.2 Registros sónicos.....	(II.12)
II.3.3 Energía específica.....	(II.13)
II.3.4 Ecuación de costo por pie.....	(II.15)
II.3.5 Modelos matemáticos.....	(II.22)
II.4 Métodos auxiliares en la optimización del programa de barrenas.....	(II.22)
II.4.1 Igualando el promedio de perforación del área.....	(II.23)
II.4.2 Conversión del tipo de barrena.....	(II.24)
II.4.3 Análisis de igual comportamiento.....	(II.25)
II.5 Terminación de la corrida de la barrena.....	(II.29)
II.5.1 Tiempo óptimo para sacar la barrena.....	(II.30)
III. MODELOS DE PERFORACION MAS COMUNES.	
III.1 Modelos de perforación.....	(III.1)
III.2 Modelo de Somerton.....	(III.2)
III.3 Modelo de Maurer.....	(III.3)
III.4 Modelo de Young.....	(III.7)
III.5 Modelo de Bourgoyne y Young.....	(III.16)
III.6 Modelo de Reza y Alcocer.....	(III.24)
III.7 Modelo de Winters y Warren.....	(III.26)
IV. MODELO DE GALLE Y GOODS.	
IV.1 Modelo de Galle y Woods.....	(IV.1)
IV.1.1 Ecuación de ritmo de penetración.....	(IV.2)
IV.1.2 Ecuación de ritmo de desgaste del diente.....	(IV.7)
IV.1.3 Ecuación de desgaste del balero.....	(IV.9)
IV.2 Determinación de los parámetros de perforación.....	(IV.12)
IV.2.1 Abrasividad de la formación.....	(IV.14)
IV.2.2 Perforabilidad de la formación.....	(IV.15)
IV.2.3 Constante de desgaste del balero.....	(IV.18)
IV.3 Método para determinar el costo mínimo de perforación.....	(IV.20)
IV.3.1 Interrelación entre el desgaste en el diente y el balero.....	(IV.21)
IV.3.2 Procedimiento de cálculo.....	(IV.22)

El diente limita la corrida de la barrena	(IV.22)
El balero limita la corrida de la barrena	(IV.23)

IV.4 Características del modelo	(IV.25)
---------------------------------------	-----------

V. SELECCION DE BARRENAS MEDIANTE REGISTROS GEOFISICOS.

V.1 Características de la formación	(V.1)
---	---------

V.2 Propiedades mecánicas de la formación	(V.2)
---	---------

V.2.1 Comportamiento Esfuerzo-Deformación	(V.3)
---	---------

V.2.2 Constantes elásticas	(V.7)
----------------------------------	---------

V.3 Esfuerzos presentes en una formación	(V.9)
--	---------

V.4 Resistencia a la compresión uniaxial	(V.13)
--	----------

Coates y Denoo	(V.13)
----------------------	----------

Warren y Winters.....	(V.14)
-----------------------	----------

Características del método.....	(V.15)
---------------------------------	----------

Smorodinov.....	(V.16)
-----------------	----------

V.5 Selección de barrenas con registros geofísicos.....	(V.17)
---	----------

V.5.1 Método de Mason	(V.18)
-----------------------------	----------

Guía de selección de barrenas tricónicas	(V.18)
--	----------

Ejemplo.....	(V.27)
--------------	----------

V.5.2 Método de Roca	(V.30)
----------------------------	----------

Correlación entre ritmo de penetración y resistencia de la roca	(V.30)
---	----------

Selección de barrenas utilizando el valor de la resistencia	(V.31)
---	----------

V.5.3 Método de Pinheiro y Linares	(V.34)
--	----------

VI. EJEMPLO DE CALCULO.

VI.1 Selección del tipo óptimo de barrena.....	(VI.2)
--	----------

VI.2 Optimización de las condiciones de operación.....	(VI.4)
--	----------

VI.2.1 Abrasividad de la formación	(VI.4)
--	----------

VI.2.2 Perforabilidad de la formación	(VI.5)
---	----------

VI.2.3 Constante de desgaste del balero	(VI.6)
---	----------

VI.3 Mínimo costo de perforación.....	(VI.7)
---------------------------------------	----------

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

APENDICE.

INTRODUCCION.

Hoy en día, perforar un pozo petrolero en el menor tiempo posible y a un costo mínimo es una meta que se persigue. El desarrollo de las barrenas de perforación representa un avance significativo en la tecnología de la perforación y constituye un punto clave para optimizar tanto el tiempo como el costo de perforación.

El objetivo principal de este trabajo es presentar una metodología para lograr una selección y optimización de barrenas tricónicas, no solo cualitativa sino cuantitativa de las condiciones de operación y tipo de barrena, empleando además de registros de barrenas, registros geofísicos de pozos vecinos que ya han sido perforados.

La selección ideal de barrenas para la perforación de un pozo en particular no es una tarea fácil de lograr; no obstante, la selección de la barrena adecuada se facilita si se cuenta con suficiente información que nos haga factible evaluar el rendimiento obtenido por las barrenas, el estado que presentaron al término de la corrida, las características de perforabilidad y analizar si se pueden obtener mejores resultados mediante cambios tanto en el tipo de barrena como en la práctica y parámetros de operación.

Aún después de haber aplicado correctamente los métodos de selección y optimización de barrenas, se tiene el riesgo de que la barrena seleccionada no sea la adecuada para la situación considerada, debido a que la perforación de pozos petroleros varía de una localización a otra y pueden presentarse situaciones no previstas durante la planeación de la perforación del pozo.

Así pues este trabajo presenta una alternativa más tanto de selección como de optimización de barrenas tricónicas de perforación, en base a una mayor cantidad de información sobre las características mecánicas de las formaciones atravesadas; esto es, a su perforabilidad, abrasividad y el desgaste que sufre la barrena.

En el primer capítulo se presenta una descripción en términos generales de las barrenas tricónicas de perforación, su clasificación, diseño y la evaluación del desgaste que sufren. Esto con el propósito de tener un mejor entendimiento sobre los métodos propuestos.

En el segundo capítulo se explican los diferentes métodos de optimización en la selección de barrenas de perforación, algunos métodos auxiliares obtenidos a partir de la práctica y experimentación así como un método para determinar la terminación de la corrida de la barrena, lo cual

constituye un punto esencial en la optimización del tiempo que la barrena debe estar perforando. En este capítulo se presenta además la filosofía de la optimización y de la optimización de la perforación a fin de ver la importancia que tiene este concepto en la selección de barrenas cuando se efectúa la planeación de la perforación de un pozo petrolero.

En el tercer capítulo se muestran algunos de los diferentes modelos matemáticos de perforación, que en base a una ecuación de ritmo de penetración y de desgaste en dientes y baleros, nos permitira conocer las condiciones óptimas de operación (peso sobre barrena y velocidad de rotación) a que debiera trabajar la barrena.

En el capítulo cuarto se explica en forma detallada el modelo matemático de perforación desarrollado por Galle y Woods, sus ecuaciones, determinación de los parámetros de perforación, características y el método para determinar el costo mínimo de perforación, del cual se hizo un programa de cómputo cuyo listado se muestra en el Apéndice B.

El quinto capítulo hace mención sobre la selección de barrenas tricónicas de perforación mediante registros geofísicos, con el empleo de dos métodos propuestos por diferentes autores, con base al cálculo de la resistencia a la compresión de la roca; esto es, al esfuerzo al que ésta se rompe.

Este capítulo también trata sobre las características, propiedades mecánicas y esfuerzos presentes en la formación. El método de selección propuesto en este trabajo (Roca-Mason), al igual que el anterior se integró en un programa de cómputo mostrado en el Apéndice C.

Por último, el sexto capítulo nos mostrará la aplicación en campo (Luna 33) de los métodos propuestos, tomando datos de un pozo real perforado y llevandonos paso a paso en cada uno de los cálculos hechos. El resumen de los resultados obtenidos con los programas se vació en las tablas al final de este capítulo (Apéndice A).

I

BARRENAS TRICÓNICAS DE PERFORACION

I.1 BARRENAS TRICÓNICAS DE PERFORACION.

Debido a su gran versatilidad, las barrenas tricónicas, perforan todo tipo de formaciones y puede ser alterada para desarrollar funciones especiales, tales como control direccional y nucleo.

Las barrenas actuales de tres conos han experimentado grandes innovaciones, desde los años 30's, tanto en el diseño como en la metalurgia y construcción. Algunos de estos cambios son:

- Reemplazo de conductos normales de flujo por toberas de chorro.
- Reemplazo de dientes de acero por insertos de carburo de tungsteno.
- Empleo de cojinetes lubricados y sellados.
- Empleo de chumaceras

En general, las barrenas tricónicas pueden clasificarse en dos tipos (Fig I.1):

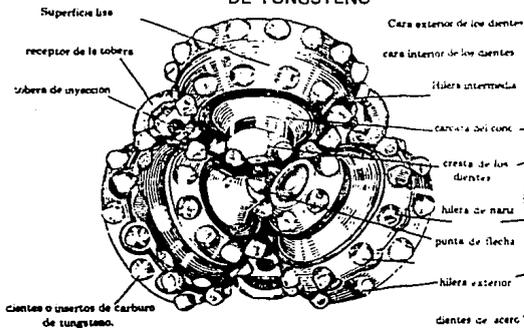
- i) Barrenas de dientes maquinados (dientes triangulares).
- ii) Barrenas de insertos de carburo de tungsteno.

I.1.1 BARRENAS DE DIENTES MAQUINADOS.

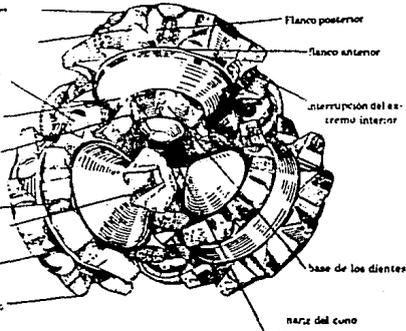
Las antiguas barrenas se construían con dos conos que simplemente rodaban en el fondo del agujero mientras giraba la barrena. Estos conos se encontraban perfectamente alineados el uno con el otro, en contraste con los conos de las barrenas modernas. El antiguo diseño todavía se emplea en la mayoría de las barrenas para formaciones duras; en la perforación de formaciones duras, la acción de la barrena consiste simplemente de triturar y astillar la roca con el fin de abrir el agujero.

Las barrenas tricónicas modernas que se emplean en las formaciones suaves tienen sus conos desalineados (Fig I.2). La alineación descentrada o

BARRENAS DE INSERTOS DE TUNGSTENO



BARRENAS DE DIENTES MAQUINADOS



ELEMENTOS DE LA BARRENA

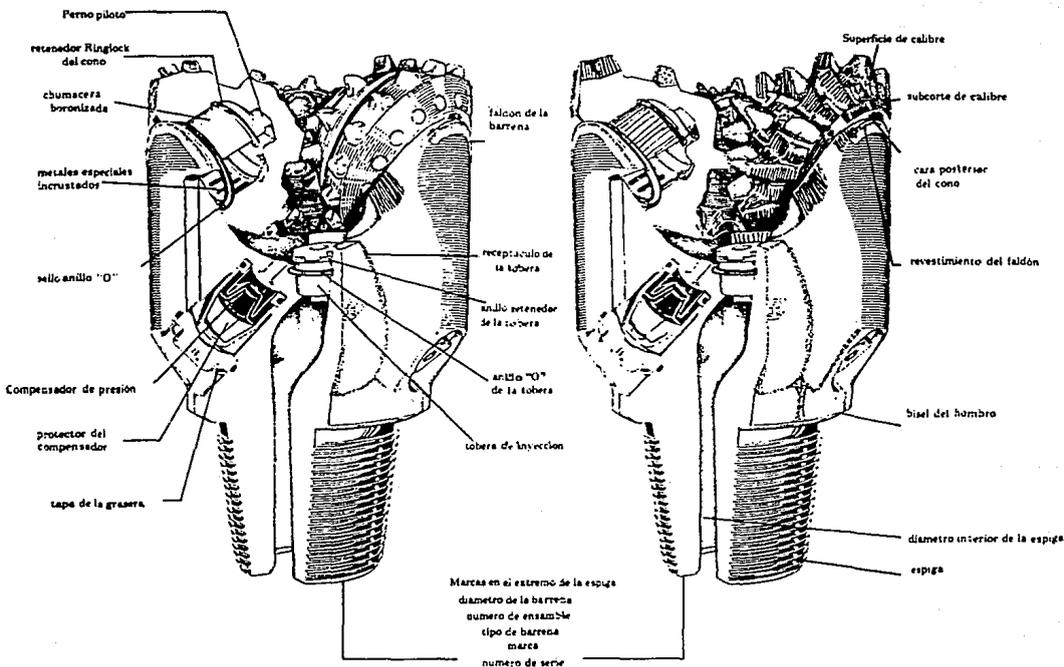


Fig I.1 BARRENAS TRICONICAS DE PERFORACION

excéntrica de los conos, causa que los dientes raspen y excaven a la formación mientras giran los conos en el fondo del agujero; la cantidad de material que se raspa depende de la magnitud de la desalineación del cono. El interengranaje de los dientes hace posible el empleo de dientes más largos, así como la autolimpieza. Las barrenas diseñadas para las formaciones más suaves, con el menor número de características abrasivas, tienen el mayor grado de excentricidad de los conos. Un menor grado de excentricidad se utiliza en las barrenas diseñadas para las formaciones más duras y abrasivas.

En general, los dientes que son ampliamente separados, largos y afilados se emplean para las formaciones suaves; los dientes con poca separación que son cortos y fuertes se emplean para las rocas duras.

Existen barrenas tricónicas con dientes de acero para formaciones suaves, medianas y duras, aunque estas están siendo rápidamente reemplazadas por barrenas con insertos de carburo de tungsteno.

También existen barrenas con dientes autoafilables, en este caso, solo la superficie de un lado del diente se recubre con carburo de tungsteno, de modo que cuando el lado sin recubrimiento se desgasta, el lado con la superficie dura mantiene su filo.

I.1.2 BARRENAS DE INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO.

En los últimos años, se han realizado muchos avances en el diseño de las barrenas con insertos de carburo de tungsteno y cojinetes sellados. En el pasado, estas barrenas tenían solamente pequeñas extensiones de carburo que eran propias para los ritmos de penetración que entonces se lograban. Las barrenas con insertos de carburo de tungsteno fueron usadas para reducir el tiempo requerido para hacer una corrida, ya que la misma barrena se podía utilizar para diferentes formaciones; sin embargo, las velocidades de rotación lentas reducían los ritmos de penetración mientras que las velocidades altas podían ocasionar roturas de los insertos.

Las barrenas modernas con insertos de carburo de tungsteno son capaces de alcanzar altas velocidades de rotación, hasta 180 rpm o más comparado con 45 rpm de las barrenas antiguas. Además, las barrenas de insertos de carburo de tungsteno modernas para alta velocidad de rotación, funcionan con un peso sobre la barrena mayor que lo que podían soportar las antiguas.

En el pasado, la mayoría de las fallas con los insertos de carburo surgían por roturas de las estructuras cortadoras, erosión de la capa exterior del cono y por daños a los cojinetes.

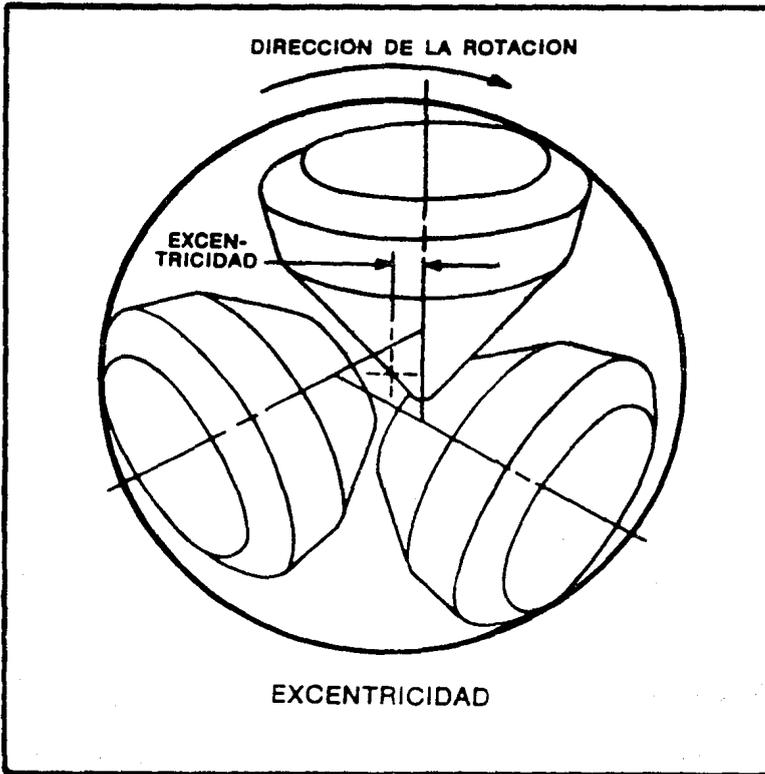


Fig I.2 EXCENTRICIDAD DE LOS CONOS DE LA BARRENA

En este tipo de barrenas, las toberas proporcionan mayor seguridad para los insertos mediante un lavado más rápido y eficiente de los recortes provenientes de la formación perforada.

Nuevos avances en la constitución de los materiales para fabricar conos han hecho a estos más resistentes al desgaste y, por consiguiente, se han disminuido las fallas en los conos. La mayor innovación en las barrenas con insertos de carburo de tungsteno ha sido el desarrollo de los cojinetes sellados, ya que las fallas en los cojinetes constituían uno de los problemas más comunes en este tipo de barrena.

Entre las ventajas de la barrena con insertos de carburo de tungsteno se incluyen la gran durabilidad, la buena penetración de los insertos en la formación (hasta 80% del inserto en las formaciones suaves) y la habilidad de perforar en diferentes tipos de formación con la misma barrena. Entre las desventajas se incluyen el hecho que la erosión alrededor de la base de los insertos puede resultar en la pérdida de éstos y la posibilidad de que la penetración de los insertos pueda hacer que la capa exterior de los conos haga contacto con la formación y transmita los golpes de carga de la sarta de perforación directamente sobre el cojinete.

Existen barrenas de insertos de carburo de tungsteno capaces de perforar una amplia gama de formaciones que varían entre las suaves y las semiduras con alta fuerza de compresión y las formaciones duras y abrasivas.

I.2 DISEÑO DE BARRENAS TRICÓNICAS.

El diseño de barrenas tricónicas de perforación busca entre otras cosas cojinetes de construcción fuerte, una capa exterior de alta resistencia para los conos y dientes fuertes y largos.

Cada una de las características de diseño tiene diferentes ventajas, pero debido al espacio limitado que se tiene en la construcción de la barrena, solo se puede cambiar el tamaño de un componente a expensas de reducir otro. Además, el diseñador debe balancear la dureza del acero contra la fragilidad de los materiales endurecedores cuando se están considerando los aspectos de durabilidad y efectividad de corte.

Como resultado, se han desarrollado varios tipos de barrenas, de modo que cada una da énfasis a una característica especial requerida para la perforación de un tipo especial de formación.

Debido a que las barrenas con cortadores rotatorios tienen tres componentes principales, el diseño debe efectuarse en base a estos:

- i) Los elementos de corte*
- ii) Los cojinetes*
- iii) El cuerpo de la barrena*

A continuación se hace un análisis del diseño del cono y del cuerpo de la barrena, de los cojinetes y por último de la estructura cortadora.

I.2.1 DISEÑO DEL CONO Y DEL CUERPO DE LA BARRENA.

Los elementos de corte son hileras de dientes en círculo que se extienden sobre cada cono y se encuentran engranadas con las hileras de los conos adyacentes (Fig I.1).

Los dientes pueden ser de acero y ser fabricados como parte del cono o ser insertos de carburo de tungsteno colocados a presión dentro de agujeros perforados sobre la superficie del cono. Los cortadores se montan en pernos del cojinete que son una parte integral del cuerpo de la barrena.

El tamaño o espesor de los diferentes componentes de la barrena dependen del tipo de formación a perforar. Por ejemplo, las barrenas para formaciones suaves que por lo general requieren un peso ligero, tienen cojinetes más pequeños, una carcasa de cono más delgada y secciones de la pata más delgadas que las que tienen las barrenas para formaciones duras. Esto da lugar para que tenga elementos de corte más largos y delgados. Por el contrario las barrenas para formaciones duras que tienen que funcionar bajo cargas muy pesadas, tienen elementos de corte reforzados, cojinetes más grandes y cuerpos más fuertes.

El cuerpo de la barrena consiste en:

- i) Una conexión roscada que une a la barrena con la sarta de perforación.**
- ii) Tres ejes del cojinete donde van montados los conos.**
- iii) Los depósitos que contienen el lubricante para los cojinetes.**
- iv) Los orificios a través de los cuales el fluido de perforación fluye para limpiar los recortes del fondo.**

Uno de los propósitos del cuerpo de la barrena es dirigir el fluido de perforación para lograr una limpieza más efectiva en el fondo del agujero, esto puede conseguirse mediante el empleo de toberas extendidas y de toberas extendidas de alto flujo (Fig I.3).

El uso efectivo de la energía hidráulica disponible en la barrena es una de las mejores formas para incrementar el ritmo de penetración.

Una consideración que puede tener gran influencia sobre la barrena y la limpieza del agujero, y el subsecuente ritmo de penetración, es la distancia entre las toberas y el fondo del agujero. Colocando las toberas lo más cerca posible del fondo, no siempre dara los mejores resultados. La alta intensidad del flujo puede conducir a un agrandamiento indeseable del agujero causado por erosión.

Cuando se perforan arenas no consolidadas, el ritmo de penetración puede mejorarse cuando la salida de la tobera se coloca de 3 a 5 veces el diámetro de la tobera del fondo del agujero.

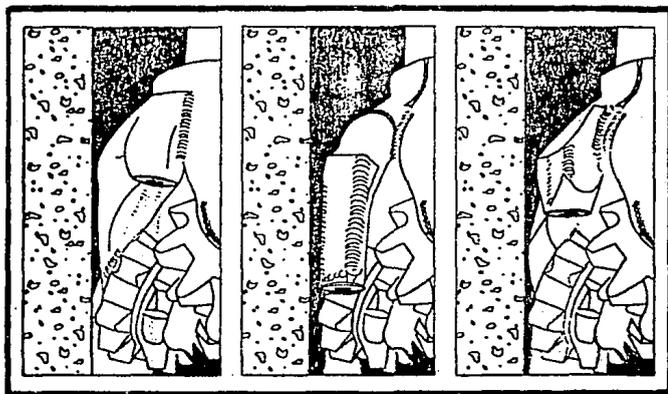
En la perforación de otras formaciones, particularmente lutita y arcillas, una distancia de 9 veces el diámetro de la tobera producira óptimos resultados.

El diseño característico de estas toberas, consiste en un tubo de acero soldado en la tobera convencional. Una tobera estándar de carburo de tungsteno, se instala al final del tubo. Esta configuración hace que la salida de la tobera, se encuentre tan cerca al fondo del agujero como uno lo desee. Aunque esto mejora la limpieza del agujero, en algunas ocasiones puede causar "embotamiento" de la barrena.

Una técnica para remediar esta situación consiste en emplear solo dos toberas extendidas y una tobera estándar. Otra forma es usar un jet central (center jet) en combinación con 2 o 3 toberas extendidas. Otro método es diseñar la tobera extendida a fin de lograr la mejor combinación de limpieza del cono y limpieza del agujero.

El diámetro del orificio para el mismo diámetro de barrena tienen que ser más pequeños que en las toberas convencionales. Su durabilidad es cuestionable, debido a que los tubos estrechos se rompen fácilmente.

Las toberas extendidas de alto flujo se desarrollaron para combatir problemas de durabilidad y otros asociados con el diseño de las toberas extendidas estándar (forma de pata de perro), esto elimina la posibilidad de rotura.



TOBERA
CONVENCIONAL

TOBERA
EXTENDIDA

TOBERA EXT.
DE ALTO FLUJO

Fig. 1.3 TIPOS DE TOBERAS.

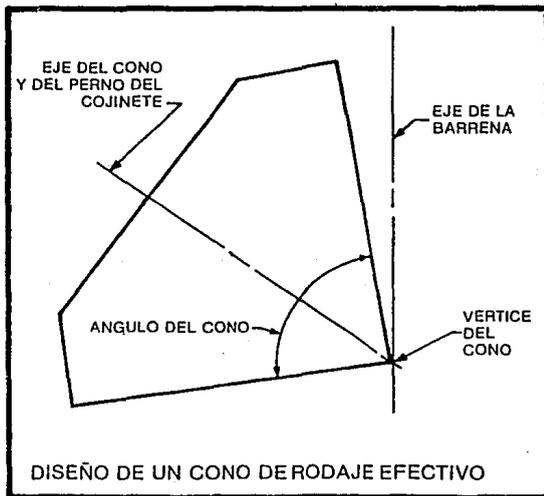


Fig. 1.4 GEOMETRIA DEL CONO.

Estas toberas extendidas para flujo alto son capaces de resistir gastos altos, ya que las toberas extendidas estándar son propensas a sufrir erosión. Como una guía, se pueden manejar arriba de 500 gpm por tubo para una barrena de 17 1/2" y cerca de 400 gpm por tubo para una barrena de 12 1/4". La Figura I.3 compara una tobera convencional, extendida y extendida de alto flujo.

GEOMETRIA DEL CONO.

Para entender cómo puede afectar la geometría del cono a la forma en que los dientes de la barrena cortan la formación, consideramos el moderno cono para formaciones suaves esquematizado en la Figura I.4. Tales conos están diseñados para conseguir una verdadera acción de rodamiento en la parte inferior. Tienen dos o más ángulos de cono básicos, ninguno de los cuales tiene su eje en el centro de rotación de la barrena. La superficie exterior del cono tiende a rotar alrededor de su eje teórico, y la superficie de la hilera interna alrededor de su propio eje. Ya que los conos tienen que rotar alrededor del eje central de la barrena, resbalan produciendo la acción de escariado y paleo que es la mejor manera de perforar las formaciones suaves. Una mayor acción en el fondo para aumentar la velocidad de penetración en formaciones suaves se obtiene con la excentricidad de los ejes de los conos en relación con el centro de rotación de la barrena, como se muestra en la Figura I.5. Las barrenas para formaciones duras poseen conos que tienen un movimiento casi de rodamiento y muy poca o ninguna excentricidad. Como resultado rompen la formación mediante compresión (Fig I.6).

I.2.2 DISEÑO DE LOS COJINETES.

En la actualidad el diseño de cojinetes utilizados en la mayor parte de las barrenas es tipo chumacera lubricada y sellada (cojinetes "Journal"). En menor grado también se usan los cojinetes de rodillos y balines de tres tipos diferentes.

I.2.2.1 CHUMACERAS O COJINETES "JOURNAL".

Los cojinetes "journal" o chumaceras fabricados para igualar la duración de las estructuras de corte de carburo de tungsteno, no contiene balines, sólo un fuerte perno ajustado en la superficie interior del cono, como se muestra en la Figura I.7. Esta chumacera se convierte en el elemento de carga más importante de los cojinetes.

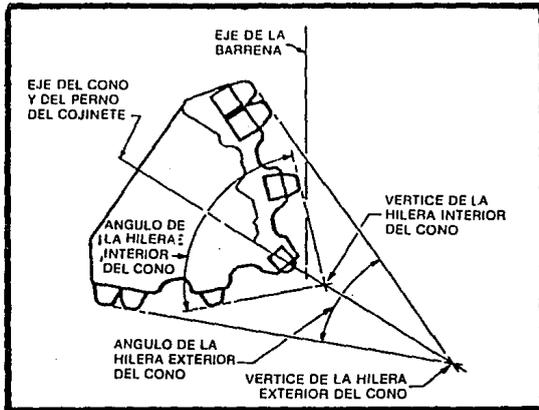


Fig. I.5 DISEÑO DEL CONO PARA FORMACIONES SUAVES.

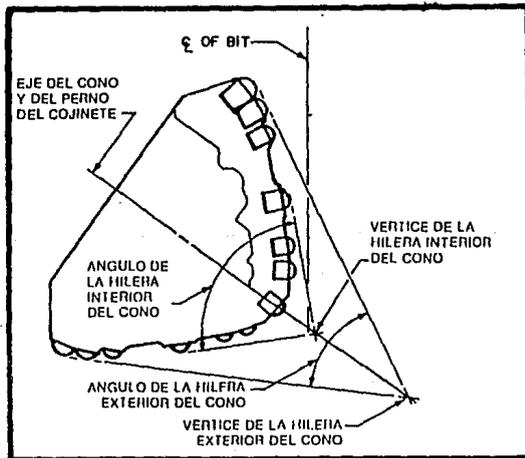


Fig. I.6 DISEÑO DEL CONO PARA FORMACIONES DURAS.

Los avances en el diseño de productos, en la metalurgia y en los procesos de fabricación han producido una concepción de chumacera perfectamente controlada; tanto la chumacera, el perno piloto y las superficies de empuje de la chumacera tienen una carga uniforme y soportan pesos mucho mayores, además que las velocidades de rotación pueden aumentarse sin disminuir la duración de la chumacera. La industria de la perforación ha recibido así una chumacera de calidad superior.

Las superficies en el área de presión donde el perno de la chumacera está en contacto con el cono, están carburizadas, incrustadas con metales especiales y han recibido tratamiento térmico para aumentar la resistencia al desgaste y proporcionar protección contra la fricción.

ANILLO DE RETENCION DEL CONO.

habiendo mejorado el rendimiento de la barrena mediante el reemplazo del cojinete de rodillos con la chumacera o cojinete journal, se ha dado otro paso más adelante al sustituir el cojinete de balines que normalmente se utilizaba en las barrenas de chumacera con un cojinete de deslizamiento. Este cojinete de deslizamiento tiene la forma de un anillo de cierre que detiene al cono sobre el perno del cojinete, y durante la operación resiste la carga de empuje hacia adentro. El sistema Ringlock representa un avance decisivo sobre los sistemas anteriores de retención del cono (Fig I.8). A continuación se presentan sus ventajas:

- 1) Elimina el astillamiento de los balines bajo una fuerte carga de empuje hacia adentro.**
- 2) El anillo retenedor es menor en corte transversal que los balines a los que reemplaza, permitiendo mayor flexibilidad en el diseño de la barrena. Las barrenas se pueden fabricar con carcasas más gruesas para el cono, pernos de cojinete de un diámetro mayor y/o superficies más grandes de chumaceras.**
- 3) El retenedor Ringlock mantiene al cono sobre el cojinete.**

I.2.2.2 COJINETES DE RODILLOS Y BALINES.

Actualmente se utilizan tres tipos de cojinetes de rodillos y balines en las barrenas, en particular cuando existen condiciones especiales o cuando se pueden esperar que duren tanto como la estructura de corte.

En cada tipo, la porción mayor de la carga radial del cortador la soporta

la pista de los rodillos. El cojinete de nariz estabiliza al cojinete y lleva una menor cantidad de la carga radial. La superficie de empuje, perpendicular al perno piloto y al botón de empuje, está diseñada para absorber el empuje hacia afuera. Los cojinetes de balines mantienen al cortador en su lugar y absorben el empuje hacia adentro.

Los cojinetes de rodillos y balines sellados, se introdujeron en las barrenas con dientes de insertos de carburo de tungsteno, pero ahora se utilizan principalmente en las barrenas con dientes de acero, y por lo general duran tanto como la estructura de corte. Algunas barrenas con dientes de insertos de carburo de tungsteno en los tamaños de 12 1/4" y mayores también poseen este tipo de cojinete.

Los componentes principales de un cojinete sellado consisten del cojinete, el depósito de grasa y el compensador de presión. El sello mantiene al lubricante adentro y al lodo de perforación fuera del cojinete, mientras que el depósito de grasa provee el lubricante que se le suministra al cojinete para reabastecer lo usado. El compensador de presión mantiene la misma presión adentro que afuera del cojinete. Para aprovechar al máximo la potencialidad del cojinete sellado es necesario que todos los componentes del sistema funcionen debidamente.

Como se produjeron fallas debido al astillamiento de los rodillos, se desarrollaron las chumaceras mencionadas anteriormente (cojinetes journal), donde el contacto de línea en la superficie de los rodillos fue reemplazado por el contacto del área íntegra de la chumacera.

Los cojinetes no sellados y no autolubricados de rodillos y balines se usan ahora principalmente en las barrenas de perforación superficial donde el tiempo de maniobra es más corto, y en situaciones en las cuales es deseable utilizar velocidades altas de rotación.

El número y tamaño de los rodillos que se escogen deben permitir que la pista de rodillos para el pasador del cojinete sea de eficiente tamaño para evitar fallas prematuras del pasador debido a la fatiga. Se debe emplear el número máximo de cojinetes de rodillos para reducir la carga unitaria y así posponer por más tiempo el desgaste de los rodillos. Además, el diámetro de cada rodillo debe ser suficientemente amplio para evitar que se rompan.

Es deseable tener el mayor número posible de cojinetes de bolas y que éstos sean del tamaño más grande posible; al mismo tiempo, el grosor de las bridas en cada lado de la pista de las bolas debe ser de suficiente tamaño para proveer resistencia contra las roturas.

La fabricación del cojinete delantero debe realizarse mediante el uso de

un pasador guía y un buje, debido a que no hay espacio disponible para otra fila de rodillos. Como el cojinete en este arreglo es del tipo fricción, es importante que las cargas unitarias se mantengan pequeñas mediante el uso de un diámetro grande de longitud adecuada. También resulta ventajoso emplear materiales especiales de alta resistencia en estas superficies rozantes. En aquellos diseños que incorporan insertos de punta, el empuje axial exterior es mayor para permitir que el cojinete absorba las cargas del empuje axial sin un desgaste excesivo.

En aplicaciones en las cuales se usan como medio de perforación aire, gas o vapor de petróleo, también se utilizan las barrenas de cojinetes no sellados de balines y rodillos. Sin embargo, estas barrenas están diseñadas de tal manera que una porción del fluido de perforación se desvíe a través de un cojinete para usarla como enfriamiento. Se utiliza un separador de agua para evitar que el agua entre en contacto con los cojinetes, cosa que reduce su duración.

En estas barrenas hay válvulas de reflujo para evitar que el agua subterránea suba a través de la barrena tapándola, cuando se interrumpe el flujo de aire.

I.2.2.3 SISTEMA DE LUBRICACION.

Las barrenas de cojinete sellado tienen un sistema de lubricación y compensación en cada pata de la barrena, que consiste en un depósito de grasa, un compensador de hule grueso con doble sello, un pasaje de conexión y un sello. El sistema compensador de presión equilibra la presión en el cojinete con la presión del fluido de perforación.

El sistema de lubricación que se emplea es de engrasado a vacío-presión para asegurar un sistema libre de fugas y un sistema de llenado al 100% de su capacidad; esto permite que no haya bolsas de aire en el cojinete después del engrasado.

Una tapa sólida gruesa y durable, y un sello sobre el depósito evitan que el fluido de perforación se escurra sobre el sistema de lubricación.

Un protector especial de contorno con una superficie metálica lisa, evita cualquier daño al compensador de presión en caso de verse forzado hacia adentro.

La ventilación se hace a través del fondo de la caja compensadora, como se muestra en la Fig. I.9. Esto elimina la posibilidad de que los productos del corte bloqueen la ventilación, como puede pasar con los

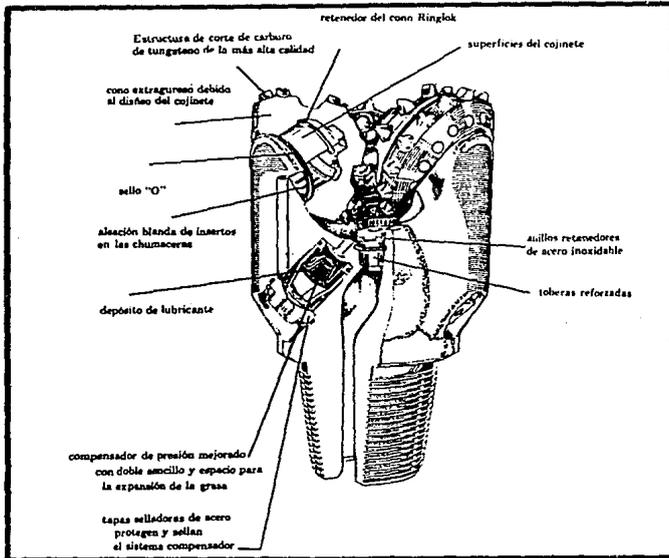


Fig. 17 COJINETE JOURNAL.

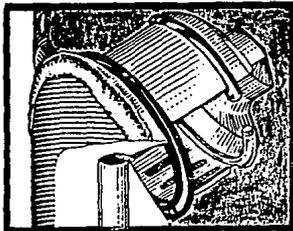


Fig. 18 SISTEMA RINGLOCK.

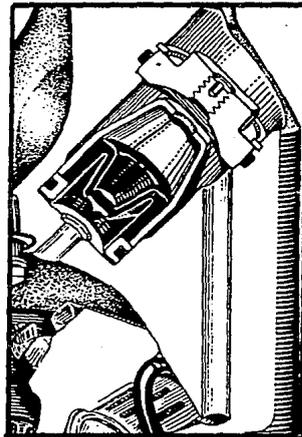


Fig. 19 SISTEMA DE LUBRICACION.

sistemas de ventilación superior, cuando se jalan hacia arriba para hacer una conexión, o cuando los productos del corte se depositan al realizar la perforación.

La mayoría de los lubricantes utilizados en los cojinetes son a base de petróleo o grafito. Algunos lubricantes emplean otros aditivos, hasta el jabón. Algunos cojinetes se autolubrican por medio del calor, utilizan el elemento indio que se funde en pequeñas cantidades para proveer la lubricación.

I.2.3 DISEÑO DE DIENTES DE CARBURO DE TUNGSTENO.

En un principio, la barrena de dientes de carburo de tungsteno fue diseñada para perforar formaciones extremadamente duras y abrasivas como pedernal y cuarcita, que han sido muy difíciles de perforar, debido a la corta duración de las barrenas con dientes de acero. Hoy en día, sin embargo, con la evolución de la metalurgia y de las formas de los dientes de carburo de tungsteno, hay barrenas para perforar casi todo tipo de formación a un costo menor.

Los insertos cilíndricos de carburo de tungsteno con diferentes puntas se colocan a presión en agujeros perforados con toda precisión en conos de acero de aleación dura para formar los dientes. Esta combinación da como resultado una estructura de corte con gran resistencia al desgaste abrasivo y a la carga de compresión.

La forma ovoide es la más durable y esta diseñada para la acción de cincelamiento y trituración que se requiere para perforar formaciones muy duras.

Los insertos de ojiva tienen una proyección ligeramente mayor para lograr una perforación más rápida en formaciones un poco más suaves, a la vez que mantiene la durabilidad de la forma ovoide.

La forma cónica también es fuerte y es ideal para la acción perforadora de cincelar y triturar. Tiene una proyección más grande que la ovoide y ojival y se utiliza con alguna acción excavadora en formaciones medianamente duras.

Las formas de cincel, con cresta de cuña se utilizan para formaciones más suaves y medianas, para obtener mayor penetración utilizando una acción excavadora y de paleo. Se seleccionan formas de cincel específicas según la formación y las propiedades geométricas de la barrena.

La forma única de cincel-pala ha demostrado combinar mayor duración con una alta velocidad de penetración. La forma de pala se enfrenta a la formación más directamente en el momento de la perforación, después levanta mecánicamente los productos del corte para tener una mejor penetración en las formaciones más suaves (Fig I.10).

La nueva forma con cresta de pala descentrada, localizada hacia adelante del eje central permite al cortador absorber mayor carga a la vez que mantiene las ventajas de penetración de la forma de pala.

I.2.3.1 BARRENAS PARA FORMACIONES SUAVES A MEDIANAS.

Los insertos tienen la forma de un cincel agudo y una proyección lo más larga posible, para permitir el máximo de penetración en la formación removiendo partículas grandes.

Desde que las barrenas de este tipo se emplean soportando pesos moderados, lo que reduce el impacto sobre los conos y los cojinetes, se usan dientes más largos y espaciados, reduciendo el espesor del cono y en parte la del cojinete.

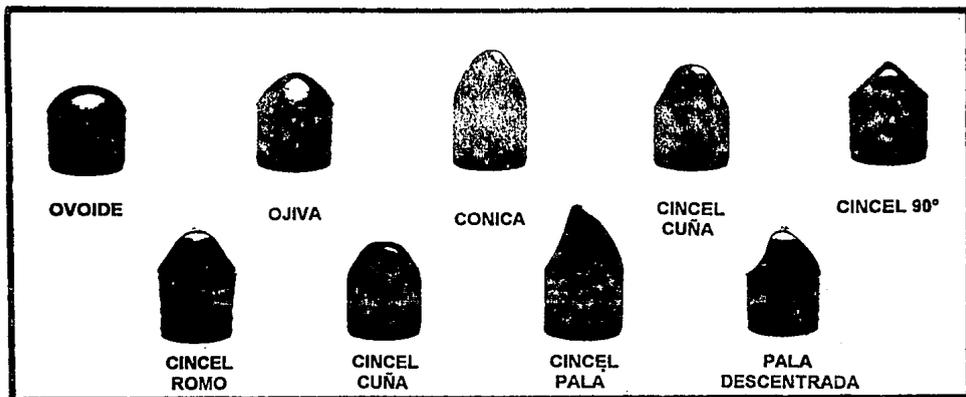
A fin de obtener la acción de escariado, los conos están diseñados con una excentricidad de sus ejes en el sentido de la rotación y con un entrelazado (interengranaje) más profundo con los conos adyacentes.

Dado que muy frecuentemente se encuentra arena en formaciones suaves, la resistencia de los insertos al desgaste por abrasión provee una estructura cortadora ideal para estos casos. La cubierta de la carcasa del cono se endurece para retardar el desgaste por abrasión. Una cantidad máxima de insertos chatos se ubican o colocan en la superficie del calibre para retardar el desgaste.

I.2.3.2 BARRENAS PARA FORMACIONES DURAS.

En formaciones duras, cualquier acción de escariado gastara los dientes de las barrenas severamente. En este tipo de formación, la perforación se obtiene aplicando peso hasta exceder la resistencia a la compresión de la roca, esta acción se repite por cada uno de los insertos al pasar a través del fondo del pozo.

Al diseñar barrenas para formaciones duras, la geometría se ajusta para minimizar la acción de escariado y proveer un cortador que se aproxime al



FORMAS DE LOS DIENTES PARA DIFERENTES FORMACIONES		
FORMA	ACCION DE CORTE	FORMACION
OVOIDE	ASTILLADO-TRITURADO	MUY DURAS
OJIVA	ASTILLADO-TRITURADO	DURAS A MUY DURAS
CONICA	ASTILLADO-TRITURADO PALEO-EXCAVADO	MEDIANAMENTE DURAS A DURAS
CINCEL	PALEO-EXCAVADO	MEDIANAS A BLANDAS
CINCEL-PALA	PALEO-EXCAVADO LEVANTADO	MEDIANAS A BLANDAS

Fig. I.10 FORMAS DE LOS DIFERENTES DIENTES DE INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO

verdadero rodaje. La proyección de los insertos sobre el cono es corta. El espacio adicional ganado se aprovecha para aumentar la resistencia del cono a fin de aumentar la resistencia del cojinete y así resistir las mayores cargas necesarias para romper la roca de la formación.

I.2.3.3 BARRENAS PARA FORMACIONES EXTREMADAMENTE DURAS.

Los insertos de la estructura de corte de la barrena, diseñadas para perforar estas formaciones tienen extremos romos, poco espaciados en las hileras interiores del cono y bien reforzados, mientras que en la hilera exterior ellos son semiesféricos. Las hileras de los insertos están preparadas para cubrir al máximo el fondo del pozo. Las barrenas para formaciones extremadamente duras están diseñadas sin excentricidad, con un mínimo de proyección de los insertos y un máximo entrelazado entre ellos, de manera que los cortadores se aproximen mucho a un verdadero rodaje en el fondo, obteniéndose así un astillado y resquebrajado máximo. El espesor del cono es mayor para hacerlo más resistente, de manera que se pueda aplicar un peso suficiente sobre la barrena para superar la resistencia a la compresión de las formaciones extremadamente duras.

I.2.4 DISEÑO DE DIENTES DE ACERO.

Las barrenas con dientes de acero se utilizan en formaciones superficiales suaves, donde se necesita una alta velocidad de rotación, y para perforar áreas donde el espesor de la formación hace que las barrenas con dientes de carhuo de tungsteno no sean económicas.

Todos los conos con dientes de acero tienen un material de revestimiento de carburo de tungsteno, aplicado a la superficie del calibre y a los dientes, como lo dicta el uso de un diseño de conos específicos. El revestimiento de los dientes aumenta la resistencia al desgaste pero reduce la resistencia a la fractura y al astillado. Por esta razón, los conos con dientes de acero para formaciones duras por lo general tienen sólo revestimiento del calibre, mientras que los conos con dientes de acero para formaciones suaves casi siempre tienen revestimiento en las superficies de los dientes y en la superficie del calibre.

I.2.4.1 BARRENAS PARA FORMACIONES SUAVES.

Las barrenas para perforar formaciones suaves están diseñadas con dientes largos espaciados para permitir la máxima penetración en la formación y remover recortes grandes que se generan. Las barrenas de este tipo se

emplean con pesos moderados lo que reduce en parte, las cargas de choque en los conos y en los cojinetes, reduciendo así el espesor del cono y el diámetro del cojinete.

Otro aspecto importante del diseño es la interrupción de dientes en la hilera exterior para cortar la formación en la pared del pozo. Esta interrupción genera una huella de dientes en el fondo que tiene la mitad del espacio entre dientes. Con el objeto de obtener el mejor efecto de escariado y acción de paleo en el fondo, los conos están diseñados con sus ejes muy excéntricos en la dirección de la rotación de la barrena y con el máximo de entrelazado de los dientes.

Debido a que frecuentemente se encuentran arenas en las formaciones suaves, los dientes están revestidos con una cantidad apreciable de carburo de tungsteno para resistir el desgaste por abrasión.

1.2.4.2 BARRENAS PARA FORMACIONES MEDIANAS A MEDIANAMENTE DURAS.

La geometría de estas barrenas es diferente a fin de aumentar la acción de astillado y resquebrajado y reducir la acción de escariado y paleo comparado con las barrenas para formaciones suaves.

Las barrenas para formaciones medianas y medianamente duras están diseñadas con dientes menos espaciados debido a que la barrena no puede remover pedazos grandes de formaciones duras. Los dientes tienen ángulos un poco más grandes para resistir las cargas necesarias como para superar la resistencia a la compresión de la roca y producir recortes.

En las barrenas para formaciones medianas y medianamente duras como la dolomía y los cálcareos duros, la ventilación o interrupción de los dientes de la hilera exterior ya no es necesaria debido a que producen recortes más pequeños que aquellos producidos en las formaciones suaves de mediana dureza.

Eliminando las interrupciones, se tiene mayor superficie de calibre para revestimiento de metal duro, obteniéndose así una mayor resistencia al desgaste.

1.2.4.3 BARRENAS PARA FORMACIONES DURAS.

Las formaciones duras tienen una resistencia a la compresión alta y por lo general son muy abrasivas.

Las barrenas diseñadas para perforar estas formaciones tienen dientes fuertes, no muy espaciados y carcazas de cono gruesas para soportar cargas de perforación muy pesadas.

Los conos se diseñan sin excentricidad y con una acción de rodamiento casi verdadera para minimizar el desgaste abrasivo de los dientes del cono.

La hilera exterior de cada cono es la hilera conductora, esto es que esta hilera genera una huella en el fondo en forma de engranaje. Es esencial que la cantidad de dientes que forman la hilera exterior de cada cono no siga exactamente la huella del cono precedente, ya que esto pararía o reduciría la penetración.

I.3 EVALUACION DEL DESGASTE DE LAS BARRENAS.

Dado que la selección de la barrena se realiza en gran parte por medio de ensayo y error, la importancia de una cuidadosa clasificación y evaluación subsecuente del grado y tipo de desgaste de una barrena usada adquiere gran relevancia; pues en base a los datos cuantificados de esta evaluación y a los registros de operación de las barrenas que perforaron exitosamente, se definen las opciones para decidir el tipo de la siguiente barrena que será bajada al pozo y si la práctica de operación debe ser modificada.

La evaluación del desgaste persigue principalmente los siguientes objetivos:

- i) **Mejorar la selección del tipo de barrena.**
- ii) **Identificar aquellas prácticas operativas (Peso sobre barrena, Velocidad de rotación, hidráulica, estabilización, etc.), que puedan alterarse para mejorar el rendimiento de la perforación.**
- iii) **Obtener la máxima utilización de las barrenas mediante la aplicación de procedimientos óptimos para dar por concluida su vida útil.**

Los métodos para codificar los desgastes pueden ser tan sofisticados como se deseen, pero es prudente tener en cuenta que el objetivo de ellos es proporcionar la información suficiente en forma clara y sencilla. Para esto se sugiere el código adoptado por la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC), que evalúa el grado de desgaste de las barrenas en

relación al diente, cojinete y diámetro.

En términos generales la evaluación del desgaste de las barrenas puede dividirse en dos aspectos:

- A) La determinación del grado del material desgastado.**
- B) El estudio de la naturaleza física del desgaste, a fin de determinar el factor o factores responsables del mismo, lo cual es una tarea difícil y depende en gran medida de la experiencia.**

A continuación se describe el código de evaluación de las barrenas usadas, de acuerdo con la IADC, con la aclaración de que puede ser modificado de acuerdo con las necesidades particulares de cada área, sin que pierda con ello la sencillez de su interpretación.

I.3.1 ESTRUCTURA DE CORTE (DIENTES).

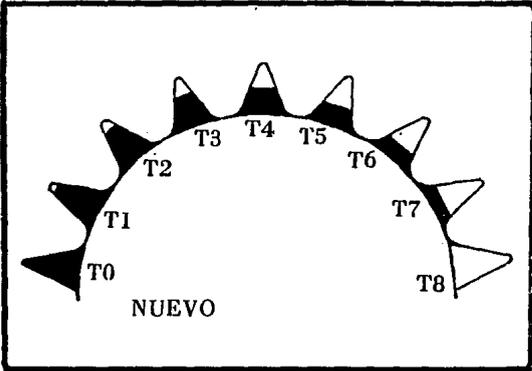
El desgaste de la estructura de corte se evalúa en octavos tomando como base la altura original del diente, anteponiendo la letra T al número que indica el desgaste sufrido. Por ejemplo, si la mitad de la altura original del diente se ha desgastado, la barrena será graduada como T-4, es decir, los dientes se han desgastado 4 octavos o perdido la mitad de su altura original.

Desafortunadamente algunas veces es difícil caracterizar el desgaste de los dientes con un solo número, pues algunos pueden estar más desgastados que otros o pueden presentarse con roturas. Por lo que una barrena desgastada se evalúa en la peor hilera de dientes y se usa un código de símbolos para completar la graduación de la estructura cortadora.

La mejor manera de obtener el desgaste del diente se efectúa midiendo la altura del diente antes y después de la corrida de la barrena. Sin embargo, una estimación visual rápida de la condición de los dientes puede realizarse usando la guía que se muestra en la Figura I.11.

La evaluación del desgaste de los cortadores de las barrenas de insertos de carburo de tungsteno debe realizarse en forma diferente a las de dientes maquinados, debido a que la estructura cortadora de las barrenas de insertos debe considerarse como un todo, es decir, la evaluación en octavos dependerá del número de insertos perdidos o quebrados, como lo ilustra la Figura I.12.

ESCALA DE EVALUACION DEL DESGASTE EN LOS DIENTES



- T0 - DIENTE NUEVO
- T1 - 1/8 GASTADO
- T2 - 1/4 GASTADO
- T3 - 3/8 GASTADO
- T4 - 1/2 GASTADO
- T5 - 5/8 GASTADO
- T6 - 3/4 GASTADO
- T7 - 7/8 GASTADO
- T8 - TOTALMENTE GASTADO

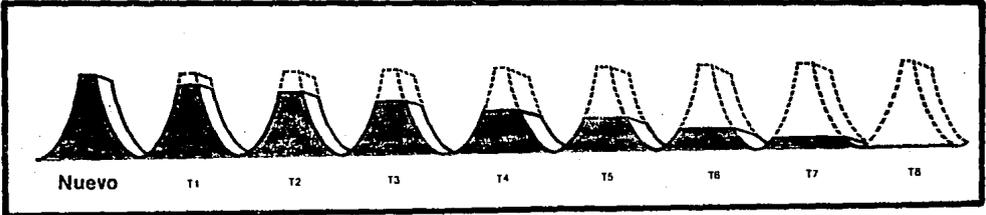


Fig I.11 EVALUACION DEL DESGASTE EN BARRENAS DE DIENTES MAQUINADOS

La estructura cortadora puede haber desaparecido por roturas, pérdidas o desgaste. Para conseguir una evaluación más completa debe emplearse el siguiente código:

BT - *Insertos rotos*
LT - *Insertos perdidos*
WT - *Insertos gastados*

La graduación de una barrena será más ilustrativa si se conoce el número o la cantidad de insertos perdidos o rotos. Letras y números entre paréntesis después del símbolo de graduación deben emplearse para indicar los insertos rotos o perdidos.

Por ejemplo, la indicación T2 (BT8, LT7), indica que 1/4 de la estructura cortadora ha desaparecido debido a que se tienen 8 insertos rotos y 7 perdidos.

En algunas áreas se presentan velocidades de perforación tan bajas que resultan inaceptables, por lo que la barrena debe ser sacada, aunque el diente no se encuentre desgastado.

la graduación del diente debe ayudar a determinar la barrena de la siguiente corrida del pozo, por lo tanto si tenemos graduación T-1, T-2 y T-3 que indican que la formación tiene bajo nivel abrasivo, se debe usar una barrena para formación más suave. Por ejemplo si una barrena 131, se evalúa como T-2 después de la corrida, el tipo de la barrena siguiente debe ser cambiado a una barrena 111 o 121, siempre y cuando la barrena no haya sido sacada por problemas en el cojinete. Si la barrena 131 se evalúa como T-6, la nueva barrena deberá ser del tipo 141 o 211, asumiendo que no existe algún cambio especial en la perforación.

I.3.2 SISTEMA DE RODAMIENTO (BALERO).

La evaluación completa del daño del cojinete en el campo, es muy difícil, pues se necesitaría desarmar la barrena para examinar la condición de los cojinetes y chumaceras. Por esto un examen de la barrena solamente revelará si los cojinetes han fallado o si aún estan intactos.

La falla del cojinete se presenta, si:

- a) **Uno o más conos se encuentran pegados y no rotan adecuadamente, o**
- b) **Uno o más conos se encuentran extremadamente flojos.**

ESCALA DE EVALUACION DEL DESGASTE EN LOS INSERTOS

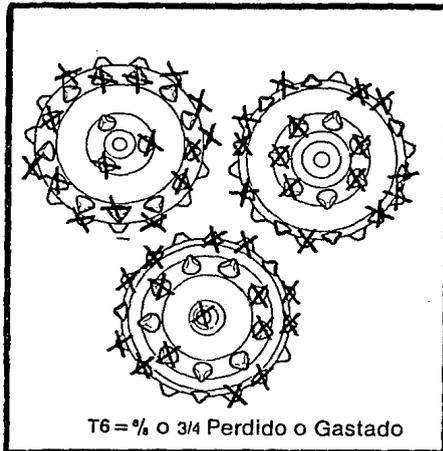
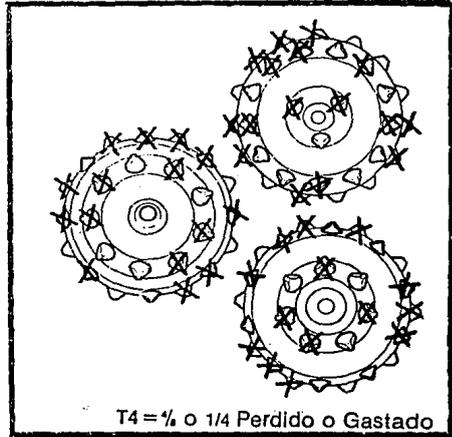
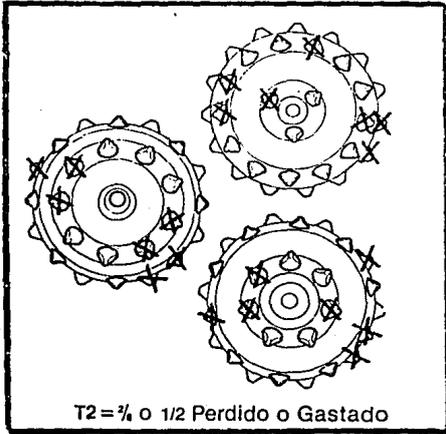


Fig I.12 EVALUACION DEL DESGASTE EN BARRENAS DE INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO

La evaluación de los rodamientos se expresa en octavos de la vida útil de la barrena gastada, en el cono que presente el peor estado. La falla completa del cojinete (cono trabado o perdido) se reporta usando la codificación B-8 (por tener 8/8 de uso). Un cono flojo generalmente se reporta como B-7. A continuación se muestra una guía para la evaluación del desgaste del balero:

- B0** - *Vida del cojinete entera o sin desgaste.*
- B1** - *Cojinete gastado 1/8.*
- B2** - *Cojinete gastado 1/4 (Todavía ajustado).*
- B3** - *Cojinete gastado 3/8.*
- B4** - *Cojinete gastado 1/2 (algo flojo).*
- B5** - *Cojinete gastado 5/8.*
- B6** - *Cojinete gastado 3/4 (Muy flojo).*
- B7** - *Cojinete gastado 7/8.*
- B8** - *Cojinete gastado 8/8 (Baleros perdidos y/o conos trabados).*

Quando el daño del cojinete no puede ser detectado claramente, entonces se estima en base al número de horas de vida del cojinete, frente al tiempo que se pensaba que duraría perforando. Así, si una barrena ha sido sacada después de 10 horas de operación y el perforador calculó que debería haber perforado unas 10 horas adicionales, el daño del cojinete se reportara como B-4.

Junto con la evaluación cuantitativa de la porción de vida gastada, los cojinetes sellados deben indicar la condición de los sellos:

- SE** - *Sello efectivo*
- SQ** - *Sello dudoso*
- SF** - *Sello fallado*

Las chumaceras solamente se gradúan con SE, SQ y SF sin ningún número. Cuando la condición de los sellos es diferente en los tres conos, se indica cual es el sello que presenta las peores condiciones.

I.3.3 CALIBRE DE LA BARRENA.

Quando el desgaste de la barrena es excesivo en el área de la base de los conos, la barrena perfora el agujero con diámetro menor al original. Para medir el desgaste del calibre se utiliza una regla y un anillo calibrador, para lo

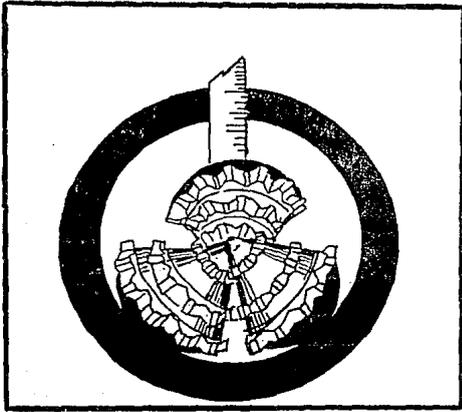


Fig. I.13 a

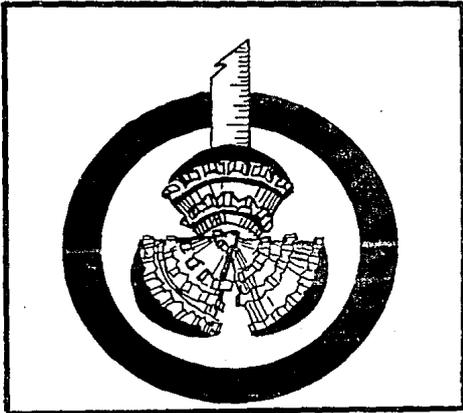


Fig. I.13 b

Fig I.13 EVALUACION DEL DESGASTE DEL CALIBRE DE LAS BARRENAS TRICÓNICAS

cual se tienen dos métodos diferentes.

El primero y más popular, consiste en empujar el aro calibrador contra los puntos de calibre de dos conos y se mide el espacio entre el aro y el tercer cono (Fig I.13 a). Generalmente, esta medida es aceptable; sin embargo, para obtener mayor exactitud, la medida debe multiplicarse por 2/3.

En el segundo y más exacto de los dos métodos, la barrena se centra en el aro calibrador y se mide la distancia entre el aro y la superficie del calibre de un cono (Fig I.13 b). Esta medida se multiplica por dos para obtener la reducción total del calibre de la barrena.

La pérdida del diámetro se reporta en octavos de pulgada. Así una barrena que ha perdido 0.5" de diámetro se evalúa como O-4. La letra "O" indica que la barrena está fuera de calibre y el 4 indica que el diámetro se ha reducido 4/8 de pulgada. La letra "I" se usa para indicar que una barrena se encuentra dentro del calibre.

I.4 CLASIFICACION DE BARRENAS IADC (código de tres dígitos).

Para evitar la confusión entre los tipos de barrenas equivalentes en relación con sus distintos fabricantes, la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación creó el sistema de clasificación de tres dígitos, que funciona de la siguiente manera:

- El primer dígito identifica dos situaciones:

Tipo de estructura de corte
Tipo de formación

- El segundo dígito señala el grado de dureza del tipo de formación.
- El tercer dígito precisa alguna característica del diseño de la barrena.

A continuación se muestra el rango de variación del primer dígito que va del 1 al 8 con la significación siguiente:

1. *Dientes maquinados para formación suave.*
2. *Dientes maquinados para formación media.*
3. *Dientes maquinados para formación dura.*
4. *Dientes de insertos para formación muy blanda.*

- 5. Dientes de insertos para formación blanda.**
- 6. Dientes de insertos para formación media.**
- 7. Dientes de insertos para formación dura.**
- 8. Dientes de insertos para formación extradura.**

Cada tipo de formación tendrá cuatro grados de dureza. por lo que el segundo dígito variará del 1 al 4, de esta manera:

- 1. Formación Suave.**
- 2. Formación Media Suave.**
- 3. Formación Media Dura.**
- 4. Formación Dura.**

El tercer dígito varia entre el 1 y el 9 e indica lo siguiente:

- 1. De toberas para lodo.**
- 2. De toberas para aire, toberas para lodo y dientes T.**
- 3. Protección del calibre.**
- 4. Cojinete sellado.**
- 5. Cojinete sellado y protección del calibre.**
- 6. Chumacera sellada.**
- 7. Chumacera sellada y protección del calibre.**
- 8. Para perforación direccional.**
- 9. Otras.**

II

OPTIMIZACION DE BARRENAS DE PERFORACION

II.1 FILOSOFIA DE LA OPTIMIZACION.¹

El alto nivel alcanzado en el desarrollo de diseños de sistemas, se ha atribuido al desarrollo de la computación. En el pasado, los diseños utilizaban grandes márgenes de seguridad para que fueran aceptables, pero recientemente se han desarrollado técnicas que pueden mejorar sistemáticamente el funcionamiento y por lo tanto reducir los costos.

Estas técnicas basadas en modelos matemáticos son las que constituyen la optimización. Por lo tanto, podemos definir a la optimización como el proceso colectivo para encontrar el grupo de condiciones requeridas que permiten alcanzar los mejores resultados para una situación dada.

A menudo, se discute que el uso del método de optimización, no vale la pena debido a la inexactitud de los datos disponibles o al empleo de suposiciones muy simplificadas en la construcción del modelo. Estas situaciones se encuentran comunmente en la práctica, y por lo tanto los resultados de la optimización no deben ser aceptados sin antes comprobarlos.

Además, es importante notar que en una situación real, particularmente en perforación, el término "Verdadera Optimización" no existe. Por ejemplo, se conoce ampliamente que el ritmo de penetración puede incrementarse usando agua como fluido de perforación, rotando la barrena a altas RPM e incrementando la velocidad en las toberas de la barrena. La insuficiencia de potencia hidráulica y mecánica a menudo impide el adecuado balance de variables para obtener la máxima eficiencia en la perforación. Además, siempre se ha tenido un valor límite sobre el cual un incremento en las rpm, peso sobre la barrena y gasto de bombeo mejoran muy poco o nada la eficiencia de perforación. Los dos factores principales que influyen los valores límite de las variables de perforación son: La vida de la barrena de perforación y la estabilidad del agujero. Aunque algunas veces la optimización parece ser idealista y lejana, esta puede darnos una idea clara sobre los límites de las variables que contribuyen a mejorar la eficiencia total del sistema.

II.2 OPTIMIZACION DE LA PERFORACION.²

Optimización de la perforación es el proceso lógico de análisis de los efectos y las interacciones de las variables de perforación a través de modelos matemáticos para alcanzar la eficiencia máxima en la perforación. El proceso involucra registros de varios pozos para determinar la efectividad de las variables controlables seleccionadas, las cuales incluyen tipo de lodo, hidráulica, tipo de barrena, peso sobre la barrena, y velocidad de rotación. Siguiendo el proceso de optimización se seleccionan las variables que ofrecen el mejor potencial para mejorar el programa de perforación y de esta forma implantarse en el campo. Este programa de optimización debe ser flexible, debido a los cambios inesperados que se puedan tener durante su aplicación en el campo.

El desarrollo de la perforación rotatoria puede dividirse en cuatro periodos diferentes:

Periodo de Concepción	1900 a 1920
Periodo de Desarrollo	1920 a 1948
Periodo Científico	1948 a 1968
Periodo de Automatización	Comienza en 1968

De 1939 a 1947, las investigaciones se concentraron en la composición y control del fluido de perforación. Se tenía muy poca atención en el ritmo de penetración. El objetivo era simplemente conseguir que el agujero fuera perforado, revestido, terminado y puesto en producción.

De 1947 a 1957, las investigaciones se enfocaron en examinar los productos usados en los sistemas de lodo para determinar su efectividad en las propiedades de pérdida de fluido y viscosidad deseadas y establecer las especificaciones de materiales para lodo. También se intentaba relacionar las propiedades del lodo con la estabilidad y la limpieza del agujero. Se hacían preguntas en relación con el efecto que tendría la invasión de filtrado en la producción y en la interpretación de registros geofísicos, pero se investigaba muy poco acerca de los posibles efectos de las propiedades de los fluidos de perforación o aditivos en el ritmo de penetración.

A fines de los 50' s la química del lodo había avanzado a un grado en el que las propiedades del lodo podían ser controladas dentro de límites específicos usando una gran variedad de productos en el equipo. Sin embargo, los investigadores notaron que, aunque se tuviese un control efectivo de las propiedades del lodo, a menudo las condiciones del agujero se

empeoraban en vez de mejorarse. Se supuso que ciertas formaciones, primeramente lutitas, serían inestables aunque las propiedades del lodo fueran controladas. La observación de "Lodos perfectos no necesariamente significan agujeros perfectos" incitó a los ingenieros para desarrollar una mejor comprensión de la relación entre la química del lodo y el comportamiento del agujero.

En 1959, mediante un análisis de 100 pozos perforados, se mostró que los sólidos de arcilla tuvieron un efecto significativo en el ritmo de penetración, número de barrenas y días de equipo. El grado más alto en la eficiencia de la perforación ocurrió mientras el porcentaje de sólidos de arcilla por volumen se redujó del 6% al 0% (agua limpia).

Otra observación importante fue que los pozos perforados con lodos no-dispersos mostraron un ritmo de penetración mayor que los pozos perforados con lodos dispersos teniendo el mismo contenido de sólidos. En consecuencia, se realizaron estudios para comparar los dos sistemas de lodo variando la cantidad de sólidos de arcilla. Los resultados indicaron que el tamaño de la partícula así como el contenido total de coloides, tienen un efecto importante en el ritmo de penetración.

Otra investigación realizada durante este periodo involucro la hidráulica del lodo. Esto resultó en la mejor comprensión de la limpieza del fondo del agujero y por lo tanto el mejor funcionamiento de la barrena.

El siguiente esfuerzo en la optimización de la perforación fue dirigida hacia las condiciones de operación. El objetivo principal era encontrar la combinación óptima peso-velocidad de rotación para una barrena dada, en una formación específica. Para esto se utilizaron una ecuación de costo por metro perforado y una ecuación simplificada del ritmo de penetración como base para encontrar la combinación $W - N$ óptima.

A partir de la ecuación de costo por metro era evidente que el costo por metro perforado depende de 5 variables: ritmo de penetración, vida de la barrena, costo de renta del equipo, costo de la barrena y tiempo en que no hay perforación. Algunos otros costos no incluidos en la ecuación son: costos del lodo, costos de supervisión y gastos generales, equipo sustituto y transportación.

En la ecuación de ritmo de penetración se introducía la constante de perforabilidad, D_f , que es función de muchas variables, tales como tipo de formación, tipo de lodo, tipo de barrena e hidráulica en la barrena.

Los parámetros de la hidráulica tienen que ser cambiados para aprovechar las características del lodo que han sido mejoradas.

NO

Exista

Pagina

**VARIABLES CONSIDERADAS EN LA PERFORACION
DE UN POZO**

Peso sobre la barrena Tiempo de viaje Cuadrilla Presión diferencial Velocidad en las toberas Gasto Propiedades de la formación Condiciones del equipo Profundidad	Velocidad de rotación Locación Potencia de rotaria Tipo de lodo Sólidos del lodo Flexibilidad del equipo Condiciones de la tubería Disponibilidad de agua Tipo de barrena	Clima Tipo de toberas Disponibilidad del equipo Peso del lodo Planeación Pérdida de circulación Propiedades del lodo Presión total
---	---	---

Tabla II.1

**EFFECTOS DE LAS VARIABLES DE
PERFORACION**

VARIABLE	EFECTO EN	
	RITMO DE PENETRACION	COSTO TOTAL DEL POZO
Profundidad	Decremento	Incremento
Peso	Incremento	Ninguno
RPM	Incremento	Ninguno
Sólidos de lodo	Decremento	Incremento
Pérdida de fluido	Incremento	Decremento
Viscosidad	Decremento	Incremento
Velocidad en toberas	Incremento	Decremento
Gasto	Ninguno	Ninguno
Presión total	Decremento	Incremento
Presión Diferencial	Decremento	Incremento
Propiedades de la roca	Ninguno	Ninguno
Tipo de barrena	Ninguno	Ninguno

Tabla II.2

**VARIABLES QUE AFECTAN EL RITMO
DE PENETRACION**

ALTERABLES	INALTERABLES
Fluido de Perforación - Tipo de fluido - Contenido de sólidos - Viscosidad - Densidad - Cantidad de filtrado	Condiciones del tiempo Condiciones del equipo Gases corrosivos del pozo Temperatura de fondo
Hidráulica - Presión de bombeo - Velocidad en toberas - Gasto - Velocidad Anular	Tiempo de viaje Propiedades de la roca Profundidad
Tipo de barrena	Tipo de formación
Peso sobre la barrena	Presión de la formación
Velocidad de rotación	

Tabla II.3

**INTERACCIÓN TÍPICA DE LAS VARIABLES DE
PERFORACIÓN EN FORMACIONES DURAS**

COMBINACION DE VARIABLES	INTERACCION
Peso - RPM	Negativa
Peso - Hidráulica	Positiva
RPM - Hidráulica	Ninguna
Baja cantidad de sólidos - Hidráulica	Positiva
Baja cantidad de sólidos - Peso	Positiva
Tipo de barrena - Tipo de Formación	Cualquiera
Baja cantidad de sólidos - Tipo de barrena	Positiva
RPM - Tipo de Formación	Negativa
Lodo no disperso - Hidráulica	Positiva

Tabla II.4

esta comparando se cambian o si hay un cambio en la formación que esta siendo perforada.

El éxito o fracaso del programa de optimización de perforación depende de la correcta comprensión de esas interacciones y como utilizarlas en mejorar la eficiencia en la perforación.

A manera de resumen la filosofía de la optimización de perforación dicta que el planeamiento de los programas debe apoyarse en los siguientes puntos:

- **Lodo de perforación** : Estabilización del agujero, limpieza del agujero y perforabilidad.
- **Hidráulica** : Limpieza de la barrena, limpieza del agujero, hidráulica en la barrena y no causar erosión en el agujero.
- **Tipo de barrena** : El objetivo principal es la selección de la barrena para una formación específica.
- **Óptimo peso** sobre la barrena y velocidad de rotación para la barrena seleccionada.
- **Posibles problemas** esperados y soluciones recomendadas.
- **Ahorros anticipados.**

II.3 OPTIMIZACION EN LA SELECCION DE BARRENAS DE PERFORACION.

Históricamente, los ingenieros de Perforación han seleccionado barrenas en base a los trabajos realizados en el área con anterioridad y que han producido los más bajos costos por metro perforado.

La selección de la barrena es probablemente la fase más difícil de la optimización de la perforación. Esta requiere más experiencia y disponibilidad de información para alcanzar la eficiencia deseada. Seleccionar la barrena adecuada, mejorar el sistema de lodo y los parámetros de hidráulica dan las bases para construir un programa de perforación eficiente.

La gente que se dedica a seleccionar barrenas tienen diferentes criterios, así habrá personas que preferiran a un manufacturero sobre otro, mientras otros favoreceran altos ritmos de penetración sobre menor cantidad de viajes o viceversa. También se puede maximizar la vida de la barrena o sacrificarla para aumentar el ritmo de penetración.

Para hacer un buen trabajo en la selección de barrenas para perforar un pozo particular, el ingeniero debe tener un amplio conocimiento de los tipos

de barrenas disponibles que fabrican las diferentes compañías y como mejorar el uso de estas barrenas en el diferente tipo de formaciones que se tienen (Desde muy suave hasta muy dura).

Es también importante que el ingeniero posea descripciones tanto cualitativas como cuantitativas del desgaste de la barrena de al menos 2 pozos vecinos a fin de efectuar una buena selección.

La selección de barrenas ofrece una gran oportunidad para reducir los costos de perforación. Sin embargo, los perforadores que logran los menores costos, comúnmente no obtienen las mejores corridas de barrenas; sino que en promedio, la mayoría de las veces, solo son buenas corridas y en algunas ocasiones llegan a ser mejores del promedio general.

Si en cada una de las 15 o 20 corridas consecutivas de barrenas, necesarias en la perforación de un pozo, se mejora el promedio de perforación (aunque no se tengan corridas óptimas), dara casi siempre como resultado bajos costos. Por lo que la consistencia, es más importante que el ahorro obtenido en cualquier corrida individual.

Esta estrategia puede ser aplicada mediante la selección de cada barrena y los parámetros de operación; debiendo ser ambos puntos al menos iguales a los utilizados en las corridas que rebasaran el promedio de perforación en el área, eliminando con esto las malas corridas de las barrenas.

En la selección de las barrenas para un nuevo pozo existen 3 fases distintas:³

Primero, el encargado de la planeación del pozo deberá de llevar a cabo una selección inicial de las barrenas, basado en los objetivos, riesgos y la geometría del pozo.

Segundo, controlar las condiciones de perforación del pozo prospecto (apoyado en estudios detallados de los registros de las barrenas de los pozos vecinos), para que el funcionamiento del programa de barrenas iguale al menos, la operación promedio del área.

Finalmente, el programa de barrenas y los parámetros operacionales deberan de ser afinados para lograr que el nuevo pozo mejore la operación promedio del área.

Como la selección de la barrena adecuada para las condiciones de perforación resulta complicada (por la inmensa variedad de barrenas existentes), se cuenta con algunos parámetros que facilitan dicho proceso y con los cuales se pueden obtener mejores velocidades de penetración y

ahorros significativos en el costo de perforación (Tablas II.5 y II.6).

Los parámetros, considerados más significativos, para la selección de la barrena, son:

- a) Dureza y abrasividad de la formación.*
- b) Geometría del pozo.*
- c) Control direccional.*
- d) Sistema de rotación.*
- e) Tipo de lodo.*
- f) Nucleo*

Considerando estos parámetros, se han hecho esfuerzos para seleccionar adecuadamente una barrena para perforar eficientemente una formación específica. Estos trabajos buscan optimizar la selección de las barrenas utilizando alguno de los siguientes métodos:

1. Registros de barrenas.
2. Registros sísmicos.
3. Energía específica.
4. Ecuación de costo por metro.
5. Modelos matemáticos.

II.3.1 Registros de barrenas de pozos anteriores.

Hoy en día se invierten miles de dólares en la industria petrolera para tomar decisiones de planeación precisas e inteligentes. Un ligero descuido o cálculo errado puede significar la diferencia entre ganancias o pérdidas de un pozo.

Debido a los grandes riesgos involucrados en la industria de perforación de pozos, los contratistas y operadores solicitan cada día más información que los ayude a planear y perforar un pozo.

En el mercado actual es indispensable contar con registros completos y exactos si se quiere perforar un pozo con máxima eficiencia. Entre los registros que se llevan diariamente están los informes diarios de perforación, conteo cuidadoso de tuberías de perforación, informes sobre las propiedades del lodo y registros de cables de acero.

No obstante, uno de los más importantes es un registro exacto del rendimiento de una barrena.

CLASIFICACION DE LA BARREÑA	TIPO DE BARREÑA	DESCRIPCION DE LA FORMACION O ROCA	ESTRUCTURA CORTADORA	EXCENTRICIDAD O ANGULOS DE CONO	TAMAÑO DE LOS BALEROS Y ESPESOR DE LA CONCHA	ACCION CORTADORA	
						AST-TRIT	RASC-RASP
FORMACION SUAVE	111, 114 116, 121 124, 126	FORMACIONES BLANDAS QUE TENGAN BAJA RESISTENCIA COMPRESIVA Y ALTA PERFORABILIDAD (LUTITAS SUAVES, ARCILLAS, LECHOS ROJOS, SAL, CALIZAS SUAVES, FORMACIONES NO CONSOLIDADAS, ETC)	DIENTES LARGOS Y MUY ESPACIADOS PARA PENETRACION PROFUNDA SE UTILIZA EL DISEÑO DE DIENTES INTERRUMPIDOS PARA LIMPIEZA EFICIENTE Y MENOR ACERO EN EL FONDO DANDO POR RESULTADO VELOCIDADES DE PENETRACION ALTAS	EXCENTRICIDAD EN LOS CONOS MAXIMA Y ANGULO DE CONO DISEÑADO PARA GENERAR UNA ACCION RASCADO-RASPADO ASI COMO AGITACION Y ALTA VELOCIDAD DE PENETRACION EN FORMACIONES SUAVES	GENERALMENTE BALEROS PEQUEÑOS, CONCHAS DE CONO DELGADAS PARA PERMITIR DIENTES MAS LARGOS PARA GENERAR VELOCIDADES DE PENETRACION MAYORES		
FORMACION MEDIA-SUAVE	131, 134 136, 211 214, 216	FORMACIONES SUAVES O SUAVES INTERCALADOS CON ESTRATOS MAS DUROS: (LUTITAS FIRMES, NO CONSOLIDADAS O ARENOSAS, LECHOS ROJOS, SAL, ANHIDRITA, CALIZAS SUAVES)					
FORMACION MEDIA-DURA	221, 224 226, 231 234, 236 241, 244 246	FORMACIONES MEDIAS A DURAS (LUTITAS DURAS, LUTITAS ARENOSAS, ESTRATOS DE LUTITAS ALTERNADOS CON ESTRATOS DE ARENA Y CALIZAS, ETC.)	DIENTES DE LONGITUD MEDIA MENOS ESPACIADOS, PARA PENETRACION DE DIENTE COMBINADO CON MAYOR RESISTENCIA A LA ROTURA. ALGUNOS DISEÑOS CON DIENTES INTERRUMPIDOS PARA MENOR ACERO EN EL FONDO Y VELOCIDADES DE PENETRACION MAYORES.	EXCENTRICIDAD MEDIA Y ANGULOS DE CONO PARA ACCION COMBINADA DE RASCADO-RASPADO Y TRITURADO-ASTILLADO	BALEROS Y ESPESOR DE CONCHAS MEDIAS PARA CARGAS SOBRE BARREÑA SEMI-PESADAS.		
FORMACION DURA	311, 314 316, 321 324, 326 341, 344 346	FORMACIONES MEDIAS DURAS Y DURAS ABRASIVAS A DURAS (ROCAS DE ALTA RESISTENCIA, COMPRESIVA, DOLOMITAS, CALIZA DURA, ETC.)	DIENTES CORTOS, CERCANAMENTE ESPACIADOS PARA ACCION TRITURANTE CON UNA MAXIMA RESISTENCIA A LA RUPTURA.	RODILLOS RECTOS PARA ACCION DE ASTILLADO TRITURADO SIN RASPADO EN FORMACIONES DURAS O FORMACIONES CON ALTA RESISTENCIA A LA COMPRESION	BALEROS GRANDES Y CONCHAS DE CONO GRUESAS PARA CARGAS PESADAS NECESARIAS PARA VENCER FORMACIONES DURAS		

TABLA II.5 CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE BARRENAS TRICONICAS DE PERFORACION CON DIENTES MAQUINADOS

CLASIFICACION DE LA BARRENA	TIPO DE BARRENA	DESCRIPCION DE LA FORMACION O ROCA	ESTRUCTURA CORTADORA	EXCENRICIDAD O ANGULOS DE CONO	TAMAÑO DE LOS BALEROS Y ESPESOR DE LA CONCHA	ACCION CORTADORA
FORMACION MEDIA SUAVE	511, 514 516, 521 524, 526	SUAVES, NO CONSOLIDADAS, BAJA RESISTENCIA A LA COMPRESION Y ALTA PERFORABILIDAD TALES COMO ARCILLAS, LUTITAS, SAL, ETC. DE INTERVALOS CONSIDERABLES	INSERTOS BLANDOS: INSERTOS EN FORMA DE DIENTES DE EXTENSION MAXIMA	INSERTOS BLANDOS PROVEEN ACCION RASCADORA Y RASCADORA	LOS INSERTOS BLANDOS PROVEEN CONCHAS DE CONO MAS DELGADAS Y BALEROS MAS PEQUEÑOS	PRINCIPALMENTE RASCADO-RASPADO CON UN MINIMO REQUERIMIENTO DE ASTILLADO-TRITURADO
FORMACION MEDIA	531, 534 536, 611 614, 618	INTERCALACIONES MAS GRANDES DE FORMACIONES DURAS (CALIZA, DOLOMITAS, Y LUTITAS ARENOSAS DURAS)	INSERTOS MEDIOS: INSERTOS EN FORMA DE CUÑA DE EXTENSION MEDIA	INSERTOS MEDIOS: ACCION TRITURADORA CON LIGERO RASPADO	INSERTO TIPO MEDIO, PREVISTO DE UNA SECCION DE CONCHA MAS GRUESA PARA MAYOR RESISTENCIA	FUNDAMENTALMENTE ASTILLADO Y RASCADO CON ALGO DE ACCION TRITURADORA
FORMACION MEDIA DURA	621, 624 626, 711 714, 716	INTERCALACIONES MEDIAS EN FORMACIONES DURAS (PEDERNAL, GRANITO, BASALTO, FORMACIONES CUARCITICAS)				PRINCIPALMENTE TRITURADORA CON ALGO DE ACCION RASCADORA
FORMACION EXTREMADAMENTE DURA	721, 724 726, 811 814, 816	LAS MAS DURAS DE LAS FORMACIONES DURAS Y ABRASIVAS (CUARCITAS Y ARENAS CUARCITICAS DURAS)	INSERTOS DUROS: INSERTOS EN FORMA CONICA DE MINIMA EXTENSION CON MAXIMA RESISTENCIA	INSERTOS DUROS: ACCION TRITURADORA	INSERTO TIPO DURO, PREVISTO DE BALEROS GRANDES CON UNA SECCION DE CONCHA GRUESA	SOLAMENTE ACCION TRITURADORA Y FRACTURADORA

TABLA II.6 CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE BARRENAS TRICONICAS DE PERFORACION CON INSERTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO

Se ha pensado con muchísimo cuidado el diseño de la forma para el registro de barrenas. A través de muchos estudios se han identificado muchos de los factores que afectaban el rendimiento en la perforación.

Estos registros de barrenas anteriores a menudo contienen información muy valiosa para conseguir una selección adecuada de la barrena. Uno de los problemas en la utilización de estos registros de barrenas es que a menudo los mejores de estos no se encuentran disponibles debido a diferentes causas, por ejemplo, pérdida parcial o total de los registros de barrenas o el ingeniero es nuevo en el área y no sabe cual fue la barrena óptima. Pero el mayor problema esta en que estos registros no contienen información ni de litología, ni de esfuerzos a que se encuentran sujetos las rocas, por lo tanto la selección no será muy confiable, esta sera cualitativa y no cuantitativa.

Una buena adquisición de datos de perforación tomados de estos registros, se necesitan para poder lograr una adecuada selección de barrena. La acumulación de una gran cantidad de datos de corridas de barrenas, daran la base para determinar cual barrena perforara una formación más efectivamente.

El registro de barrenas es una forma eficiente, fácil de usar para anotar la información que permitirá un análisis preciso del rendimiento de las barrenas y de la eficiencia del pozo. A continuación se presentan algunos de los puntos más valiosos que pueden ayudar a planear y perforar un pozo.

BARRENAS Y DIAS.

El término tan común "barrenas y días" se refiere a la información adicional más solicitada cuando contratistas y operadores planean y proponen pozos. Se tiene un registro de los días pasados en el lugar de perforación. Si se resta el tiempo no trabajando se puede obtener una idea bastante exacta de cuántas horas de perforación se necesitaran.

Si se sabe el número de barrenas que se usaron con anterioridad para perforar los pozos, y bajo la advertencia de que cualquier situación inesperada puede afectar la velocidad de penetración o causar pérdida de tiempo, se podra obtener un buen cálculo del costo de la barrena y el número aproximado de días dedicados a perforar.

LOCALIZACION DEL POZO.

Quando se planea un pozo es esencial tener a la mano información pertinente sobre el área a perforar.

Es recomendable clasificar los registros de barrenas por sección para poseer información de diferentes áreas y así facilitar su manejabilidad.

PUNTOS DE TUBERÍA DE REVESTIMIENTO.

Los puntos de tubería de revestimiento es un elemento importante que nos da una idea acerca de donde han cambiado las características de la formación y en donde se necesitan ajustar los pesos del lodo. Además de las propiedades del lodo, los puntos de la tubería de revestimiento tienen una relación directa con el tipo y tamaño de la barrena y con las prácticas de operación que a la larga pueden afectar la velocidad de penetración.

II.3.2 Registros sínicos.

La selección de la barrena de perforación por medio de registros sínicos se trata en el artículo de Mason.

Mason en 1987, correlacionó la resistencia a la compresión de la roca, con el tiempo de tránsito de cizallamiento, calculado a través del tiempo de tránsito compresional obtenido del registro sínico.

Para la selección económica de la barrena en función del tiempo de tránsito de cizallamiento, Mason seleccionó el campo Blocker en el este de Texas en EUA y calculó el costo por metro para cada una de las barrenas que perforaron normalmente.

Una vez que se efectuaron los cálculos correspondientes se elaboró una gráfica de costo por metro contra profundidad de las barrenas identificadas por su código IADC, determinándose así intervalos con códigos IADC que proporcionaron el menor costo.

Manteniendo los mismos intervalos de código IADC de las barrenas Mason construyó una gráfica de tiempo de tránsito de cizallamiento contra profundidad correlacionándose al mismo tiempo el tiempo de tránsito de cizallamiento contra el tipo de barrena recomendado .

Finalmente Mason elaboró una gráfica que correlacionara el tiempo de tránsito de cizallamiento en función del tiempo de tránsito del fluido contenido en los poros de la formación, como unas rectas inclinadas del esfuerzo de compresión dividiendo varios códigos IADC de barrena recomendados y estableciéndose así rangos de valores. Mason examinó el método en otros campos de florida, Wyoming y Michigan con óptimos resultados.

Con ayuda de los registros geofísicos, a diferencia de los de barrenas,

podemos conocer las características de las formaciones que la barrena ha penetrado. Por lo tanto el empleo de los datos tomados de estos registros geofísicos ayudaran al ingeniero petrolero ha tener una selección más económica de la barrena de perforación.

Debido a que se tiene una selección más cualitativa y cuantitativa empleando registros geofísicos se dedicara un capitulo completo a este tema.

II.3.3 Energía específica.^{4,5}

En la literatura se tienen diferentes articulos que hablan sobre la energía utilizada por una barrena tricónica de perforación, pero generalmente estos relacionan el trabajo mecánico hecho por la barrena con la energía requerida para triturar un volumen unitario de roca.

La energía específica (Es) de una roca se define como la **energía requerida para remover una unidad de volumen de roca y se encuentra estrechamente relacionada con el rendimiento de la barrena.** Entre menor sea la energía específica mayor será el rendimiento de la barrena.

La energía requerida para triturar el volumen de roca perforado en una unidad de incremento de tiempo se expresa mediante:

$$E_v = \frac{\Pi}{4 * d_b^2 * E_s * R} \dots\dots (II.1)$$

El trabajo total hecho por la barrena en el mismo intervalo de tiempo esta dado por:

$$w = W R + 2 \Pi N M \dots\dots (II.2)$$

El torque de la barrena usado en esta ecuación es el torque promedio requerido para rotar la barrena bajo condiciones de régimen permanente. Generalmente el trabajo axial es mucho menor que el rotatorio y algunas veces es despreciable.

Igualando las dos ecuaciones anteriores y despejando la energía específica resulta la siguiente ecuación:

$$E_s = 4 \frac{(W)}{\pi d_b^2} + 480 \frac{N T}{d_b^2 R} \dots (II.3)$$

Donde:

E_s	= Energía específica de la roca	(Lb/pg^3)
W	= Peso sobre la barrena	(lbs)
d_b	= Diámetro de la barrena	(pg)
N	= Velocidad de rotación	(rpm)
R	= Ritmo de penetración	(ft/hr)
T	= Torque de rotación	(ft/lb)

Rabia concluyó que la energía específica no es una propiedad fundamental intrínseca de la roca. Es altamente dependiente del tipo y diseño de la barrena. Esto significa que para una formación de un esfuerzo dado, una barrena para formación suave producirá un valor completamente diferente de energía específica que el de una barrena para formación dura.

Esta propiedad de energía específica, por lo tanto, proporciona una guía para efectuar una selección apropiada del tipo de barrena. Además para un tipo de barrena dado en una formación de esfuerzo constante, la energía específica puede considerarse constante bajo cualquier combinación de valores de peso y velocidad de rotación. Esto es debido a que los cambios en $W-N$ generalmente conducen a un incremento en el ritmo de penetración (bajo hidráulica óptima) y así mantener el balance de la ecuación que representa la energía específica.

La energía específica (E_s) es una medida directa del rendimiento de la barrena en una formación particular y da una indicación de la interacción entre la barrena y la roca. El hecho es que la energía específica (E_s), cuando se compara con el ritmo de penetración, es menos sensitivo a cambios en $W-N$ haciendo que esto sea una herramienta práctica para la selección de barrenas.

Si diferentes tipos de barrenas se corren en una sección de agujero, los valores de E_s de estas diferentes barrenas pueden llevarse a una misma gráfica. Cada barrena tendrá una tendencia diferente y la barrena que de el menor valor de E_s se tomara como la barrena más económica.

Las conclusiones del trabajo de Rabia fueron:

- La energía específica es una medida del rendimiento de la barrena y es directamente compatible con el costo por metro perforado. Esto significa que a medida que se incrementa el valor del costo por metro, se incrementa el valor de E_s y viceversa (Fig II.1).⁶

- La energía específica puede utilizarse para seleccionar el tipo de barrena adecuado para cualquier sección del agujero así como su tiempo de rotación.

- La energía específica puede emplearse para planear los valores promedio del costo por metro perforado de un pozo.

II.3.4 Ecuación de costo por metro.

La ecuación de costo por metro puede usarse para la selección de la barrena calculando el costo por metro para cada corrida de barrena y compararlos para determinar la que produzca el mínimo costo. Las barrenas actuales han evolucionado en forma increíble, permitiendo obtener intervalos perforados por barrena de mayor longitud al permanecer más tiempo perforando. No obstante lo anterior, estos avances tecnológicos han ocasionado que los precios de las barrenas sean muy variados, con lo que se propició que la ingeniería de perforación en la actualidad pase por alto los factores comunes de evaluación, en la selección de barrenas, tales como: horas totales perforadas, velocidad de rotación y longitud total perforada.

La selección apropiada del tipo de barrena, velocidad de rotación y peso sobre la barrena, nos permitan obtener el menor costo por metro o mínimo costo de perforación.

El costo de un intervalo perforado durante la corrida de una barrena es la suma de tres conceptos:

i) Costo de la barrena.

ii) Costo de viaje

iii) Costo de operación del equipo durante el tiempo requerido para perforar el intervalo.

RELACION ENTRE ENERGIA ESPECIFICA Y COSTO POR METRO

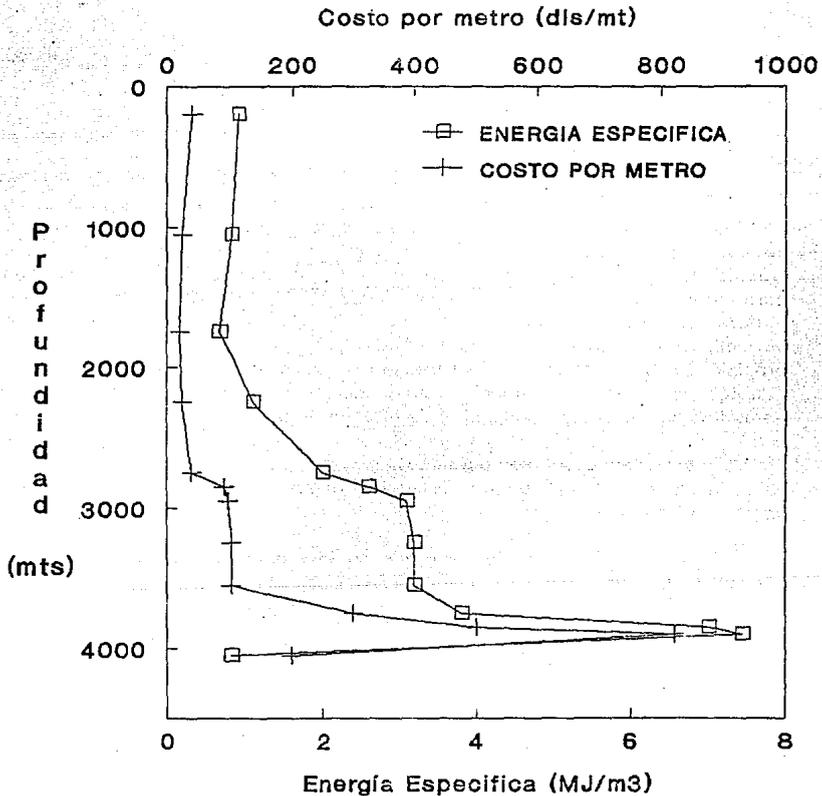


Fig II.1 ENERGIA ESPECIFICA Y COSTO/MT vs. PROFUNDIDAD

Si el costo del intervalo se divide por el intervalo perforado, el resultado es el costo por metro, costo por metro o costo de perforación:

$$C = \frac{Cb + Cr [Tt + Tr]}{F} \dots (II.4)$$

Donde:

- C = Costo de la corrida de la barrena (\$/mts)
- Cb = Costo de la barrena (\$)
- Cr = Costo de renta diaria del equipo (\$/hr)
- Tt = Tiempo de viaje (hrs)
- Tr = Tiempo de perforación (hrs)
- F = Intervalo perforado por la barrena (mts)

La ecuación anterior muestra que el costo por metro esta controlado por 5 variables. Para un costo de barrena dado y un intervalo perforado, el costo por metro sera muy sensible a cambios en el costo del equipo por hora, tiempo de viaje y tiempo de rotación. El tiempo de viaje no siempre es fácil determinararlo y cualquier cambio en este influira en el valor del costo por metro perforado. El tiempo de rotación de la barrena es directamente proporcional al costo por metro, asumiendo que las otras variables permanecen constantes.

El costo del equipo influira grandemente en el valor del costo por metro. Para una sección de agujero que se perforó con diferentes equipos que tienen un costo diferente, la misma barrena producira diferentes valores de costo por metro, suponiendo que el mismo tiempo de rotación se uso en todos los equipos.

En la etapa de planeación de la perforación (selección de la barrena a emplear), los tiempos de viaje mostrados en la Tabla II.7 son adecuados, pero puede emplearse en forma confiable el valor estándar de :

$$Tt = \frac{0.4 D}{100} \dots (II.5)$$

Donde D representa la profundidad en metros.

TIEMPO DE VIAJE

PROFUNDIDAD (m)	DIAMETRO DE BARRENA (pgs)		
	(< 8.75)	(8.75-9.75)	(>9.75)
609.6	1.50	3.00	4.50
1219.2	2.50	4.20	5.75
1828.8	3.50	5.40	7.00
2438.4	4.70	6.25	8.00
3048.5	5.80	7.25	9.00
3657.6	7.00	8.25	10.25
4267.2	8.25	9.25	11.50
4876.8	9.75	10.25	12.50
5486.4	11.00	11.25	13.75
6096.0	11.80	12.25	15.00

Los valores son tiempos de viaje redondos
promedio en horas

Tabla II.7

La selección apropiada del peso sobre la barrena y velocidad de rotación para obtener el mínimo costo de perforación, no siempre producirá el máximo ritmo de penetración ni mayor vida de la barrena.

Si el costo fijo y el costo de rotación se consideran separadamente, el costo fijo con respecto al costo por metro sería muy alto después de que la barrena ha perforado el primer metro, pero este costo declina rápida y continuamente conforme la barrena perfora un mayor intervalo.

En comparación, la contribución del costo de rotación al costo por metro es inicialmente baja, pero se incrementa conforme la barrena va perforando. Esto se debe a que el ritmo de penetración declina conforme la barrena se desgasta.

El rendimiento de la barrena en las diferentes partes de una sección de agujero puede determinarse a partir del costo por metro ($\$/\text{mt}$). Cuando el valor del costo por metro empieza a incrementarse, se sugiere que la barrena se saque del agujero. En otras palabras, el costo por metro se está utilizando como un criterio para determinar la profundidad a la cual una barrena deja de ser económica.

En litologías uniformes, un registro de la operación de la barrena en base al costo por metro (llevado metro a metro), permitirá realizar una gráfica de costo por metro perforado contra el tiempo de rotación o intervalo perforado (Fig II.2).

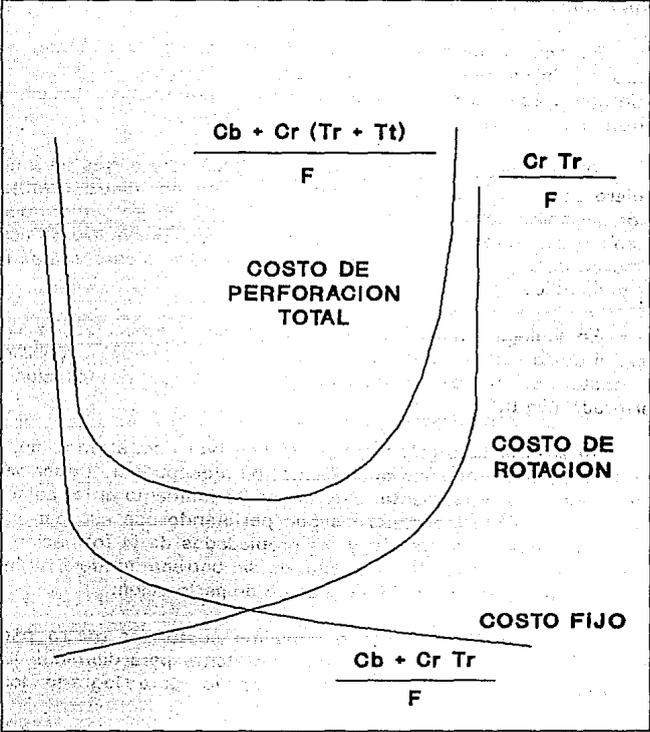
Al analizar esta gráfica se podrá observar que, al principio, el costo por metro tiene una tendencia decreciente, pero después de haber pasado por un valor mínimo, se incrementa. Este momento (aumento en el costo por metro), implica que resulta incosteable seguir perforando con esa barrena, ya que si las condiciones de operación y las propiedades de la formación permanecen constantes, el grado de desgaste de la barrena tenderá a incrementarse rápidamente y por consiguiente el costo de perforación.

Identificar el momento del mínimo costo por metro para decidir el cambio de la barrena, es un punto importante para disminuir los costos de perforación; recomendándose como apoyo para lograrlo los siguientes aspectos prácticos:

1. Tomar en cuenta las manifestaciones superficiales que indican el estado mecánico de la barrena, tanto en su estructura de corte como en los rodamientos.

VARIACION DEL COSTO DE PERFORACION

COSTO
P
O
R
M
E
T
R
O



INTERVALO PERFORADO

Fig II.2 COSTO POR METRO

2. Tomar en cuenta las características de la litología que se está perforando, observando los cambios que se presentan.
3. Tomar en cuenta las características de diseño y operación de la barrena en uso.

La meta de la optimización de la perforación es perforar un agujero al mínimo costo. Esta meta se alcanzara cuando todos los parámetros involucrados en el proceso de perforación tengan su valor óptimo. Generalmente, el proceso de optimización de perforación se reduce a minimizar el costo por metro perforado.

En ausencia de registros de barrenas, que apoyen la selección de las barrenas apropiadas para el pozo prospecto, existen ciertas reglas comúnmente usadas por los ingenieros de perforación:⁷

1. Deben considerarse en primer lugar las Tablas de clasificación IADC, que proporcionan una lista de los tipos de barrenas aplicables en una formación de dureza específica.

2. El tipo de barrena inicial y las características seleccionadas deben ser gobernadas por el costo de las barrenas.

3. Para la porción somera del pozo, las barrenas tricónicas resultan una buena elección, por ser las más vérsatiles.

4. Cuando se emplea una barrena tricónica:

i) Utilizar el tamaño de dientes más largo posible.

ii) Se debe tolerar una pequeña cantidad de dientes fracturados antes de seleccionar un tamaño de dientes más cortos.

iii) Cuando no se puede aplicar un peso suficiente a la barrena, debe usarse una barrena de dientes más largos.

iv) Cuando el daño del cojinete es mayor al daño del diente, se selecciona una medida de diente mayor, un mejor diseño de cojinete o se aplica más peso a la barrena.

II.3.5 Modelos matemáticos (desgaste en dientes y cojinetes).

Si la barrena tuviera una vida infinita, esta solo tendría que ser cambiada cuando se requiriera un cambio en el diámetro del agujero. Debido a que la barrena sufre un desgaste, el tiempo de rotación será una función del ritmo de desgaste de la barrena. Por lo tanto para minimizar el costo por metro perforado, además de la ecuación mencionada en el punto 4, se requieren de dos relaciones adicionales: una que exprese el ritmo de penetración R como una función de variables independientes y la otra que exprese el desgaste de la barrena en función de variables independientes.

Desde principios de los 50's varios modelos se han desarrollado para predecir el ritmo de penetración y el desgaste en la barrena.

La evaluación del desgaste de los cojinetes y de los dientes en las barrenas tricónicas y el desgaste de los cortadores en las barrenas PDC y la pérdida de la matriz de diamantes en las barrenas de diamantes, pueden usarse como base para la selección adecuada del tipo de barrena. El modelo matemático del rendimiento de la barrena puede emplearse para seleccionar el tipo adecuado de barrena para el tipo de formación que va a ser perforada bajo un grupo de condiciones dadas.

En la mayoría de los modelos, las variables independientes son el peso sobre la barrena W y la velocidad de rotación N , estos parámetros definirán las condiciones de operación a que estará sujeta la barrena. Debido a la complejidad e importancia de estos modelos, el siguiente capítulo estudiara algunos de ellos.

II.4 METODOS AUXILIARES EN LA OPTIMIZACION DEL PROGRAMA DE BARRENAS.^{3,8,9}

Además de los métodos anteriores existen métodos prácticos para la selección adecuada de la barrena, se les llama prácticos debido a que se obtienen por medio de la práctica y experiencia con la perforación de diferentes pozos.

Existen ocasiones en las que es recomendable utilizar una barrena de tipo diferente a las utilizadas normalmente. Por ejemplo, es posible que se desee emplear una barrena de insertos con baleros de fricción en lugar de una barrena de dientes maquinados.

Algunos de estos métodos son:

IGUALANDO EL PROMEDIO DEL AREA
CONVERSION DEL TIPO DE BARRENA
ANALISIS DE IGUAL COMPORTAMIENTO

II.4.1 IGUALANDO EL PROMEDIO DE PERFORACION DEL AREA.

Un enfoque sencillo y benéfico para la optimización de la perforación es el de seleccionar los parámetros de la perforación tales como tipo de barrena, peso y velocidad de rotación para asegurar que los ritmos de penetración y el costo por metro igualen o mejoren el promedio de perforación obtenido en el área.

Con los datos de campo necesarios se requiere menos de una hora de esfuerzo para lograrlo, pudiéndose ahorrar fácilmente, en la mayoría de los casos, de un 10 a un 30% en los costos de perforación.

El proceso de esta técnica es simple y consiste de 5 pasos básicos:

1. Seleccionar los pozos de correlación.
2. Obtener los registros de barrenas de los pozos de correlación.
3. Determinar el costo del equipo para el pozo proyectado.
4. Calcular el costo de perforación por cada corrida de barrena de los pozos de correlación.
5. Seleccionar las condiciones de operación y el tipo de barrena que proporcionen el costo por metro más bajo.

Como un ejemplo suponga que los pozos A y B son los pozos de correlación para un pozo propuesto. Los cálculos del costo por metro se realizaron y se encuentran graficados en la Figura II.3.

De la gráfica es claro que el pozo A tuvo un menor costo de perforación en las secciones superior e inferior del pozo. En tanto que el pozo B tuvo un costo menor en la sección intermedia.

Por lo tanto, los tipos de barrena, pesos y velocidades de rotación para el pozo propuesto deberán de ser similares al pozo A o B en los respectivos segmentos en los cuales se tuvieron el menor costo por metro.

SELECCION DEL MINIMO COSTO
(IGUALANDO EL PROMEDIO DEL AREA)

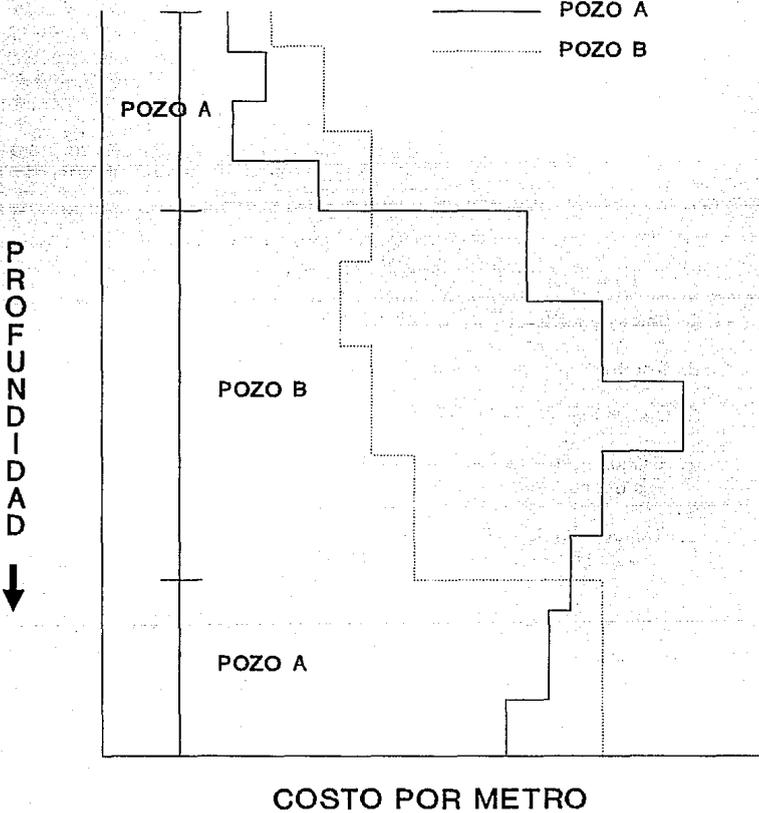


Fig II.3 IGUALANDO EL PROMEDIO DE PERFORACION DEL AREA

II.4.2 CONVERSION DEL TIPO DE BARRENA.

El proceso de decisión para el cambio de barrenas es relativamente fácil si se conoce el comportamiento de las barrenas en un área dada; es decir, cuando se tienen disponibles los registros de barrenas se puede comparar la operación entre barrenas de diferente tipo. En este caso, la selección de la barrena es directa.

Sin embargo si no se dispone de datos de barrenas similares a las que se pretenden emplear, es necesario realizar un análisis para determinar cual será el comportamiento requerido por la nueva barrena para que iguale el costo de las barrenas empleadas en el área. Es decir, se debe calcular si una barrena más cara puede reducir o igualar el costo de una barrena estándar, por el hecho de que la nueva barrena sea capaz de reducir el tiempo de perforación y perforar más rápido.

Cuando se desea saber si una barrena nueva puede sustituir a una barrena de las empleadas en el área, se debe realizar el siguiente análisis:

1. Se obtiene la información necesaria de los datos de campo de las barrenas y de los datos proporcionados por el fabricante sobre el comportamiento esperado de la barrena nueva.
2. Calcular el costo por metro para la sección perforada por la barrena usada.
3. Determinar el ritmo de penetración requerido por la barrena usada para igualar el costo por metro obtenido por la barrena anterior.
4. Comparar el ritmo de penetración calculado en el paso 3 con casos reales de campo en el área considerada. Si la comparación muestra que el ritmo de penetración no puede obtenerse, entonces se debe de correr una barrena similar a la anterior.

II.4.3 ANALISIS DE BREAKEVEN O DE IGUAL COMPORTAMIENTO.

Los análisis de Breakeven consisten en determinar la operación de una barrena a fin de obtener el mínimo costo por metro que las barrenas de comparación. Se basa en la suposición de que la barrena nueva o de prueba es capaz de igualar el ritmo de penetración de las barrenas de comparación.

Denominando con C_1 el costo por metro de las barrenas de comparación, se tiene:

$$C_1 = \frac{C_{b1} + C_r (T_1 + Tr_1)}{Y_1} \dots (II.6)$$

Denominando con el subíndice 2 a los parámetros de la barrena nueva o de prueba queda:

$$C_2 = \frac{C_{b2} + C_r (T_1 + Tr_2)}{Y_2} \dots (II.7)$$

Por lo tanto:

$$C_2 = \frac{C_{b2} + C_r (T_1 + Tr_2)}{R_2 Tr_2} \dots (II.8)$$

Despejando Tr_2 se tiene:

$$Tr_2 = \frac{C_{b2} + C_r T_1}{C_2 R_2 - C_r} \dots (II.9)$$

Y para igualar, el costo de las barrenas de comparación se establece que $C_1 = C_2$ y además la suposición de $R_1 = R_2$, por lo tanto:

$$Tr_2 = \frac{C_{b2} + C_r T_1}{C_1 R_1 - C_r} \dots (II.10)$$

Donde:

- Tr_2 = *Tiempo de rotación de la barrena de prueba* (hrs)
- C_{b2} = *Costo de la barrena de prueba* (\$)
- C_r = *Costo del equipo* (\$/hr)
- T_v = *Tiempo de viaje* (hrs)
- C_1 = *Costo de perforación de la barrena de comparación* (\$/m)
- R_1 = *Ritmo de penetración de la barrena de comparación* (m/hr)

Una vez que el tiempo de rotación de la barrena de prueba se ha determinado se puede obtener el intervalo que dicha barrena perforará:

$$Y_2 = R_1 T_{r2} \dots (II.11)$$

Sin embargo, las barrenas de diferente tipo raramente perforan a la misma velocidad de penetración. Por ejemplo, en las mismas condiciones de peso sobre barrena y de velocidad de rotación, las barrenas de insertos a menudo perforan a menor velocidad que las barrenas de dientes.

Para eliminar esta suposición, en la ecuación utilizada para determinar Tr_2 , es recomendable variar el ritmo de penetración R_1 en porcentajes menores y/o mayores. De aquí es posible determinar si la barrena de prueba es capaz de igualar o mejorar la operación de las barrenas de comparación.

Para facilitar la decisión de correr la barrena de prueba, se puede construir una gráfica de R contra Tr_2 o Y_2 .

La curva resultante, denominada de Breakeven o de igual comportamiento, indica las condiciones necesarias para igualar el costo de la barrena de comparación.

Si es posible conocer la operación estimada de la barrena de prueba (R_2 , Tr_2 o Y_2), de acuerdo con la información de los proveedores, catálogos, experiencias reportadas en la literatura, etc. Entonces, graficando dicho punto en la gráfica de Breakeven se puede decidir si la barrena de prueba se corre o no.

Si el punto cae por encima de la curva de Breakeven, entonces la corrida de la barrena puede ser económica. Si cae por abajo de la curva,

SELECCION DEL MINIMO COSTO
ANALISIS DE BREAKEVEN

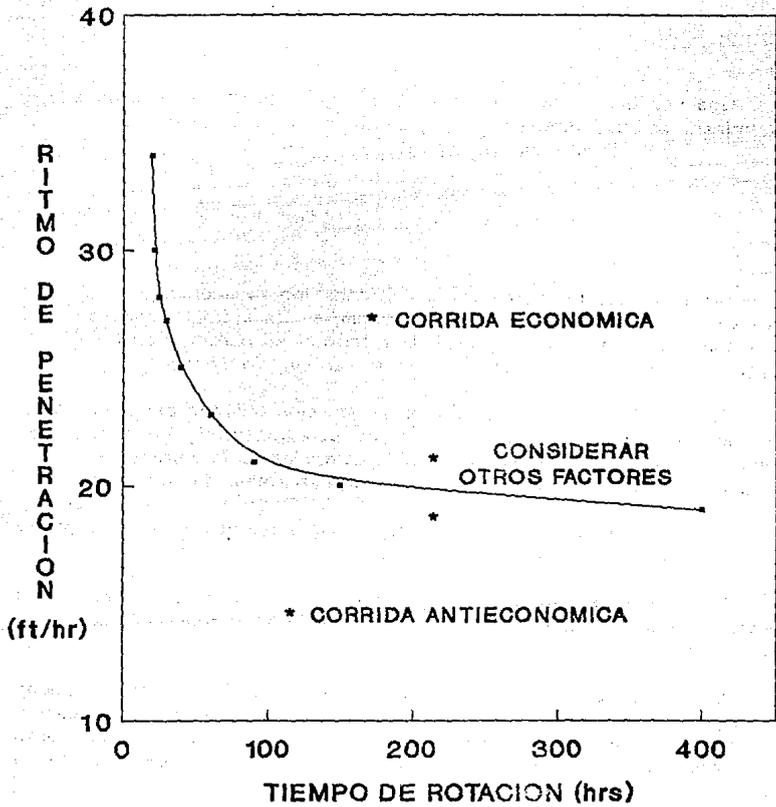


Fig II.4 ANALISIS DE IGUAL COMPORTAMIENTO

entonces la corrida será antieconómica.

Si cae junto a la curva es necesario considerar otros factores para igualar el costo por metro de la barrena (Fig II.4).

Si se tiene un valor negativo o muy grande de Tr_2 indica que a esa velocidad de perforación, la barrena de prueba nunca igualará el costo de la barrena de comparación.

II.5 TERMINACION DE LA CORRIDA DE LA BARRENA.¹⁰

Siempre existe incertidumbre para saber cuando es el mejor momento para terminar la corrida de una barrena y comenzar las operaciones para cambiarla por una nueva.

Lo ideal sería mantener a la barrena perforando, solamente el tiempo que pueda perforar óptimamente, lo que nos permitiría obtener un menor costo de perforación. Un punto importante para lograrlo es la estimación del momento en que la barrena estará completamente gastada (en base a la evaluación del sistema de corte, rodamientos y calibre).

Puede ser aconsejable, terminar la corrida de la barrena antes de que se desgaste cuando:

1. Los daños a la barrena se incrementan rápidamente y el ritmo de penetración baja.
2. Se incrementa el torque requerido para girar la barrena.

Cuando la barrena en uso empieza a mostrar un desgaste notorio en el sistema de rodamiento y el torque tiende a incrementarse (al empezar a trabarse los conos) y con el apoyo de la experiencia del perforador, así como en el análisis de los parámetros de perforación, se puede optar por sacar la barrena.

Sin embargo, la barrena adecuada para un área dada se selecciona de tal forma que la estructura de corte se desgaste más rápidamente que los baleros. Si esto ocurre, entonces la decisión de sacar una barrena se basa principalmente en criterios que consideren el costo por metro perforado (si es que no ocurre un cambio de formación).

En caso de existir variaciones litológicas, solamente se podrá determinar la vida óptima de la barrena después de que el pozo ha sido perforado.

Esta información servirá de apoyo para definir las terminaciones de las corridas de barrenas en pozos vecinos, los que pueden perforarse alternando las barrenas que obtuvieron los mejores resultados en los diferentes estratos de los pozos antes perforados (pozos de correlación).

En muchas ocasiones las corridas de las barrenas se determinan inadecuadamente debido a las siguientes causas:

- a) Antes de que la barrena llegue a operar a su mínimo costo y con desgaste mínimo.
- b) Barrenas totalmente gastadas, las cuales debido a su desgaste, perforan muy lentamente, con un elevado costo por metro.

II.5.1 TIEMPO OPTIMO PARA SACAR LA BARRENA (T*).

La ecuación presentada en esta sección tiene la ventaja de predecir, con mucha exactitud el tiempo en que debe sacarse la barrena, siempre y cuando la perforación se realice en formaciones homogéneas.

Partiendo de la ecuación del costo por metro perforado:

$$C = \frac{C_b + C_r [T_t + T_r]}{F} \dots (II.4)$$

Diferenciando ambos lados de la ecuación II.4, se tiene:

$$\frac{\partial C}{\partial T_r} = \frac{C_r}{F} - \frac{[C_b + C_r (T_t + T_r)] (F / T_r)}{F^2} \dots (II.12)$$

Por otra parte sabemos que el intervalo perforado es una función del ritmo de penetración:

$$F = \int_0^t R dt \dots\dots (II.13)$$

Lo cual implica que

$$\frac{\partial F}{\partial Tr} = R \dots\dots (II.14)$$

Si definimos a T* como el tiempo en el que el valor del costo por metro es mínimo, entonces tenemos:

$$\frac{\partial C}{\partial Tr} = 0 \dots\dots (II.15)$$

Así

$$\frac{\partial C}{\partial Tr} = 0 = \frac{Cr}{F(T^*)} - \frac{[Cb + Cr (Tl + Tr)] R(T^*)}{F(T^*)^2} \dots\dots (II.16)$$

Si resolvemos la ecuación II.16 para T*, obtenemos:

$$T^* = \frac{F(T^*)}{R(T^*)} - \frac{Cb}{Cr} - Tl \dots\dots (II.17)$$

En agujeros con intervalos largos de litología homogénea, el comportamiento del ritmo de penetración contra el tiempo de rotación generalmente es de tipo exponencial. Así hacemos la siguiente suposición:

$$R = R_0 \text{ EXP } (- KT) \dots (II.18)$$

Por lo tanto

$$F(T^*) = R_0 \int_0^{T^*} \text{EXP } (- KT) dt = \frac{R_0}{k} [1 - \text{EXP } (- KT^*)] \dots (II.19)$$

Sustituyendo el valor de R y F(T*) en la ecuación II.17, el tiempo óptimo para sacar la barrena estará dado por las siguientes ecuaciones:

$$T^* = \frac{1}{k} [\text{EXP } (KT^*) - 1] - \frac{C_b}{C_r} - T_l \dots (II.20 a)$$

$$T^* = \frac{1}{k} \ln \left[1 + k \left(T^* + \frac{C_b}{C_r} + T_l \right) \right] \dots (II.20 b)$$

Para determinar el valor de T*, es necesario aplicar un método de ensaye y error, esto es, uno debe suponer un valor de T* y sustituirlo en el miembro derecho de cualquiera de las ecuaciones anteriores, determinando un nuevo valor de T*. Este nuevo valor de T* debe sustituirse, hasta que el valor converga a la solución buscada, cumpliendo con cierta tolerancia.

El primer valor estimado de T* se basa principalmente en la información obtenida de pozos de correlación y en el tiempo de vida estipulado por las compañías de fabricantes de barrenas.

El valor del parámetro de la formación k se determina por medio del método de mínimos cuadrados:

$$k = \frac{\sum [\ln (R_i)] \sum (T_{ri}) - m \sum [\ln(R_i)(T_{ri})]}{m \sum (T_{ri}^2) - [\sum (T_{ri})]^2} \dots\dots (II.21)$$

Donde:

- R_i = Ritmo de penetración de la barrena (m/hr)
- T_{ri} = Tiempo de rotación de la barrena (hrs)
- m = Número de puntos considerados

Las sumatorias incluyen desde $i = 0$ hasta $i = m$.

Se ha demostrado que la ecuación II.20 b converge más rápido que la ecuación II.20 a.

COSTO POR METRO, TIEMPO DE ROTACION PARA DETERMINAR EL MOMENTO OPTIMO PARA SACAR LA BARRENA

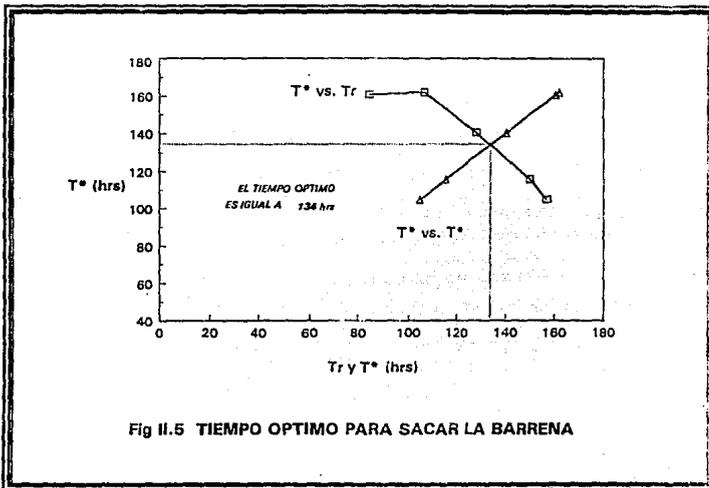
$C_b = \$3,500$ $C_r = 150$ \$/hr $T_t = 6.5$ hrs

# DE OBSERV.	INTERVALO PERFORADO (pies)	TIEMPO DE ROTACION (hrs)	RITMO DE PENETRACION (pies/hr)	COSTO POR PIE (\$/pie)	TIEMPO OPTIMO (T*) (hrs)
1	289	18.00	16.1	24.83	-
2	674	41.00	16.7	15.76	-
3	969	64.80	12.4	14.64	-
4	1274	84.50	15.4	13.46	180.5
5	1482	106.50	13.5	13.80	161.9
6	1739	128.50	11.7	13.66	140.4
7	1937	150.30	9.1	13.95	115.6
8	1994	157.00	8.2	14.41	104.8

Tabla II.8

Para determinar el momento en el que la barrena debe ser sacada, es necesario efectuar las gráficas de T^* vs. T_r y de T^* vs. $T_r = T^*$, cuya intersección dara el tiempo exacto en que terminara la corrida de la barrena.

La gráfica de la Figura II.5 considera los datos mostrados en la Tabla II.8, en la que se empleó el criterio del tiempo óptimo a fin de obtener el mínimo costo de perforación.



En la Figura anterior podemos ver que el tiempo óptimo será de 134 hrs., que es donde se intersectan las curvas de T* vs. Tr y de T* vs. T*.

III

MODELOS DE PERFORACION MAS COMUNES

III.1 MODELOS DE PERFORACION.

Los modelos matemáticos que simulan el comportamiento de la perforación de pozos petroleros, se empezaron a desarrollar durante el período llamado Científico (1948-1968). En esta época se efectuaron los primeros trabajos encaminados a optimizar los costos de perforación.

Las teorías sobre la perforación al mínimo costo están basadas en una combinación de datos históricos y técnicas de predicción empíricas para seleccionar la combinación óptima de peso sobre la barrena y velocidad de rotación.

En general, la obtención del mínimo costo de perforación no es otra cosa que un compromiso entre dos respuestas opuestas:

- i) El ritmo de penetración puede ser incrementado mediante un incremento en el Peso sobre la barrena y la velocidad de rotación o ambos.
- ii) Un incremento en el peso sobre la barrena o en la velocidad de rotación o ambos producirá una reducción en la vida útil de la barrena.

Además, un cambio en el peso sobre la barrena y/o en la velocidad de rotación produce diferentes resultados sobre el ritmo de penetración y el ritmo de desgaste de la barrena, dependiendo de la condición de la barrena en el momento en que esos cambios son realizados.

La obtención del costo mínimo de perforación requiere de una evaluación cuantitativa de las variables involucradas.

Varias formas de los modelos matemáticos básicos se han sugerido, pero todos ellos están expresados en cuatro relaciones básicas:

- i) Ecuación del costo de perforación.

- ii) Ecuación del ritmo de penetración
- iii) Ecuación del ritmo de desgaste del diente (estructura de corte)
- iv) Ecuación del ritmo de desgaste del balero (rodamientos)

La solución a estas cuatro relaciones básicas está sujeta a varias suposiciones:

1. El costo de perforación es la suma del costo de la barrena, el costo de rotación y el costo de viaje.
2. Las barrenas de diamante policristalino compacto (PDC) y de diamantes no están incluidas.
3. La vida de la barrena se encuentra limitada ya sea por la vida del diente, la vida del balero o una combinación de los factores operacionales que hacen necesario sacar la barrena antes de que está se desgaste totalmente.
4. La hidráulica de perforación es la adecuada y no limita el ritmo de penetración.
5. Las consideraciones del peso sobre la barrena y velocidad de rotación excluyen problemas del agujero.
6. Las características de perforabilidad de una formación pueden expresarse como un valor promedio para un intervalo perforado.
7. Las expresiones matemáticas y sus derivadas son correctas

A continuación se presentan los modelos de perforación más comunes, algunos de ellos solo presentan una ecuación del ritmo de penetración como es el caso de los modelos de Somerton, Maurer y Warren y Winters; mientras que los demás incluyen las ecuaciones del ritmo de desgaste en dientes y baleros:

III.2 MODELO DE SOMERTON.

Somerton en 1959,¹ con estudios de laboratorio, determinó una correlación entre el ritmo de penetración y las variables que lo controlan a partir de una igualdad entre dos grupos adimensionales:

$$\frac{dD/dt}{D_b N} = f \left(\frac{W}{D_b^2 + S_d} \right) \dots (III.1)$$

$$\frac{dD}{dt} = C D_b N \left(\frac{W}{D_b^2 + S_d} \right)^{\alpha} \dots (III.2)$$

Donde:

- dD/dt = Ritmo de penetración (pg/min)
- C = constante de proporcionalidad
- D_b = Diámetro de la barrena (pgs)
- N = Velocidad de rotación (rpm)
- W = Peso sobre la barrena (lbs)
- S_d = Resistencia a la perforación de la roca (lbs/pg²)
- α = Coeficiente a determinar

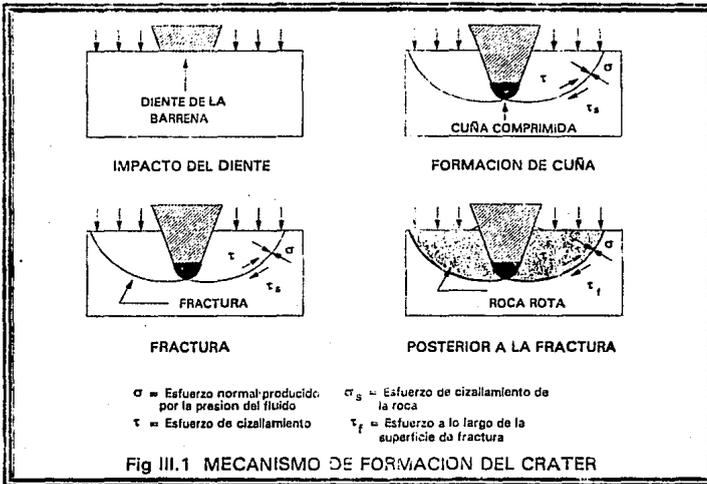
A partir de pruebas de laboratorio y utilizando una barrena de 1.25 pgs de diámetro con 2 conos, el autor llegó a la siguiente expresión:

$$\frac{dD}{dt} = 1.5 D_b N \left(\frac{W}{D_b^2 + S_d} \right)^2 \dots (III.3)$$

III.3 MODELO DE MAURER.

Maurer en 1962,² derivó una ecuación para el ritmo de penetración, estudiando el mecanismo de formación de un cráter en la roca, debido a la acción de los dientes de la barrena y suponiendo una perfecta limpieza, esto es, la condición en la cual todos los recortes generados son removidos del cráter.

Cuando una barrena impacta una roca, esta se deforma elásticamente hasta que el esfuerzo de compresión de la roca se excede, en este tiempo una porción de roca triturada se forma debajo del diente (Fig III.1). Mientras se aplica una fuerza adicional al diente, el material triturado se comprime y ejerce altas fuerzas laterales sobre el material sólido alrededor de la roca triturada. Cuando estas fuerzas son suficientemente altas, se comienzan a formar fracturas abajo del diente y a propagarse a la superficie libre de la roca, hasta que esta se rompe.



Maurer efectuó sus cálculos a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4}{\pi D b^2} \frac{dV}{dt} \dots\dots (III.4)$$

Donde:

- dD/dt = Ritmo de penetración
- Db = Diámetro de la barrena
- V = Volumen de roca removida
- t = Tiempo

Cuando toda la roca es removida de los cráteres formados por los diferentes dientes de la barrena (limpieza perfecta) :

$$V = n V_c \dots\dots (III.5)$$

Donde:

n = número de dientes
 V_c = Volumen del cráter

Como el volumen total de cada cráter es independiente del tiempo, la derivada de la ecuación (III.5) en relación con el tiempo es:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dn}{dt} V_c \dots\dots (III.6)$$

La variación del número de impactos de los dientes con respecto al tiempo estara dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dn}{dt} = I N \dots\dots (III.7)$$

Donde:

I = Número de impactos en la roca por revolución
 N = Velocidad de rotación

La fuerza efectiva actuando en la roca esta dada por:

$$F - F_0 = \frac{(W - W_0)}{nr} \dots\dots (III.8)$$

Donde:

F = Fuerza actuando en la barrena.

F_0 = Fuerza necesaria para iniciar el cráter.

W = Peso sobre la barrena.

W_0 = Peso sobre la barrena necesario para iniciar la formación del cráter.

nr = Número de dientes en contacto con la roca cuando ocurre la máxima fuerza por diente.

El volumen del cráter formado es directamente proporcional al cuadrado de la fuerza efectiva aplicada e inversamente proporcional al cuadrado de la resistencia a la perforación de la roca:

$$V_c \propto \frac{(F - F_0)^2}{Sd^2} \dots\dots (III.9)$$

Combinando las ecuaciones (III.4) a (III.9) se llega a:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{I N (W - W_0)^2}{nr^2 db^2 Sd^2} \text{ para } W \geq W_0 \dots\dots (III.10)$$

$$\frac{dD}{dt} = 0 \text{ para } W < W_0 \dots\dots (III.11)$$

La ecuación (III.11) solo es una aproximación ya que una roca puede ser removida por abrasión y dD/dt se vuelve realmente cero solamente cuando $W=0$.

Cuando se diseña una barrena para un tipo de formación dado, el tamaño, forma y espaciamiento de los dientes son independientes del tamaño de la barrena. Por lo tanto la constante I varía aproximadamente con el área y

nr con el diámetro de la barrena

Así, el término l/nr^2 se puede asumir como independiente del diámetro de la barrena y la ecuación (III.10) se convierte en:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{N (W - W_0)^2}{Db^2 Sd^2} \quad \text{para } W \geq W_0 \dots\dots \text{(III.12)}$$

Como $W \gg W_0$ la ecuación (III.12) se reduce a:

$$\frac{dD}{dt} = k \frac{N W^2}{Db^2 Sd^2} \dots\dots \text{(III.13)}$$

La cual es la fórmula del ritmo de penetración para una limpieza perfecta y k es una constante de proporcionalidad.

III.4 MODELO DE YOUNG.

F.S. Young,³ en 1969 propuso las ecuaciones de su modelo tomando como referencia el trabajo de Edwards. Esto se debió a que Edwards, en su trabajo, deja abierta la función $f(H)$ que define el efecto de desgaste de los dientes sobre el ritmo de penetración y desgaste de la barrena.

La ecuación del ritmo de penetración propuesta es la siguiente:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K (W - M) N \lambda}{(1 + C_2 h)} \dots\dots \text{(III.14)}$$

Donde:

$$dD/dt = \text{Ritmo de penetración} \quad (\text{pies/hr})$$

- K = *Parámetro de perforabilidad de la roca.*
- W = *Peso sobre la barrena.*
- M = *Parámetro de peso sobre la barrena.*
- N = *Velocidad de rotación de la barrena (rpm).*
- λ = *exponente de la velocidad de rotación de la barrena*
- C_2 = *Parámetro de desgaste del diente*
- h = *Altura del diente normalizado ($h=1$ para diente nuevo y $h=0$ para diente totalmente desgastado)*

Esta ecuación expresa el ritmo de penetración como una función del peso sobre la barrena, velocidad de rotación y condición del diente. Los valores de M , λ y K se deben determinar experimentalmente en la formación perforada.

La constante C_2 es un valor histórico y se usa para expresar la magnitud en la reducción del ritmo de penetración debido al desgaste del diente de la barrena.

El ritmo de desgaste del diente se expresa por:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Af (PN + qN^3)}{(D_2 - D_1 W) (1 + C_1 h)} \dots\dots (III.15)$$

Donde:

- dh/dt = *Ritmo de desgaste del diente.*
- Af = *Parámetro de abrasividad.*
- P, q, D_1, D_2 y C_1 = *Parámetros que dependen del tipo y diámetro de la barrena.*

Los parámetros P , q , C_1 , C_2 , D_1 y D_2 se listan de acuerdo al tipo y diámetro de la barrena en la tabla III.1.

El ritmo de desgaste de los cojinetes esta dado por la ecuación:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{N W^\alpha}{b} \dots\dots (III.16)$$

PARAMETROS DEL DESGASTE DEL DIENTE

CODIGO IADC	GRUPO DE OPTIMIZACION	PARAMETRO		
		P	Q	C1
1-1 a 1-2	1	2.5	0.0001088	7
1-3	2	2	0.000087	6
1-4	3	2	0.000087	6
2-1	4	1.5	0.0000653	5
2-2	5	1.2	0.0000522	4
2-3	6	1.2	0.0000522	4
2-4	7	0.9	0.0000392	3
3-1	8	0.65	0.0000283	2
3-2 a 4-4	9	0.5	0.0000218	2

PARAMETROS DEL DIAMETRO DE LA BARRENA

DIAMETRO (pgs)	D1	D2
6 1/4	0.088	5.5
6 3/4	0.083	5.61
7 7/8	0.074	5.94
8 5/8	0.071	6.11
9 1/2	0.0665	6.325
9 5/8	0.066	6.38
9 7/8	0.065	6.44
10 3/4	0.062	6.68
12 1/4	0.058	7.15
13 3/4	0.0055	7.56

Para diámetros que no se indican:

$D1 = 0.26 Dbna^{0.5975}$
 $D2 = 2.6 Dbna^{0.4}$

Tabla III.1

Donde:

- $dB/dt =$ Ritmo de desgaste del cojinete.
- $\alpha =$ Exponente del peso sobre la barrena.
- $b =$ Constante de los cojinetes.

La constante de los cojinetes b se determina históricamente y varía con la composición del fluido de perforación, contenido de sólidos, diámetro y tipo de barrena. El exponente del peso α , relaciona el ritmo de desgaste del cojinete con el peso sobre la barrena y se ha determinado experimentalmente (1.5 para fluidos de perforación comunes).

Integrando la ecuación (III.14) para determinar el intervalo perforado (F_f) e integrando también las ecuaciones (III.15) y (III.16) se obtienen los tiempos de desgaste de dientes y cojinetes respectivamente. Debido a que la barrena falla por desgaste tanto en dientes como en cojinetes, se debe adoptar el menor tiempo (T_B) entre estos dos casos. Conocido F_f y T_B se puede calcular el costo por metro C_f a partir de la ecuación de costo por metro perforado, ya que los demás parámetros son conocidos.

A partir de esto se puede realizar un algoritmo que varíe el peso (W) y la velocidad de rotación (N) para un mismo tipo y diámetro de barrena, de modo que determine el peso y velocidad de rotación que minimizen el costo por metro perforado (C_f).

Dividiendo la ecuación (III.14) entre la (III.15) se obtiene una ecuación diferencial que relaciona el avance en la perforación con el desgaste del diente (dD/dh). Si se integra esta ecuación obtendremos una ecuación que nos dará el avance de penetración cuando la vida útil de la barrena se encuentra limitada por el desgaste en el diente.

$$F_{fd} = \frac{KN(W-M)(D_2 - D_1W)}{Af(PN + qN^3)} \left[\frac{C_1}{C_2} h + \frac{C_2 - C_1}{C_2^2} \ln(1 + C_2 h) \right]$$

Con este mismo procedimiento, utilizando las ecuaciones (III.14) y (III.16) se obtiene una relación entre el avance y el desgaste de la barrena cuando el desgaste de los cojinetes es el factor limitante en la vida útil de la barrena (dD/dB).

$$F_{fc} = \frac{K N (W - M) (D_1 - D_2 W)}{A_f (PN + qN^3) C_2} \left[X - 1 + \frac{C_2 - C_1}{C_1} \ln \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_1} X \right) \right]$$

Donde:

$$X = \left[1 + \frac{2 C_1 b A_f (PN + qN^3)}{N W^\alpha (D_1 - D_2 W)} \right]^{0.5}$$

El tiempo de perforación se calcula integrando la ecuación (III.15) o (III.16) dependiendo del factor limitante (Cojinetes o dientes) en la vida útil de la barrena.

La determinación de los parámetros b, K, C₂, A_f, M, y λ se basa en datos de la barrena anterior.

La constante del cojinete b puede ser obtenida a partir de la ecuación (III.16) de la siguiente forma:

$$b = \frac{T_b N W^\alpha}{B} \dots\dots (III.17)$$

El parámetro de perforabilidad de la formación k se calcula con la perforabilidad media de la formación, estableciendo un desgaste medio de los dientes a partir de la ecuación (III.14).

$$K = \frac{Ff (1 + C_2 h/2)}{T (W - M) N} \dots\dots (III.18)$$

Donde:

T = *Tiempo estimado para desgastar el diente a! 50%* (horas)

El parámetro de desgaste del diente C_2 se obtiene a partir del ritmo de penetración inicial (R_0) cuando el desgaste del diente es cero ($h = 0$) y el ritmo de penetración final (R_f) con el desgaste h de la barrena anterior. Estableciendo estas dos condiciones en la ecuación (III.14) y dividiendo ambas ecuaciones se obtiene:

$$C_2 = \frac{R_0 - R_f}{R_f h f} \dots\dots (III.19)$$

El parámetro de abrasividad de la formación A_f se calcula a partir de la ecuación (III.15):

$$A_f = \frac{(D_2 - D_1 W)}{T_b (PN + qN^3)} \left(h + \frac{C_1 h^2}{2} \right) \dots\dots (III.20)$$

El parámetro M del peso sobre la barrena exige una prueba del ritmo de penetración de 5 puntos (prueba de 5 pasos), efectuado con la barrena anterior. La secuencia de esta prueba se muestra en la figura III.2, como entrada se tiene un peso W_1 y una velocidad de rotación N_1 que daran el ritmo de penetración R_1 , después lo que se hace es aplicar un peso W_2 y una velocidad de rotación N_2 y perforar un cierto intervalo (30 cm.) y anotar su ritmo de penetración R_2 . Repetir esta prueba con el mismo peso W_2 y una velocidad N_3 anotando el ritmo de penetración R_3 . Con el peso W_4 y la velocidad N_3 anotar el ritmo R_4 . Manteniendo el peso W_3 y con la velocidad N_2 registrar el ritmo R_5 . Para rectificar, repetir la prueba para W_1 y N_1 y anotar el ritmo R'_1 . Si no se tiene un cambio brusco de litología R'_1 debe ser aproximadamente igual a R_1 , para que la prueba sea aceptada R_1 y R'_1 deben estar dentro de una tolerancia fijada (15% aproximadamente).

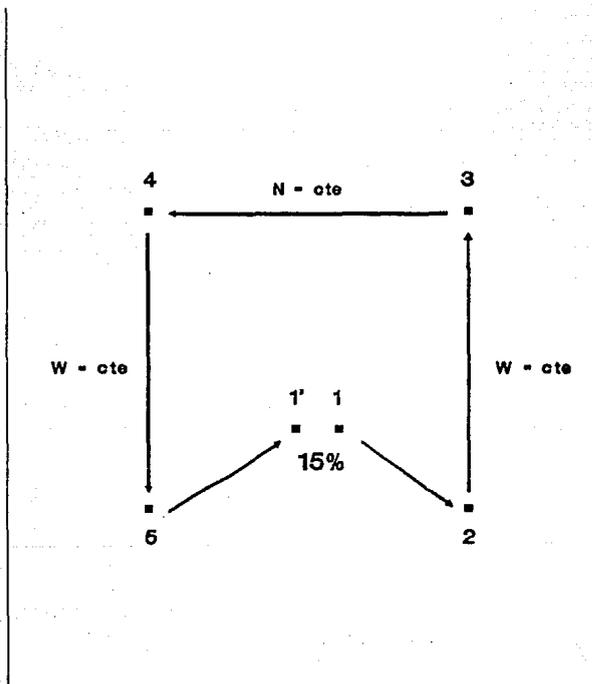
Colocando los datos obtenidos en un sistema cartesiano de R vs W (Fig III.3) y uniendo R_2 con R_5 (recta M_1) y R_3 con R_4 (recta M_2), además sabemos que el ritmo de penetración se supone proporcional al peso sobre la barrena, resultando la siguiente ecuación:

$$W = \sigma R + M \dots\dots (III.21)$$

CONDICIONES DE LA PRUEBA

$$\left[\frac{R1 - R1'}{R1} \right] = 15\%$$

VELOCIDAD DE ROTACION



PESO SOBRE LA BARRENA

Fig. III.2 PRUEBA DE LOS 5 PASOS.

Donde la pendiente a , es igual a $\Delta W / \Delta R$. Más específicamente para una velocidad de rotación N_1 , se tiene:

$$W = R \left(\frac{\Delta W}{\Delta R} \right) + M_1 \dots\dots \text{(III.22)}$$

Rearreglando:

$$M_1 = W - R \left(\frac{\Delta W}{\Delta R} \right) \dots\dots \text{(III.23)}$$

Para el punto 2 a una velocidad de rotación N_1 constante, $W = W_2$ y $R = R_2$.

$$M_1 = W_2 - R_2 \left(\frac{W_2 - W_5}{R_2 - R_5} \right) \dots\dots \text{(III.24)}$$

Para el punto 3 a una velocidad de rotación N_2 constante, $W = W_3$ y $R = R_3$.

$$M_2 = W_3 - R_3 \left(\frac{W_3 - W_4}{R_3 - R_4} \right) \dots\dots \text{(III.25)}$$

El exponente λ de la velocidad de rotación de la barrena se obtiene también a partir de la prueba de 5 puntos, haciendo:

$$\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^\lambda = \frac{R_1}{R_2} \dots\dots \text{(III.26)}$$

W (1000 lbs)

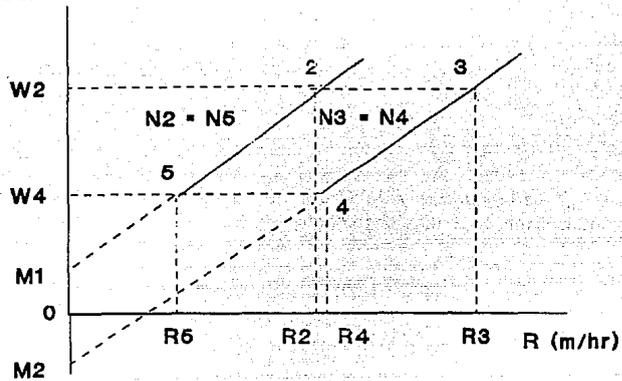


Fig. III.3 DETERMINACION GRAFICA DE M.

R (m/hr)

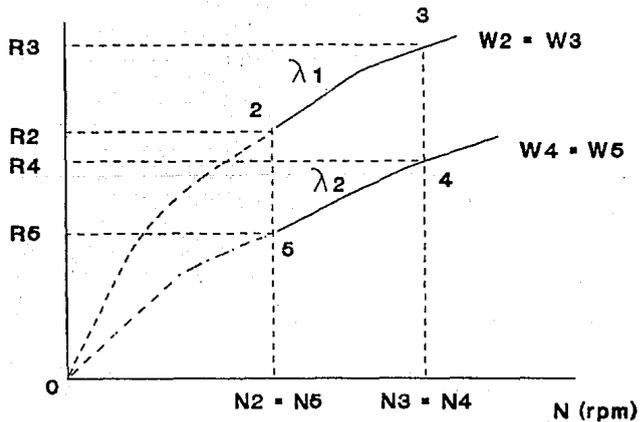


Fig. III.4 DETERMINACION DE LAMBDA.

Sacando logaritmo natural a ambos lados de la ecuación anterior y resolviendo para λ tenemos:

$$\lambda = \frac{\ln (R_1 / R_2)}{\ln (N_1 / N_2)} \dots\dots \text{(III.27)}$$

Refiriendonos a la figura III.4 para un peso W constante, λ_1 y λ_2 se determinan de la siguiente forma:

$$\lambda_1 = \frac{\ln (R_3 / R_2)}{\ln (N_3 / N_2)} \qquad \lambda_2 = \frac{\ln (R_4 / R_5)}{\ln (N_4 / N_5)}$$

Los valores promedio de λ y M se utilizan para determinar el mínimo costo por metro perforado, con las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \qquad M = \frac{M_1 + M_2}{2}$$

III.5 MODELO DE BOURGOYNE Y YOUNG.

Bourgoyne y Young en 1974,⁴ desarrollaron un modelo de perforación con base en 8 parámetros que afectan el ritmo de penetración. Este modelo se lleva a cabo a través de un análisis de regresión lineal múltiple a partir de datos de perforación tomados de intervalos cortos.

El modelo de perforación que permite predecir el efecto de los diferentes parámetros de perforación, X_j , sobre el ritmo de penetración, dD/dt , esta dado por:

$$\frac{dD}{dt} = \text{EXP} \left(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j \right) \dots\dots \text{(III.28)}$$

Donde:

- a_1 = Efecto del esfuerzo de formación.
- dD/dt = Ritmo de penetración (pies/hr).
- a_j = Coeficientes a determinar.
- X_j = Parámetros de perforación.

Ya que la ecuación anterior es lineal, los coeficientes a_j se determinan usando un análisis de regresión lineal múltiple con datos de campo.

A continuación se presenta un Análisis de cada uno de los efectos incluidos en este modelo.

Efecto del esfuerzo de formación.

La constante a_1 representa el efecto del esfuerzo de la formación en el ritmo de penetración. Es inversamente proporcional al logaritmo natural del cuadrado del parámetro de resistencia de la roca discutido por Maurer.

Efecto de Compactación.

Los términos a_2X_2 y a_3X_3 representan el efecto de compactación sobre el ritmo de penetración. X_2 se define por:

$$X_2 = 10,000 - D \dots\dots \text{(III.29)}$$

Donde:

- X_2 = Parámetro de compactación normal.
- D = Profundidad (pies).

Así se asume un decremento exponencial del ritmo de penetración con respecto a la profundidad en una formación compactada normalmente. X_3

representa un incremento exponencial en el ritmo de penetración con respecto al gradiente de presión de poro y esta dada por:

$$X_3 = D^{0.69} (g_p - 9.0) \dots\dots \text{(III.30)}$$

Donde:

X_3 = *Parámetro de subcompactación.*
 g_p = *Equivalente en presión de poro (lb/gal).*

El término $EXP [a_2X_2 + a_3X_3]$, se ha normalizado a un valor de 1 para una formación compactada normalmente a 10,000 pies.

Efecto de presión diferencial.

El término a_4X_4 representa el efecto de presión diferencial en el fondo del agujero sobre el ritmo de penetración. X_4 se define por:

$$X_4 = D (g_p - p_c) \dots\dots \text{(III.31)}$$

Donde:

X_4 = *Parámetro de presión diferencial*
 p_c = *Peso equivalente del fluido de perforación en circulación (lb/gal).*

Este término asume un decremento exponencial en el ritmo de penetración a medida que se incrementa la presión en el fondo del agujero.

Efecto del peso y diámetro de la barrena W/d.

El término a_5X_5 representa el efecto del peso y diámetro de la barrena con respecto al ritmo de penetración. X_5 se define por:

$$X_5 = \ln \left(\frac{(W/Db) - (W/Db)_t}{4.0 - (W/Db)_t} \right) \dots\dots \text{(III.32)}$$

Donde:

X_5 = *Parámetro de peso sobre la barrena.*

W = *Peso sobre la barrena (Klbs)*

Db = *Diámetro de la barrena (pgs).*

$(W/Db)_t$ = *Peso sobre la barrena por pulgada, necesario para comenzar a perforar. (Klbs).*

En esta ecuación se asume que el ritmo de penetración es directamente proporcional a $(W/Db)^{a_5}$. El término $EXP (a_5 X_5)$ esta normalizado a 1 para 4000 lbs por pg. de diámetro de barrena. $(W/Db)_t$ se debe calcular con pruebas de perforación.

Efecto de la velocidad de rotación.

El término $a_6 X_6$ representa el efecto de la velocidad de rotación sobre el ritmo de penetración. X_6 se define por:

$$X_6 = \ln \left(\frac{N}{100} \right) \dots\dots \text{(III.33)}$$

Donde:

X_6 = *Parámetro de rotación de la barrena.*

N = *Velocidad de rotación de la barrena (rpm).*

Por lo tanto, se asume que el ritmo de penetración es directamente proporcional a N^{a_6} .

Efecto de desgaste del diente.

El término $a_7 X_7$ indica el efecto de desgaste del diente sobre el ritmo de penetración. X_7 se define por:

$$X_7 = - h \dots (III.34)$$

Donde:

- X_7 = *Parámetro de desgaste del diente.*
- h = *Fración de desgaste del diente, variando de 0 (diente nuevo) a 1 (desgaste total).*

El valor de a_7 depende principalmente del tipo de barrena y en menor grado del tipo de formación. Cuando se tienen barrenas con insertos de Carburo de Tungsteno, el ritmo de penetración no varía significativamente con el desgaste del diente ($a_7 = 0$). El término $EXP (a_7 X_7)$ es 1 cuando h o a_7 es cero.

Efecto de la hidráulica de la barrena.

El término $a_8 X_8$ representa el efecto de la hidráulica de la barrena sobre el ritmo de penetración. X_8 se define por:

$$X_8 = \ln \left(\frac{\rho Q}{350 \mu dn} \right) \dots (III.35)$$

Donde:

- X_8 = *Parámetro hidráulico de la barrena.*
- ρ = *Peso específico del fluido de perforación (lb/gal).*
- Q = *Costo de bombeo (gpm).*
- μ = *Viscosidad aparente a 10,000⁻¹ seg⁻¹ (cp).*
- dn = *Diámetro de las toberas de la barrena (pg).*

La ecuación anterior se basa en los experimentos llevados a cabo por Eckel, este autor encontro que :

$$\frac{dD}{dt} \propto \left(\frac{\rho \cdot q}{\mu \cdot dn} \right)^{0.5} \dots\dots (III.36)$$

Ya que μ es la viscosidad aparente a 10,000 seg⁻¹ y no es una medición rutinaria, μ debe calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\mu = \mu_p + \frac{\tau_y}{20} \dots\dots (III.37)$$

Donde:

μ_p = Viscosidad plástica (cp)
 τ_y = Punto de Cedencia (lb/100 pies²)

Estos autores también proponen un modelo para evaluar la condición de desgaste en el diente y en los cojinetes de una barrena tricónica, a cualquier tiempo t.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H_3}{\tau_H} \left(\frac{N}{100} \right)^{H_1} \left(\frac{(W/Db)_{m\acute{o}x} - 4}{(W/Db)_{m\acute{o}x} - (W/Cb)} \right) \left(\frac{1 + (H_2/2)}{1 + H_2h} \right) \dots\dots (III.38)$$

Donde:

dh/dt = Ritmo de desgaste de los dientes de la barrena.
 $H_1, H_2, H_3, (W/Db)_{m\acute{o}x}$ = Valores tabulados en función del tipo de barrena.
 τ_H = Constante de abrasividad de la formación (hrs).

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{\tau_b} \left(\frac{N}{100} \right) \left(\frac{W}{4Db} \right)^b \dots\dots (III.39)$$

Donde:

$dB/dt =$ Ritmo de desgaste de los cojinetes.

$\tau_b =$ Constante de vida útil de los cojinetes (hrs).

$b =$ Constante tabulada en función del tipo de fluido de perforación y tipo de cojinetes.

Estos autores también proponen una optimización del peso sobre la barrena y velocidad de rotación a un mínimo costo por pie perforado.

La expresión del costo por pie fue definida anteriormente. Para minimizar C_f , se deben calcular F_f y T_r una vez que los otros parámetros ya son conocidos.

El intervalo F_f puede ser calculado como:

$$\frac{dD}{dt} = \text{EXP} \left(a_1 + \sum_{j=2}^6 a_j X_j + a_8 X_8 \right) + \text{EXP} \left(-a_7 h \right) \dots \text{(III.40)}$$

Representando por J_1 todo el término antes del parámetro de desgaste del diente, $\text{EXP} \left(-a_7 h \right)$, de la ecuación (III.40) tenemos:

$$dD = J_1 + \text{EXP} \left(-a_7 h \right) dt \dots \text{(III.41)}$$

La ecuación de desgaste del diente (III.38) puede ser rearreglada para:

$$dt = \frac{\tau_H}{H_3} \left(\frac{100}{N} \right)^{H_1} \left[\frac{(W/Db)_{\text{m} \acute{o}x} - (W/Db)}{(W/Db)_{\text{m} \acute{o}x} - 4} \right] \left[\frac{1}{1 + (H_2/2)} \right] (1 + H_2 h) dh \dots \text{(III.42)}$$

Representando por J_2 todo el término antes de $(1 + H_2 h)$ dh de la ecuación (III.42) se tiene:

$$dt = J_2 (1 + H_2 h) dh \dots (III.43)$$

Sustituyendo (III.43) en (III.41), tenemos:

$$dD = J_1 J_2 [\text{EXP} (-a_7 h)] (1 + H_2 h) dh \dots (III.44)$$

Integrando la ecuación (III.44) se tiene que:

$$Ff = J_1 J_2 \left[\frac{1 - e(-a_7 hf)}{a_7} + \frac{H_2 (1 - \exp(-a_7 hf) - a_7 hf \exp(-a_7 hf))}{a_7^2} \right] \dots (III.45)$$

La ecuación anterior puede utilizarse directamente, para el caso en que el diente falla antes que el balero. En caso de que ocurra lo contrario, es decir que primero se gaste el balero, se tiene que calcular T_b a partir de la integración de la ecuación (III.39):

$$t_b = \tau_b \left(\frac{100}{N} \right) \left(\frac{4Db}{W} \right) b f \dots (III.46)$$

Con t_b calculado se puede estimar el desgaste del diente integrandose la ecuación (III.43):

$$t_b = J_2 \left[hf + \frac{H_2 hf^2}{2} \right] \dots (III.47)$$

Resolviendo la ecuación anterior (III.47) en función de h_f , se tiene que:

$$h_f = \left[\left(\frac{1}{H_2} \right)^2 + \left(\frac{2 \text{ lb}}{H_2 J_2} \right)^{0.5} \right] - \frac{1}{H_2} \quad \dots \text{(III.48)}$$

El valor de h_f calculado en la ecuación (III.48) debe utilizarse en la ecuación (III.45) para el cálculo de F_f en caso de que falle el balero antes que el desgaste total del diente.

III.6 MODELO DE REZA Y ALCOCER.

Reza y Alcocer en 1986,^{5,6} desarrollaron un modelo de perforación a partir de análisis dimensional, utilizando el teorema II de Buckingham.

Los parámetros incluidos en las ecuaciones de ritmo de penetración y desgaste en dientes y baleros son:

- Peso sobre la barrena
- Velocidad de rotación
- Gasto
- Diámetro de la barrena
- Diámetro de las toberas
- Diámetro de los cojinetes
- Viscosidad cinemática del fluido
- Presión diferencial
- Temperatura
- Coeficiente de transferencia de calor

Expresando el ritmo de penetración como una función de 8 parámetros independientes y aplicando el teorema de Buckingham se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{dD}{dt} = k_1 \left[\frac{N d^2}{\mu} \right]^a \left[\frac{N d^3}{Q} \right]^b \left[\frac{E d}{W} \right]^c \left[\frac{\Delta P d}{W} \right]^d \dots (III.49)$$

Donde:

- dD/dt = Ritmo de penetración (pies/min).
- N = Velocidad de rotación (rpm).
- d = Diámetro del balero (pqs).
- μ = Viscosidad cinemática del fluido de perforación (cp).
- Q = Costo de bombeo (gpm).
- E = Dureza de la roca (psi).
- W = Peso sobre la barrena (Klbs).
- ΔP = Diferencial de presión (psi).
- k_1 = Coeficiente de proporcionalidad
- a, b, c y d = Coeficientes a determinar.

Con Análisis dimensional los autores desarrollaron dos expresiones, una para el ritmo de desgaste del diente y otra para el desgaste en los baleros.

$$\frac{dh}{dt} = k_2 \left[\frac{Q}{N D^3} \right]^a \left[\frac{W}{E D b^3} \right]^b \left[\frac{\mu D}{Q} \right]^c \dots (III.50)$$

Donde:

- dh/dt = Ritmo de desgaste del diente
- D_b = Diámetro de la barrena (pqs).
- k_2 = Coeficiente de proporcionalidad
- a, b y c = Coeficientes a determinar.

$$\frac{dB}{dt} = k_3 \left[\frac{f H d}{W d N} \right]^a \left[\frac{\mu}{N d^2} \right]^b \left[\frac{Q}{N d^3} \right]^c \dots (III.51)$$

Donde:

- dB/dt = Ritmo de desgaste de los baleros
- T_f = Temperatura en el fondo del pozo (T)
- H = Coeficiente de transferencia de calor ($Btu / ^\circ F \text{ } pg^2 \text{ } h$)
- k_3 = Coeficiente de proporcionalidad
- $a, b \text{ y } c$ = Coeficientes a determinar

Tomando los logaritmos de las ecuaciones anteriores, se determinan los coeficientes a, b, c y d a través de una regresión lineal.

III.7 MODELO DE WINTERS Y WARREN.

Winters y Warren en 1987,⁷ presentaron un modelo de perforación para barrenas tricónicas relacionando el ritmo de penetración con las condiciones de operación, diseño de barrenas y mecánica de las rocas.

El modelo propuesto es la continuación del modelo de perforación propuesto por Warren en 1981 y 1984, en el que se adicionó el efecto de excentricidad (offset) de la barrena, y la ductilidad de la roca, la que los autores afirman es una de las propiedades de mayor influencia en el rendimiento de la barrena.

La excentricidad del cono es un dato importante en el diseño de barrenas para perforar rocas dúctiles.

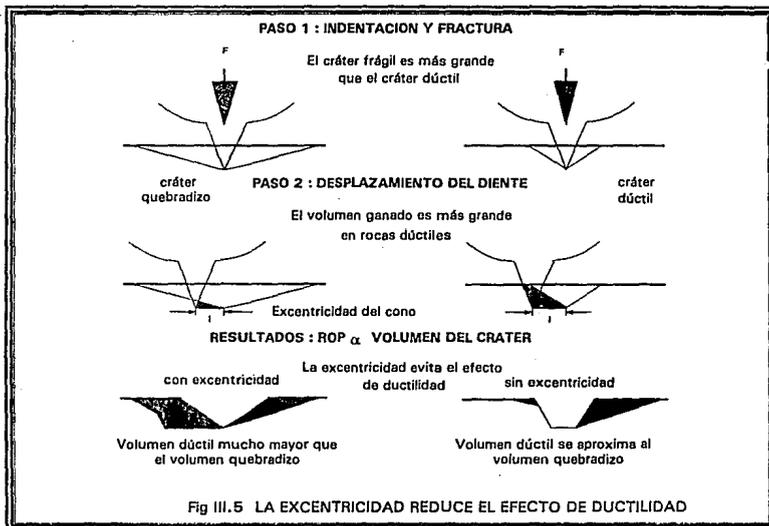
A partir del primer modelo que se emplea en rocas quebradizas (areniscas, calizas, dolomitas), los autores incluyeron los efectos de ductilidad.

$$\frac{1}{dD/dt} = \frac{a S^2 D^3}{N W^2} + \frac{b}{N D} + \frac{c \rho \mu D}{l_m} \dots \text{(III.52)}$$

El primer término de la ecuación anterior describe el ritmo de generación del volumen del cráter debido a los impactos del diente en una formación quebradiza. Esta expresión se basa en numerosas pruebas y modelos teóricos que muestran que el volumen del cráter producido por un

diente es directamente proporcional al cuadrado de la fuerza aplicada al cortador e inversamente proporcional al cuadrado del esfuerzo de la roca (para rocas quebradizas). La ductibilidad puede adicionarse a esta expresión utilizando un análisis teórico de esfuerzos y tensiones generados cuando un diente penetra un material plástico (Fig III.5). Outmans concluyó que antes de que ocurra la fractura de la roca, se tiene un flujo de material plástico en la vecindad del diente de la barrena que es directamente proporcional al cuadrado de la fuerza del diente e inversamente proporcional al cuadrado del esfuerzo de la roca. Suponiendo que el volumen de roca fracturada es directamente proporcional al volumen de roca deformado e inversamente proporcional a la ductilidad de la roca, el primer término de la ecuación III.52 se convierte en:

$$\frac{1}{V_i} = \frac{\sigma S D^2 \epsilon}{N W^2} \dots (III.53)$$



El análisis de Outmans se limitó a describir el volumen de roca

fracturado por la penetración de un diente que se mueve verticalmente pero no horizontalmente, por lo tanto la ecuación anterior requiere una expresión para el ritmo de penetración debido a la excentricidad del cono, para que pueda generalizarse a cualquier barrena tricónica. El volumen de roca que desplaza el diente de la barrena es proporcional al producto de la profundidad que se entierra de diente y la distancia que se desliza. La distancia deslizada, l , es proporcional a la excentricidad del cono y la profundidad que se entierra el diente es proporcional a W / SD^2 . El volumen de roca que se remueve durante el desplazamiento del diente es proporcional a la ductilidad de la roca, ϵ . Así el término ductilidad/excentricidad tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{Vd} = \frac{S D^2}{N W l \epsilon} \dots\dots \text{(III.54)}$$

Adicionando las ecuaciones anteriores a la ecuación x se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{dD/dt} = \frac{\sigma D^2}{N W} \left[\frac{\sigma \sigma D \epsilon}{W} + \frac{\phi}{\epsilon} \right] + \frac{b}{N D} + \frac{c \rho \mu D}{I_m} \dots\dots \text{(III.55)}$$

Donde:

- dD/dt = Ritmo de penetración (pies/hr)
- σ = Resistencia de la roca (lb/pg²)
- D = Diámetro de la barrena (pg)
- N = Velocidad de rotación (rpm)
- W = Peso sobre la barrena (Klbs)
- ϵ = Ductibilidad de la roca (%)
- ϕ = Coeficiente de excentricidad de los conos (L⁻¹)
- σ, b, c = Constantes del diseño de la barrena
- ρ = Densidad del fluido de perforación (lb/gal)
- μ = Viscosidad del lodo (cp)
- I_m = Fuerza de impacto modificada (lbs)

entonces la corrida será antieconómica.

Si cae junto a la curva es necesario considerar otros factores para igualar el costo por metro de la barrena (Fig II.4).

Si se tiene un valor negativo o muy grande de Tr_2 indica que a esa velocidad de perforación, la barrena de prueba nunca igualará el costo de la barrena de comparación.

II.5 TERMINACION DE LA CORRIDA DE LA BARRENA.¹⁰

Siempre existe incertidumbre para saber cuando es el mejor momento para terminar la corrida de una barrena y comenzar las operaciones para cambiarla por una nueva.

Lo ideal sería mantener a la barrena perforando, solamente el tiempo que pueda perforar óptimamente, lo que nos permitiría obtener un menor costo de perforación. Un punto importante para lograrlo es la estimación del momento en que la barrena estará completamente gastada (en base a la evaluación del sistema de corte, rodamientos y calibre).

Puede ser aconsejable, terminar la corrida de la barrena antes de que se desgaste cuando:

1. Los daños a la barrena se incrementan rápidamente y el ritmo de penetración baja.
2. Se incrementa el torque requerido para girar la barrena.

Cuando la barrena en uso empieza a mostrar un desgaste notorio en el sistema de rodamiento y el torque tiende a incrementarse (al empezar a trabarse los conos) y con el apoyo de la experiencia del perforador, así como en el análisis de los parámetros de perforación, se puede optar por sacar la barrena.

Sin embargo, la barrena adecuada para un área dada se selecciona de tal forma que la estructura de corte se desgaste más rápidamente que los baleros. Si esto ocurre, entonces la decisión de sacar una barrena se basa principalmente en criterios que consideren el costo por metro perforado (si es que no ocurre un cambio de formación).

IV

MODELO DE GALLE Y GOODS.

IV.1 MODELO DE GALLE Y WOODS.

En 1960 Galle y Goods¹ publicaron su primer trabajo en donde definen la forma de las ecuaciones principales de su modelo y proponen el cálculo de un sistema de perforación en el cual el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación varían gradualmente durante la vida de la barrena. En 1963² publican su segundo artículo en el que proponen el cálculo de la mejor combinación de peso sobre la barrena y velocidad de rotación para obtener el mínimo costo de perforación cuando se emplean barrenas tricónicas.

Este modelo incluye gráficas y valores tabulados para una amplia variedad de formaciones que pueden aplicarse en el campo.

Los procedimientos de este método se utilizan para determinar:

1. La mejor combinación de peso sobre la barrena y velocidad de rotación.
2. El mejor peso sobre la barrena para cualquier velocidad de rotación.
3. La mejor velocidad de rotación para cualquier peso sobre la barrena.

El primer punto tendrá aplicación en donde la flexibilidad del equipo permita el manejo de cualquier peso sobre la barrena o velocidad de rotación, el segundo punto donde se tengan limitaciones del equipo o problemas de vibración que restringe el uso de algunas velocidades de rotación y por último el tercer punto donde las condiciones del agujero o el número limitado de lastrabarreras dictan el máximo peso que puede emplearse.

Cuando se perforan formaciones suaves, las barrenas con poco desgaste del diente se sacan debido a falla en los cojinetes. En tales casos, el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación no varían mucho para este procedimiento. Ya que se está empleando un verdadero proceso de optimización cuando el desgaste del diente es muy poco, es posible que sea más conveniente utilizar un peso sobre barrena y velocidad de rotación

constantes en este tipo de formación.

Para encontrar el peso sobre la barrena y velocidad de rotación que resulten en una corrida de barrena más económica, es necesario conocer:

1. La relación entre el ritmo de penetración y los factores que lo afectan.
2. La relación entre el ritmo de desgaste de la estructura de corte de la barrena y los factores que lo afectan.
3. La relación entre el ritmo de desgaste de los cojinetes y los factores que lo afectan.

La acción de corte de una barrena es bastante complicada, por lo que es difícil obtener relaciones exactas para los tres puntos antes señalados, sin embargo se han desarrollado fórmulas empíricas a partir de pruebas de campo y estudios de laboratorio.

A continuación se presentan las ecuaciones de ritmo de penetración y del desgaste en dientes y baleros que utiliza este modelo.

IV.1.1 ECUACION DE RITMO DE PENETRACION.

A partir de la experiencia en el campo, se sabe que el ritmo de penetración se encuentra afectado por el peso sobre la barrena, velocidad de rotación, desgaste del diente, fluido de perforación, hidráulica de la barrena y del tipo de formación.

Resultaría demasiado costoso el correr la barrena varias veces durante su vida útil para determinar el desgaste que sufre el diente. Debido a esto, los resultados de laboratorio se usaron y modificaron para estar de acuerdo con la experiencia de campo.

Así la ecuación del ritmo de penetración de este modelo es:

$$\frac{dF}{dt} = C_f \frac{Wk r}{\sigma p} \dots\dots (IV.1)$$

Dónde:

dF/dt = Ritmo de penetración

W = Peso sobre la barrena

Cf = Parámetro de perforabilidad de la formación

k = Exponente del peso sobre la barrena

r = función de la velocidad de rotación

a = Función de desgaste del diente

p = Exponente del valor de la función a

En la ecuación anterior el valor de la función r es igual a la velocidad de rotación a una potencia fraccional y es una función de la velocidad de rotación (Tabla IV.1). Esto se expresa mediante:

$$r = \text{Exp}(-100/N^2) * N^{0.428} + 0.2 N [1 - \text{Exp}(-100/N^2)] \dots (IV.2)$$

Para formaciones duras y,

$$r = \text{Exp}(-100/N^2) * N^{0.75} + 0.5 N [1 - \text{Exp}(-100/N^2)] \dots (IV.3)$$

Para formaciones suaves (Fig IV.1).

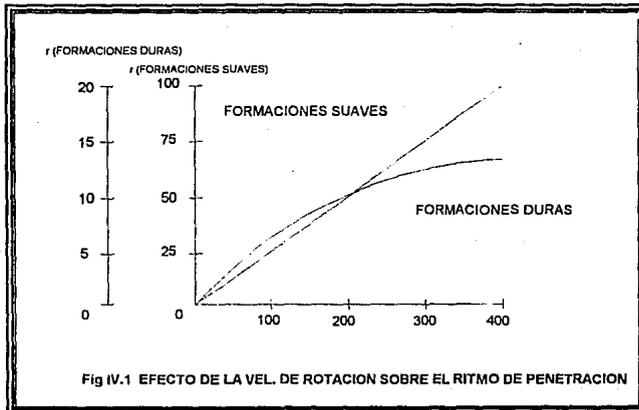
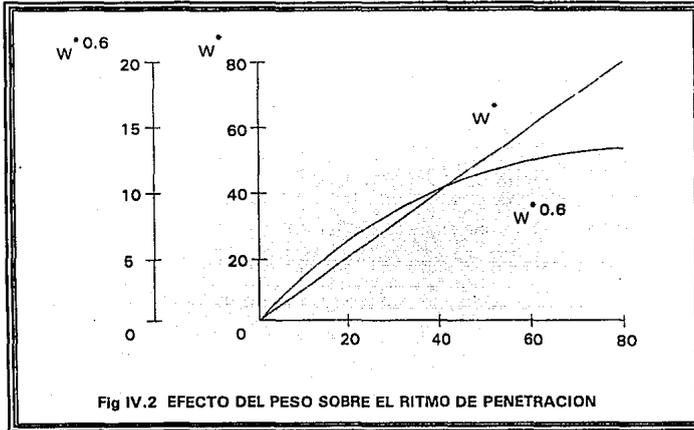


Fig IV.1 EFECTO DE LA VEL. DE ROTACION SOBRE EL RITMO DE PENETRACION

El valor del exponente del peso sobre la barrena k , estará en función del tipo de formación (Fig IV.2):



FORMACION	K
Suave	0.95
Media	1.00
Dura	1.05

La Tabla IV.2 muestra valores tabulados de W contra W^k .

El valor del exponente de la función que expresa el desgaste del diente (función a), estará en función del tipo de dientes que tenga la barrena.

- $p = 1.0$ - Dientes de cresta plana
- $p = 0.5$ - Dientes autoafilables
- $p = 0$ - Dientes sin desgaste o Insertos

El exponente p se toma como cero cuando los dientes no han sufrido desgaste (el ritmo de penetración no se ha afectado por el desgaste del diente) o cuando se tienen insertos de carburo de tungsteno.

N vs. N'r

N	r								
	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8
20	3.31	3.85	4.47	5.19	6.03	7.01	8.14	9.45	11
25	3.62	4.26	5	5.88	6.9	8.12	9.52	10.6	13.2
30	3.9	4.62	5.48	6.49	7.7	9.12	10.8	12.8	15.2
35	4.15	4.95	5.92	7.08	8.43	10.1	12	14.4	17.2
40	4.37	5.26	6.32	7.61	9.15	11	13.2	15.9	19.1
45	4.58	5.55	6.7	8.1	9.6	11.8	14.4	17.4	21
50	4.78	5.81	7.07	8.6	10.5	12.7	15.5	18.8	22.9
55	4.96	6.07	7.41	9.08	11.1	13.5	16.5	20.2	24.6
60	5.14	6.31	7.74	9.51	11.6	14.3	17.5	21.6	26.5
65	5.31	6.54	8.06	9.52	12.2	15.1	18.6	22.9	28.2
70	5.47	6.77	8.37	10.3	12.8	15.8	19.6	24.2	29.9
75	5.63	6.98	8.68	10.8	13.4	16.5	20.5	25.5	31.6
80	5.77	7.18	8.94	11.1	13.9	17.3	21.5	26.8	33.3
85	5.91	7.39	9.22	11.5	14.4	18	22.4	28	35
90	6.05	7.58	9.49	11.9	14.9	18.7	23.3	29.2	36.6
95	6.18	7.77	9.74	12.2	15.4	19.3	24.2	30.4	38.1
100	6.31	7.94	10	12.6	15.9	20	25.2	31.6	39.8
105	6.43	8.11	10.2	12.9	16.3	20.6	26	32.8	41.3
110	6.55	8.29	10.5	13.3	16.8	21.1	26.9	34	42.9
115	6.67	8.46	10.7	13.6	17.2	21.8	27.7	35.1	44.5
120	6.79	8.62	10.9	13.9	17.7	22.5	28.5	36.6	46.1
125	6.9	8.79	11.2	14.2	18.1	23.1	29.4	37.4	47.6
130	7.01	8.94	11.4	14.5	18.6	23.7	30.2	38.5	49.1
135	7.11	9.09	11.6	14.8	19	24.2	31	39.6	50.6
140	7.22	9.24	11.8	15.1	19.4	24.8	31.8	40.7	52.1
145	7.32	9.39	12	15.4	19.8	25.4	32.5	41.8	53.6
150	7.42	9.53	12.2	15.7	20.2	26	33.3	42.9	55.1
155	7.52	9.67	12.4	16	20.6	26.5	34.1	44	56.6
160	7.61	9.81	12.6	16.3	21	27.1	34.9	45	58
165	7.71	9.95	12.8	16.6	21.4	27.6	35.7	46	59.5
170	7.8	10.1	13	16.8	21.8	28.2	36.4	47	60.9
175	7.89	10.2	13.2	17.1	22.2	28.7	37.1	48	62.3
180	7.98	10.4	13.4	17.4	22.6	29.2	37.8	49	63.7
185	8.08	10.5	13.6	17.6	22.9	29.8	38.6	50	65.1
190	8.18	10.6	13.8	17.9	23.3	30.3	39.4	51	66.5

Tabla IV.1

W vs. W^k

W	k								
	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.2
10	4	5	6.3	7.9	8.9	10	11.12	12.6	15.8
12	4.4	5.7	7.3	9.4	10.3	12	13.6	15.4	19.8
14	4.4	6.3	8.2	10.8	12.2	14	16	18.2	23.7
16	5.3	7	9.2	12.2	13.8	16	18.4	21.1	27.9
18	5.7	7.6	10.1	13.5	15.6	18	20.8	24.1	32.1
20	6	8.1	11.1	14.8	17.2	20	23.2	27	36.4
22	6.4	8.7	11.9	16.2	18.9	22	25.6	29.9	40.8
24	6.7	9.2	12.7	17.4	20.5	24	28.2	33	45.2
26	7.1	9.6	13.6	18.8	22.1	26	30.7	36	50
28	7.4	10.3	14.4	20	23.7	28	33.1	39.1	54.6
30	7.7	10.8	15.2	21.3	25.3	30	35.7	42.1	59.2
32	8	11.3	16	22.6	27	32	38.1	45.2	64.1
34	8.3	11.8	16.8	23.9	28.5	34	40.6	48.5	68.8
36	8.6	12.3	17.5	25.1	30	36	43.2	51.6	73.9
38	8.9	12.8	18.4	26.5	31.7	38	45.9	54.7	78.7
40	9.2	13.2	19.1	27.6	33.2	40	48.1	58	83.9
42	9.4	13.6	19.9	28.9	34.8	42	50.3	61.1	88.5
44	9.7	14.1	20.6	30	36.3	44	53.5	64.1	93.8
46	10	14.6	21.5	31.3	38	46	55.7	67.2	98.3
48	10.2	15	22.1	32.5	39.4	48	58.1	70.4	104
50	10.4	15.5	22.9	33.9	41.1	50	61	74	109
52	10.7	15.9	23.6	35	42.8	52	63.6	78.2	115
54	11	16.3	24.3	36.1	44.1	54	66	80.5	120
56	11.2	16.7	25.1	37.5	45.9	56	68.4	83.9	125
58	11.4	17.2	25.7	38.8	47.4	58	70.9	87	131
60	11.7	17.6	26.5	39.9	48.9	60	73.6	90.2	136
62	11.9	18	27.2	41	50.4	62	76.2	93.8	141
64	12.1	18.4	27.8	42.2	51.9	64	78.7	96.5	147
66	12.4	18.8	28.5	43.4	53.4	66	81.4	100	153
68	12.6	19.2	29.2	44.7	54.9	68	84	104	159
70	12.8	19.6	29.9	45.9	56.5	70	86.5	107	165
72	13	19.9	30.7	46.9	58	72	88.9	111	170
74	13.2	20.3	31.3	48.1	59.6	74	91.7	115	176
76	13.4	20.7	32	49.2	61.1	76	94.2	118	181
78	13.7	21.1	32.7	50.4	62.6	78	96.9	121	187

Tabla IV.2

Otro parámetro importante involucrado en esta ecuación, es el valor de la función a que representa el desgaste del diente y se puede expresar matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$a = 0.928125 D^2 + 6 D + 1 \dots\dots (IV.4)$$

Donde D representa la fracción gastada del diente en octavos (Fig IV.3).

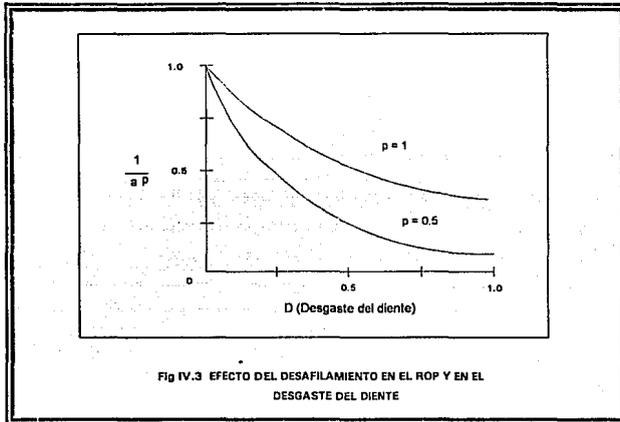


Fig IV.3 EFECTO DEL DESAFILAMIENTO EN EL ROP Y EN EL DESGASTE DEL DIENTE

De esta forma, el ritmo de penetración se incrementa con la perforabilidad, peso sobre la barrena y velocidad de rotación y se decrementa con el desgaste del diente.

En la ecuación del ritmo de penetración los efectos del tipo de barrena, hidráulica, fluido de perforación y tipo de formación, se incluyen en la constante de perforabilidad C_f . Formaciones que se perforan lentamente, tendrán un valor bajo de C_f .

IV.1.2 ECUACION DE RITMO DE DESGASTE DEL DIENTE.

A partir de la experiencia de campo sabemos que el ritmo de desgaste del diente se encuentra afectado por el peso sobre la barrena, velocidad de rotación y desafilamiento de la barrena.

Es difícil determinar el ritmo de desgaste del diente bajo condiciones de laboratorio, debido a que los dientes de diferentes hileras no se gastan al mismo tiempo. Por lo tanto deben hacerse medidas extremadamente exactas de la altura del diente por intervalos para poder obtener valores consistentes del desgaste. Las roturas de los dientes causan complicaciones adicionales.

Sin embargo, los resultados de laboratorio se modificaron para que estuvieran de acuerdo con el rendimiento de la barrena en el campo. El resultado es la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{i}{A_f \cdot m} \dots (IV.5)$$

Donde:

- dD/dt = Ritmo de desgaste del diente
- i = Función de la velocidad de rotación
- a = Función de desgaste del diente
- m = Función del peso sobre la barrena
- A_f = Parámetro de abrasividad de la formación

En la ecuación anterior, i y m son funciones que relacionan la velocidad de rotación y el peso sobre la barrena con el ritmo de desgaste del diente, estos valores pueden calcularse de la siguiente forma (Fig IV.4 a y IV.4 b):

$$i = N + 4.348 + 10^{-5} N^3 \dots (IV.6)$$

$$m = 1359.1 - 714.19 \log_{10} W^* \dots (IV.7)$$

Las Tablas IV.3 y IV.4 muestran valores tabulados de i y m para diferentes valores de velocidad de rotación y peso.

Como puede observarse en las ecuaciones, i es una cantidad que se incrementa con la velocidad de rotación, la función a se incrementa con el desafilamiento (desgaste del diente) y m se decrecienta con el incremento del peso. A_f se decrecienta con el incremento de la abrasividad de la formación.

Así, el ritmo de desgaste del diente se incrementa mientras la abrasividad, peso sobre barrena y velocidad de rotación se incrementan y se decrecienta conforme el desafilamiento del diente se incrementa. En esta

ecuación los efectos del tipo de barrena, hidráulica, fluido de perforación y tipo de formación se incluyen en la constante de abrasividad A_f . Una formación muy abrasiva tendrá un valor bajo de A_f .

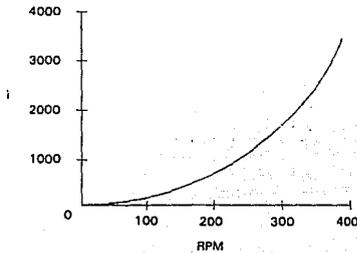


Fig. 4 a EFECTO DE LA VEL. DE ROTACION EN EL DESGASTE DEL DIENTE

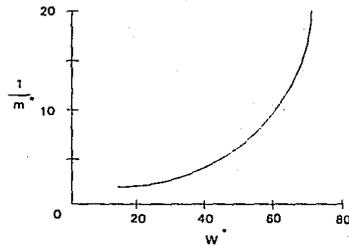


Fig. 4 b EFECTO DEL PESO EN EL DESGASTE DEL DIENTE

IV.1.3 ECUACION DE DESGASTE DEL BALERO.

La vida del balero depende de la capacidad del balero de la barrena, peso sobre la barrena, velocidad de rotación y del tipo de fluido de perforación (no sellado) en el que opera.

En base a pruebas de laboratorio y de campo resulta la siguiente

N vs. i

N	i	N	i	N	i	N	i	N	i
10	10	50	55	90	122	130	226	190	488
15	15	55	62	95	132	135	242	200	548
20	20	60	69	100	143	140	259	225	720
25	26	65	77	105	155	145	278	250	929
30	31	70	85	110	168	150	297	275	1179
35	37	75	93	115	181	160	338	300	1474
40	43	80	102	120	195	170	384	350	2214
45	49	85	112	125	210	180	434	400	3183

Tabla IV.3

W*, m* y L

W	m	L	W	m	L	W	m	L
15	0.726	6240	37	0.334	1800	59	0.132	766
16	0.698	5840	38	0.323	1725	60	0.124	739
17	0.672	5440	39	0.311	1650	61	0.117	714
18	0.647	5080	40	0.3	1578	62	0.11	689
19	0.624	4750	41	0.29	1515	63	0.103	665
20	0.601	4439	42	0.279	1460	64	0.096	642
21	0.58	4170	43	0.269	1400	65	0.09	620
22	0.56	3920	44	0.259	1340	66	0.083	599
23	0.541	3680	45	0.249	1288	67	0.076	578
24	0.522	3470	46	0.24	1240	68	0.07	558
25	0.505	3270	47	0.23	1195	69	0.064	538
26	0.488	3080	48	0.221	1150	70	0.057	520
27	0.471	2910	49	0.212	1105	71	0.051	502
28	0.455	2770	50	0.204	1063	72	0.045	484
29	0.44	2630	51	0.195	1025	73	0.039	467
30	0.425	2496	52	0.186	988	74	0.033	450
31	0.411	2370	53	0.178	953	75	0.027	434
32	0.397	2260	54	0.17	918	76	0.022	418
33	0.384	2160	55	0.162	884	77	0.016	403
34	0.371	2060	56	0.154	853	78	0.01	388
35	0.358	1963	57	0.147	823	79	0.005	373
36	0.346	1880	58	0.139	794			

Tabla IV.4

ecuación para la vida del balero:

$$B = \frac{S L}{N} \dots\dots (IV.8)$$

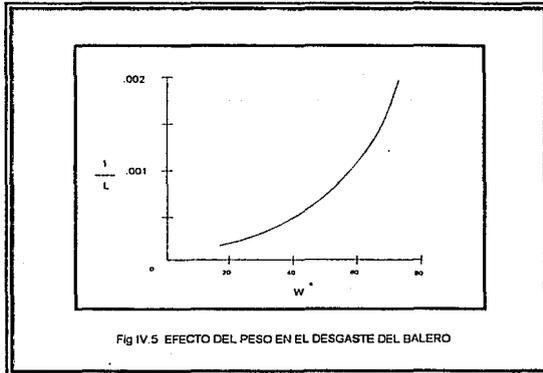
Donde:

- B = *Vida del balero de la barrena*
- S = *Parámetro del fluido de perforación*
- L = *Función tabulada de W*
- N = *Velocidad de rotación*

La función L se decrementa con el incremento del peso, como puede observarse en la siguiente ecuación:

$$L = \frac{20457}{[1 + 0.03 W^*]^{3.23}} \dots\dots (IV.9)$$

La ecuación anterior representa una aproximación del valor de L, los valores exactos se presentan tabulados en la Tabla IV.4. Esta función relaciona el peso sobre la barrena y el ritmo de desgaste del balero (Fig IV.5).



Denotando la fracción de vida gastada del cojinete por Bx , entonces en el tiempo t :

$$Bx = \frac{t}{B} = \frac{t N}{S L} \dots\dots (IV.10)$$

Esto se aplica solo si el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación son constantes durante el tiempo t .

Si el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación varían, entonces se tiene:

$$\frac{dBx}{dt} = \frac{N}{S L} \dots\dots (IV.11)$$

Una suposición que se hace es que la fracción de vida gastada del balero en cada intervalo de tiempo es independiente del peso y velocidad de rotación en cualquier otro tiempo, ya sea antes o después de este intervalo. Por ejemplo, si un cojinete dura 10 horas a un determinado valor de peso y velocidad de rotación, en 1 hora obviamente se gastaría una décima parte. Si durara 5 horas bajo otras condiciones de peso y velocidad, en 1 hora se gastaría la quinta parte del cojinete. En este modelo se supone que si la barrena trabaja durante 1 hora bajo cada una de las condiciones anteriores, entonces el cojinete se gastaría tres decimas partes. Esta suposición no puede justificarse completamente, pero los errores generados son despreciables.

La vida del balero se decrementa cuando se incrementa el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación y se incrementa con el factor del fluido de perforación S . El valor de S para cualquier fluido de perforación cambia con las diferentes barrenas que contienen baleros de diferente capacidad. Altos valores de S significan un buen efecto del fluido de perforación en la vida de los baleros.

IV.2 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE PERFORACION.³

Para efectuar el cálculo de las constantes de la formación (A_f y C_f) y la constante del balero B_f es necesario tener la siguiente información sobre la corrida de una barrena anterior, a un peso sobre barrena y velocidad de

rotación constantes:

- *Tamaño y tipo de barrena*
- *Costo por hora del equipo*
- *Costo de la barrena*
- *Tiempo de viaje*
- *Profundidad*
- *Tipo de formación*
- *Intervalo perforado*
- *Tiempo de rotación*
- *Peso sobre la barrena*
- *Velocidad de rotación*
- *Condición de desgaste del diente*
- *Condición de desgaste del balero*

A partir de los datos de operación de una corrida de barrena de un intervalo similar es posible determinar los parámetros A_f , D_f y B_f .

El valor del parámetro k se puede determinar a partir de una prueba de campo (de Perforabilidad) si las otras condiciones permanecen constantes, mediante:

$$R = W^k \dots\dots (IV.12)$$

Donde:

- $R =$ *Ritmo de penetración*
- $W =$ *Peso sobre la barrena*
- $K =$ *Exponente a determinar*

Con la ecuación anterior para varios valores de R contra W a una velocidad de rotación constante, es posible obtener k . Si no se puede realizar esta prueba, se toma como base los valores ya mencionados dependiendo del tipo de formación.

A continuación se presenta la forma de calcular los parámetros A_f , D_f y C_f .

IV.2.1 ABRASIVIDAD DE LA FORMACION (A_f).

El primer paso necesario para propósitos de cálculo, es que todas las funciones del peso sobre la barrena se normalizen a una barrena de 7 7/8" de diámetro, mediante:

$$W^t = \frac{7.875 W}{D_b} \dots (IV.13)$$

$$m^t = \frac{m}{714.19} \dots (IV.14)$$

Donde D_b es el diámetro de la barrena o del agujero.

A partir de la ecuación de desgaste del diente (ec. IV.5), se sustituye el valor normalizado de m (m^t), resultando la siguiente ecuación:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{i}{714.19 A_f \alpha m^t} \dots (IV.15)$$

Integrando la ecuación anterior, tenemos:

$$T_r = \frac{A_f m^t}{i} 714.19 \int_0^D \alpha dD \dots (IV.16)$$

Introduciendo una nueva variable U para representar a la integral de la función α :

$$U = 714.19 \int_0^D \alpha dD \dots (IV.17)$$

Finalmente sustituimos el valor de la función a (ec. IV.4) en la ecuación anterior e integramos para obtener el valor de U en función del desgaste del diente:

$$U = 220.952531 D^3 + 2142.57 D^2 + 714.19 D \dots\dots (IV.18)$$

Por lo que la ecuación del tiempo de rotación t_r a partir del desgaste en el diente nos queda:

$$T_r = \frac{A_f m^* U}{i} \dots\dots (IV.19)$$

Ahora si con la ecuación anterior estamos en posibilidad de conocer el valor de A_f mediante un simple despeje:

$$A_f = \frac{T_r i}{m^* U} \dots\dots (IV.20)$$

IV.2.2 PERFORABILIDAD DE LA FORMACION (D_f).

A partir de la ecuación del ritmo de penetración (ec. IV.1) tenemos:

$$dF = C_f \frac{Wk_r}{\sigma P} dTr \dots\dots (IV.21)$$

Pero además de la ecuación de desgaste del diente (ec. IV.5), despejamos el valor de dTr :

$$dTr = \frac{A_f m a}{i} dD \dots\dots (IV.22)$$

Sustituyendo la ecuación (IV.22) en la ecuación (IV.21):

$$dF = \frac{C_f A_f m W_k r}{i} \frac{a}{dP} dD \dots (IV.23)$$

Ahora sustituiremos los valores de las funciones normalizadas (W^* y m^*):

$$dF = \frac{C_f A_f m^* W^* r}{i} 714.19 \frac{a}{dP} dD \dots (IV.24)$$

Integrando la ecuación anterior y definiendo una nueva variable Z , obtenemos la ecuación que nos permite conocer el intervalo perforado F :

$$F = \frac{D_f m^* W^* r Z}{i} \dots (IV.25)$$

Donde:

$$Z = 714.19 \int_0^a \frac{a}{dP} dD \quad \text{y} \dots (IV.26)$$

$$D_f = A_f C_f \dots (IV.27)$$

La función Z relaciona el desgaste y el tipo de diente que tiene la barrena, además variara cuando el valor de p cambie, esto es:

Cuando $p = 1$, Z se reduce a:

$$Z = 714.19 D \dots\dots (IV.28)$$

Si $p = 0.5$, Z se reduce a:

$$Z = 714.19 [A - 4.513744 \ln B + 7.728405] \dots\dots (IV.29)$$

Donde:

$$A = \frac{1.85625 D + 6}{3.7125} [0.928125 D^2 + 6 D + 1]^{0.5} \dots\dots (IV.30)$$

$$B = 2 [0.861416 D^2 + 5.56875 D + 0.928125]^{0.5} + 1.85625 D + 6$$

Finalmente si $p = 0$, Z se reduce a:

$$Z = U = 220.952531 D^3 + 2142.57 D^2 + 714.19 D \dots\dots (IV.31)$$

La Tabla IV.5 muestra los valores de U y Z para los diferentes valores de desgaste del diente (octavos).

Por medio de la ecuación IV.25 podemos calcular el parámetro de perforabilidad de la formación D_f :

$$D_f = \frac{F_i}{m^* W^* k_r Z} \dots\dots (IV.32)$$

IV.2.3 CONSTANTE DE DESGASTE DEL BALERO (S).

Partiendo de la ecuación de ritmo de desgaste del balero (ec. IV.11):

$$\frac{dB_x}{dt} = \frac{N}{S L} \dots\dots (IV.33)$$

Integrando esta ecuación para obtener el tiempo de rotación a partir del desgaste en el balero nos queda:

$$T_r = \frac{S L B_f}{N} \dots\dots (IV.34)$$

Como en los casos anteriores, despejamos el valor de S para conocer el factor de desgaste del balero (parámetro del fluido de perforación):

$$S = \frac{T_r N}{B_f L} \dots\dots (IV.35)$$

D contra U y Z

DESGASTE (D)	Z cuando p =			
	U	0	0.5	1.0
1/8	123	123	105	89
2/8	316	316	236	179
3/8	581	581	389	268
4/8	920	920	563	357
5/8	1337	1337	756	446
6/8	1834	1834	967	536
7/8	2413	2413	1194	625
8/8	3078	3078	1437	714

Tabla IV.5

IV.3 METODO PARA DETERMINAR EL COSTO MINIMO DE PERFORACION.

La solución para las ecuaciones fundamentales (IV.1, IV.5 y IV.11) que representan el ritmo de penetración y los ritmos de desgaste en dientes y baleros, se obtuvo mediante la integración de ellas.

Así tenemos tres ecuaciones derivadas de las principales ecuaciones de este modelo:

Intervalo perforado.

$$F = \frac{Df m^t W^k r Z}{i} \dots\dots (IV.25)$$

Tiempo de rotación.

$$Tr = \frac{A_f m^t U}{i} \dots\dots (IV.19)$$

$$Tr = \frac{S L B_f}{N} \dots\dots (IV.34)$$

Una vez que se han determinado los parámetros de perforación con datos de la corrida de una barrena anterior, la ecuación IV.25 nos permite conocer el intervalo que ha sido perforado para un cierto valor de peso sobre la barrena y velocidad de rotación.

Con la ecuación IV.19 podemos calcular el tiempo de rotación cuando el diente limita la corrida de la barrena o por el contrario empleando la ecuación IV.34 cuando el balero es el que limita la corrida de la barrena para estas mismas condiciones de peso sobre la barrena y velocidad de rotación.

IV.3.1 INTERRELACION ENTRE EL DESGASTE EN EL DIENTE Y BALERO (D Y B_f).

El objetivo de esta interrelación entre el desgaste que sufre el diente (D) y el desgaste que sufre el balero (B_f), es el encontrar que factor limitara la vida de la barrena, para optimizar las condiciones de operación a que estará sujeta.

Igualando las ecuaciones IV.19 y IV.34:

$$\frac{A f m^{\dagger} U}{i} = \frac{S L B_f}{N}$$

Despejando el valor de U, obtenemos la siguiente expresión:

$$U = \frac{S L B_f i}{A f m^{\dagger} N} \dots\dots (IV.36)$$

Para determinar que factor limita la corrida de la barrena, efectuamos los siguientes dos pasos principales:

- i) Primero suponemos que el diente se desgasta totalmente, esto es consideramos que D vale 1.**
- ii) Calculamos el valor de la función de este desgaste del diente (U) sustituyendolo en la ecuación IV.18.**

$$U = 220.952531 \cdot (13) + 2142.57 (12) + 714.19 (1) \dots\dots (IV.18)$$

$$U = 3077.713$$

Por lo tanto, dependiendo de este valor se determina quien limita la vida útil de la barrena, mediante:

Si $U < 3078$ El Balero limita la vida de la barrena.

Si $U \geq 3078$ El Diente limita la vida de la barrena.

IV.3.2 PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

Una vez que se ha determinado el factor que limita la corrida de la barrena mediante el empleo de la ecuación IV.36, dependiendo del valor de la función U tendremos dos procedimientos diferentes:

1) EL DIENTE LIMITA LA CORRIDA DE LA BARRENA.

- i) Tomamos el valor del desgaste del diente (D) y de la función U como 1 y 3078 respectivamente.
- ii) Calculamos la vida de la barrena (tiempo de rotación) mediante el empleo de la ecuación IV.19.
- iii) Calculamos el valor del desgaste del balero (B_f), despejandolo de la ecuación IV.35:

$$B_f = \frac{T_r N}{S L} \dots\dots (IV.37)$$

- iv) Se calcula el valor del intervalo perforado (F) con el empleo de la ecuación IV.25.
- v) Calculamos el tiempo de viaje (T_t) con la siguiente ecuación o con la Tabla II.7, si es que no se conoce:

$$T_t = \frac{0.4 U}{100} \dots\dots (II.5)$$

D representa la profundidad y estara en metros.

- vi) Haciendo uso de la ecuación II.4, calculamos el costo por pie perforado:

$$C = \frac{C_b + C_r [T_l + T_r]}{F} \dots (II.4)$$

- vii) Finalmente repetimos los cálculos del paso 2 al 6, para diferentes valores de peso sobre la barrena y velocidad de rotación, y de estos el que produzca el menor costo de perforación será el valor de la COMBINACION OPTIMA W-N.

2) EL BALERO LIMITA LA CORRIDA DE LA BARRENA.

- i) Tomamos el valor del desgaste del balero (Bf) como 1.
- ii) Calculamos la vida de la barrena (tiempo de rotación) mediante la ecuación IV.34.
- iii) A partir del valor de U obtenido con la ecuación IV.36, determinar el valor del desgaste del diente (D) con la ecuación IV.18, debido a que es difícil despejar el valor de (D), se resuelve la ecuación con ayuda de métodos numéricos o a partir de la Tabla IV.6.
- iv) Se calcula el valor del intervalo perforado (F) con el empleo de la ecuación IV.25.
- v) Calculamos el tiempo de viaje (T_l) con la siguiente ecuación, o con la Tabla II.7 si es que no se conoce:

$$T_l = \frac{0.4 D}{100} \dots (II.5)$$

U y Z vs D

U	D	Z cuando p =			U	D	Z cuando p =		
		0	0.5	1			0	0.5	1
0	0	0	0	0	920	0.6	920	663	387
7	0.01	7	7	7	981	0.51	951	578	364
16	0.02	16	16	14	982	0.52	982	593	371
23	0.03	23	22	21	1013	0.53	1013	608	379
32	0.04	32	30	29	1046	0.54	1046	623	386
41	0.05	41	38	36	1078	0.55	1078	638	393
51	0.06	51	47	43	1111	0.56	1111	653	400
61	0.07	61	56	50	1144	0.57	1144	669	407
71	0.08	71	64	57	1178	0.58	1178	685	414
82	0.09	82	72	64	1213	0.59	1213	700	421
93	0.1	93	81	71	1248	0.6	1248	716	429
105	0.11	105	90	79	1283	0.61	1283	732	436
117	0.12	117	100	88	1319	0.62	1319	748	443
130	0.13	130	109	93	1356	0.63	1356	764	450
143	0.14	143	119	100	1393	0.64	1393	780	457
156	0.15	156	129	107	1430	0.65	1430	797	464
170	0.16	170	139	114	1468	0.66	1468	813	471
184	0.17	184	149	121	1507	0.67	1507	830	479
199	0.18	199	159	129	1546	0.68	1546	847	486
216	0.19	216	170	138	1585	0.69	1585	863	493
230	0.2	230	180	143	1626	0.7	1626	880	500
247	0.21	247	191	150	1668	0.71	1668	897	507
263	0.22	263	202	157	1707	0.72	1707	914	514
280	0.23	280	213	164	1749	0.73	1749	932	521
298	0.24	298	224	171	1791	0.74	1791	949	528
316	0.25	316	235	179	1834	0.75	1834	967	535
334	0.26	334	247	186	1877	0.76	1877	984	543
353	0.27	353	259	193	1921	0.77	1921	1002	550
373	0.28	373	270	200	1966	0.78	1966	1020	557
393	0.29	393	282	207	2010	0.79	2010	1038	564
413	0.3	413	294	214	2056	0.8	2056	1056	571
434	0.31	434	307	221	2102	0.81	2102	1074	578
456	0.32	456	319	229	2149	0.82	2149	1092	586
477	0.33	477	331	236	2196	0.83	2196	1110	593
499	0.34	499	344	243	2243	0.84	2243	1129	600
522	0.35	522	357	250	2291	0.85	2291	1147	607
546	0.36	546	370	257	2339	0.86	2339	1166	614
569	0.37	569	383	264	2389	0.87	2389	1185	621
593	0.38	593	396	271	2438	0.88	2438	1203	628
618	0.39	618	409	279	2489	0.89	2489	1222	636
643	0.4	643	422	286	2539	0.9	2539	1241	643
668	0.41	668	436	293	2591	0.91	2591	1261	650
694	0.42	694	450	300	2643	0.92	2643	1280	657
721	0.43	721	463	307	2695	0.93	2695	1299	664
748	0.44	748	477	314	2748	0.94	2748	1319	671
775	0.45	775	491	321	2802	0.95	2802	1338	678
803	0.46	803	505	329	2856	0.96	2856	1358	686
832	0.47	832	520	336	2910	0.97	2910	1388	693
861	0.48	861	534	343	2966	0.98	2966	1397	700
890	0.49	890	549	350	3021	0.99	3021	1417	707
					3078	1	3078	1437	714

Tabla IV.6

vi) Haciendo uso de la ecuación II.4, calculamos el costo por pie perforado:

$$C = \frac{C_b + C_r [T_l + T_r]}{F} \dots (II.4)$$

vii) Finalmente repetimos los cálculos del paso 2 al 6, para diferentes valores de peso sobre la barrena y velocidad de rotación, y de estos el que produzca el menor costo de perforación será el valor de la COMBINACION OPTIMA W-N.

IV.4 CARACTERISTICAS DE ESTE MODELO.4

1. Los efectos del tipo de barrena, litología, propiedades del fluido de perforación e hidráulica en el ritmo de penetración y desgaste de la barrena, se incluyen en los valores de las constantes de perforabilidad y abrasividad respectivamente.
2. Los valores de las constantes de perforabilidad, abrasividad y del balero se determinan con datos de pozos vecinos.
3. Contempla la utilización de barrenas con insertos de carburo de tungsteno y dientes autoafilables.
4. La solución final de N y W óptimas se puede presentar en forma gráfica, lo cual reduce el uso de los programas de cómputo.
5. La optimización de la perforación se hace en forma general, pues se emplean literales independientes (i, m, a, r) cuya forma funcional puede variarse.
6. No requiere de pruebas especiales de campo para la determinación de los parámetros involucrados en el método.

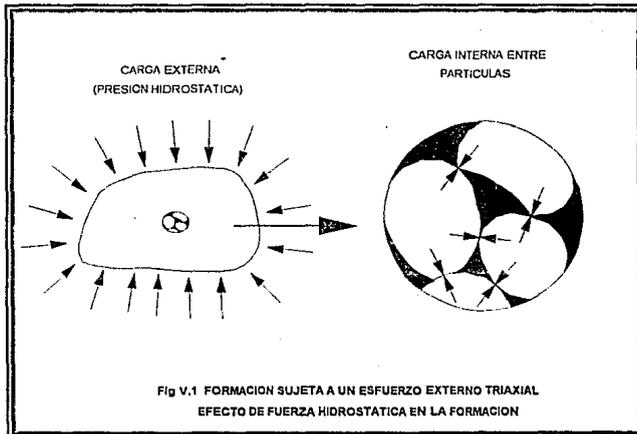
V

SELECCION DE BARRENAS MEDIANTE REGISTROS GEOFISICOS

V.1 CARACTERISTICAS DE LA FORMACION.

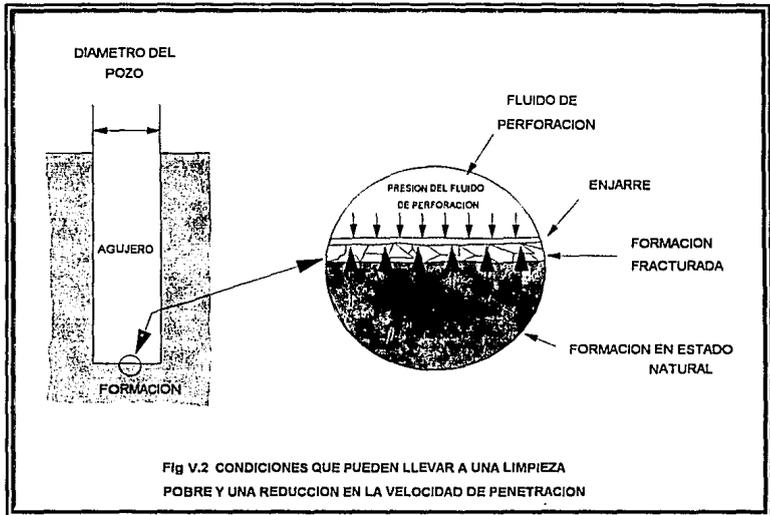
Las características de perforabilidad de las formaciones varían cuando están bajo presiones extremadamente altas, lo cual generalmente ocurre a grandes profundidades. Por ejemplo, en una formación a 3300 mts. (10000') de profundidad y a presiones anormales, la presión de la formación y la presión hidrostática se comportan de forma muy distinta que cuando están en la superficie bajo la presión atmosférica, existen dos factores que influyen en esto.

El primero puede ser visualizado (Fig V.1) pensando en un testigo de formación bajo el peso de la presión hidrostática en su superficie exterior (carga externa). Dentro del testigo, las partículas adyacentes se encuentran comprimidas entre sí (carga interna), como consecuencia de tal presión. Bajo estas condiciones, cualquier esfuerzo para fracturarlo debe vencer la resistencia inherente de la roca, más el aumento de la resistencia debido a la presión hidrostática.



El segundo factor que contribuye a aparentes cambios de formación es en el caso de que la limpieza del fondo no sea eficiente, causada por una presión hidrostática mucho mayor que la presión de formación. Bajo estas

condiciones, el fluido de perforación busca entrar en los poros para igualar las presiones. Sin embargo, los pequeños sólidos del fluido de perforación quedan en el frente de avance formando un enjarre que a su vez soporta la presión diferencial. A medida que los dientes de la barrena atraviesan el enjarre, astillan la formación debajo del mismo. Al retirarse cada diente de la barrena, muchas partículas de la formación pueden quedar debajo del enjarre, lo cual es particularmente cierto si la limpieza no es adecuada. Una cantidad considerable de dichas partículas puede acumularse en el fondo afectando el ritmo de penetración (Fig V.2).

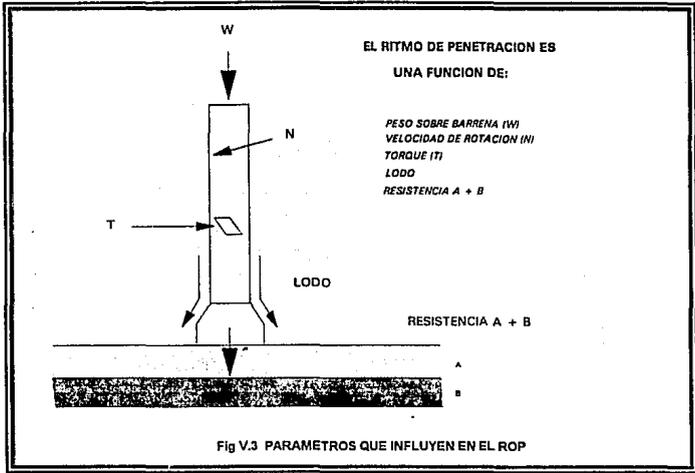


V.2 PROPIEDADES MECANICAS DE LA FORMACION.

El tipo de barrena, las condiciones de operación de la barrena, las características del lodo y los demás parámetros de perforación pueden ser definidos conociendo las características y propiedades mecánicas de la formación que va a ser perforada. Estas propiedades tienen aplicación, tanto en la perforación, como en la definición de programas de revestimiento, de fracturamientos hidráulicos y en la determinación de presiones de producción para evitar posibles problemas de arenamiento, en el caso de formaciones no consolidadas.

Las propiedades mecánicas de las rocas son muy difíciles de calcular o de medir debido a la variación de los esfuerzos y a la anisotropía de las rocas.

Por otro lado, los ritmos de penetración en las diferentes rocas, se relacionan con algunos de los esfuerzos a que se encuentran sometidas estas rocas y que pueden medirse con un alto grado de exactitud en el campo, en consecuencia el ritmo de penetración que se obtiene cuando se perfora un pozo es una función directa de un conjunto de parámetros operacionales incluyendo el tipo de barrena utilizado y la resistencia o dureza de las diferentes formaciones perforadas, por lo que es posible determinar el esfuerzo de perforación presente en la roca y relacionarlo a sus propiedades mecánicas (Fig V.3).¹



El conocimiento de las características mecánicas de la formación que va a ser perforada constituye un dato muy importante para la programación de la perforación de un pozo petrolero.

V.3 COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACION.²

Es importante conocer el comportamiento de las rocas cuando se les somete a un esfuerzo y a la deformación correspondiente que sufren debido a ese esfuerzo.

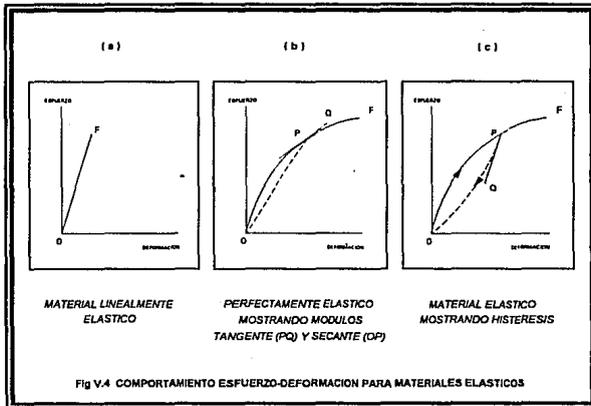
La mayoría de los métodos comunes del estudio de las propiedades

mecánicas de las rocas es por medio de la compresión axial de un cilindro circular cuya longitud es de 2 a 3 veces su diámetro. Para cualquier esfuerzo aplicado al cilindro existen dispositivos que pueden medirlo. Si el esfuerzo registrado se grafica contra la deformación tendremos el comportamiento de la curva Esfuerzo-Deformación.

Para la mayoría de las rocas la curva Esfuerzo-Deformación toma la forma lineal de la Figura V.4 (a), terminando abruptamente en la ruptura F, esto puede representarse por:

$$\sigma = E \varepsilon \dots\dots (V.1)$$

Donde la constante E se conoce como Módulo de Young. Un material se describe como linealmente elástico si la relación anterior se cumple exactamente. La teoría de la elasticidad lineal esta basada en esta suposición.



Un material se dice perfectamente elástico si existe una relación única:

$$\sigma = f(\varepsilon) \dots\dots (V.2)$$

entre el esfuerzo y la deformación, la cual no necesita ser lineal (Fig V.4 (b)), esto implica que si el material se somete a un esfuerzo y después deja de aplicarse se sigue cumpliendo la relación V.2. Por lo tanto, ahora no se tiene

un módulo único, pero para cualquier valor de σ , correspondiente a un punto P, la pendiente PQ de la tangente a la curva

$$d\sigma / d\varepsilon \dots\dots (V.3)$$

se conoce como Módulo Tangente. La pendiente de la secante OP, el cual es σ/ε , se conoce como Módulo Secante.

Un material se dice elástico, si después de someterlo a un esfuerzo y si se deja de aplicar este esfuerzo gradualmente hasta un esfuerzo cero, la deformación regresa a cero, pero posiblemente por un patrón diferente, Fig V.4 (c). Este efecto se llama Histéresis.

Los materiales idealizados de la Figura V.4 tienen un comportamiento elástico en sus diferentes modalidades hasta que repentinamente se rompen en el punto F. El comportamiento de una roca puede ser descrito de una mejor forma como sigue:

La curva Esfuerzo-Deformación (Fig V.5), se divide en 4 regiones:

1. Región OA, la cual es ligeramente convexa hacia arriba
2. Región AB, es una porción casi lineal
3. Región BC, la cual es cóncava hacia abajo, alcanzando un máximo en el punto C.
4. Región CD, es una porción con tendencia hacia abajo.

En la primeras dos regiones OA y AB el comportamiento es casi elástico; se puede observar que existe ligera histerisis, la aplicación de "carga" y "descarga" en esta región no produce cambios irreversibles en la estructura o propiedades de la roca. En la tercera región BC, la cual generalmente comienza a un esfuerzo del orden de las 2/3 partes del máximo valor C, la pendiente de la curva Esfuerzo-Deformación se decrementa a cero con el incremento del esfuerzo. En esta región se presentan cambios irreversibles en la roca y ciclos sucesivos de "carga" y "descarga" trazaran diferentes curvas. Un ciclo de "descarga" (PQ) conduce a una deformación permanente ε_0 a un esfuerzo cero (Fig V.5), si el material se somete nuevamente a una carga, trazara una curva QR que yace por debajo de la curva OABC pero finalmente se juntan.

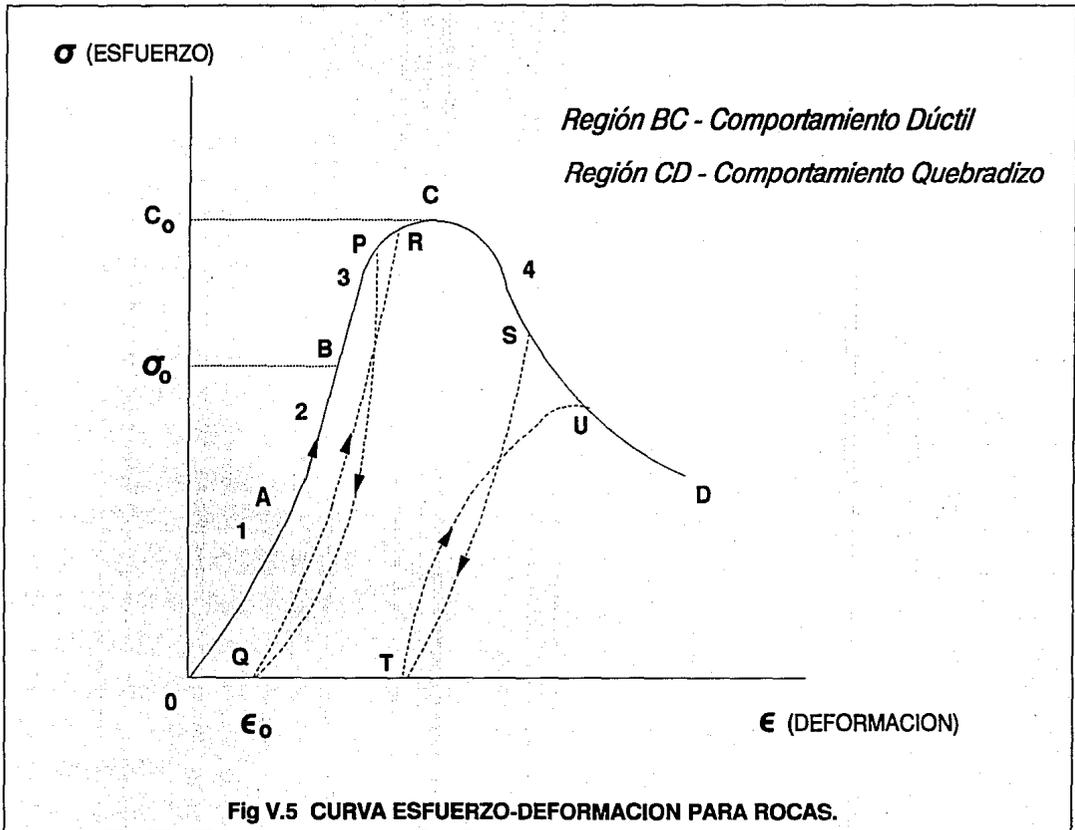


Fig V.5 CURVA ESFUERZO-DEFORMACION PARA ROCAS.

La cuarta región, CD, comienza en el máximo valor de la curva Esfuerzo-Deformación (C) y esta caracterizada por una pendiente negativa. Un ciclo de "Descarga" ST, a menudo conduce a una gran deformación permanente y una "Recarga" TU alcanza la curva CD a un esfuerzo menor que el correspondiente a S. Esta región CD es característica de un comportamiento quebradizo.

Se dice que un material es dúctil o se encuentra en estado dúctil bajo condiciones en la cuales puede soportar la deformación permanente sin perder su habilidad para resistir cargas. Por otra parte un material se dice que es quebradizo o se encuentra en estado quebradizo bajo condiciones en la cuales su habilidad para resistir cargas se decrementa con el incremento en la deformación.

Así, en la Figura V.5 el material se encuentra en estado dúctil en la región BC y en estado quebradizo en la región CD.

V.2.2 CONSTANTES ELÁSTICAS.³

Como se vió anteriormente una roca que se somete a un esfuerzo tiende a deformarse de manera previsible. Las relaciones que gobiernan este comportamiento (entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones correspondientes) se denominan constantes elásticas.

Las constantes elásticas pueden ser estáticas o dinámicas, según el método que se emplee para determinarlas. Las constantes estáticas se definen mediante mediciones en laboratorio, a través de aplicación gradual de esfuerzos, y las constantes dinámicas se determinan a través de propagación de ondas acústicas en un medio elástico.

Las constantes dinámicas se calculan a través de la utilización de registros tales como:

ΔT_c	Tiempo de tránsito compresional	($\mu\text{seg}/\text{pie}$)
ΔT_s	Tiempo de tránsito de cizallamiento	($\mu\text{seg}/\text{pie}$)
ρ_b	Densidad de la formación	(gr/cm^3)

Por ser definidas a partir de registros, las constantes elásticas dinámicas representan valores "in situ", siendo computadas en forma continua, en todo el intervalo registrado. En el caso de formaciones gasíferas, los registros deben corregirse para eliminar el efecto de gas en la zona de interés.

Las velocidades de las ondas sónicas se incrementan en las rocas y en otros materiales a medida que sus esfuerzos y dureza se incrementan. Las compañías de registros han utilizado extensivamente las relaciones entre las velocidades sónicas y las propiedades elásticas de las rocas para predecir las siguientes constantes elásticas dinámicas:

RELACION DE POISSON (μ)
 MODULO DE CIZALLAMIENTO (G)
 MODULO DE YOUNG (E)
 MODULO VOLUMETRICO (Kb)
 MODULO DE COMPRESIBILIDAD (Cb)

Se han desarrollado algunas ecuaciones relacionando las ondas sónicas con las propiedades elásticas de la siguiente forma:

Relación de Poisson (μ).

$$\mu = \frac{\text{Deformación Lateral}}{\text{Deformación Longitudinal}} = \frac{[0.5 (\Delta t_s / \Delta t_c)^2] - 1}{(\Delta t_s / \Delta t_c)^2 - 1} \dots (V.4)$$

Módulo de cizallamiento (G).

$$G = \frac{\text{Esfuerzo aplicado}}{\text{Deformación de Corte}} = 1.34 \times 10^{10} \frac{\rho b}{\Delta t_s^2} \dots (V.5)$$

Módulo de Young (E).

$$E = \frac{\text{Esfuerzo aplicado}}{\text{Deformación Normal}} = 2 G (1 + \mu) \dots (V.6)$$

Módulo volumétrico (K_b).

$$K_b = \frac{\text{Esfuerzo aplicado}}{\text{Deformación Volumétrica}} = 1.34 \times 10^{10} \rho_b \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3 \Delta t_s^2} \right) \dots\dots (V.7)$$

Módulo de compresibilidad (C_b).

$$C_b = \frac{\text{Deformación Volumétrica}}{\text{Esfuerzo aplicado}} = 1 / K_b \dots\dots (V.8)$$

Donde:

- μ = *Relación de poisson*
- G = *Modulo de cizallamiento* (lb/pg²)
- E = *Modulo de Young* (lb/pg²)
- K_b = *Modulo volumétrico* (lb/pg²)
- C_b = *Modulo de compresibilidad* (lb/pg²)⁻¹
- ΔT_s = *Tiempo de tránsito de cizallamiento* (useg/pie)
- ΔT_c = *Tiempo de tránsito compresional* (useg/pie)
- ρ_b = *Densidad de la formación* (gr/cm³)

Las constantes elásticas también pueden ayudar al reconocimiento de facies litológicas.

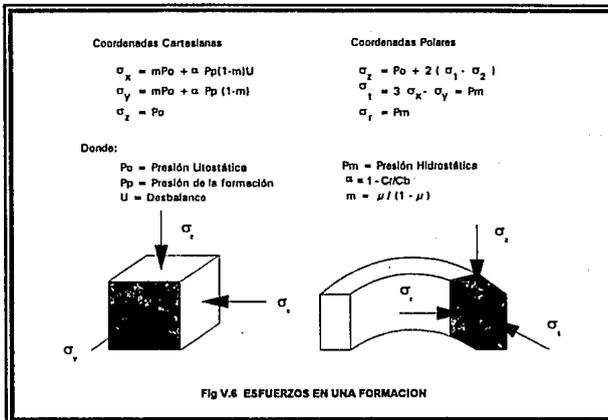
V.3 ESFUERZOS PRESENTES EN UNA FORMACION.

Los materiales sólidos pueden someterse a tres tipos diferentes de esfuerzos:

- COMPRESION**
- TENSION**
- CIZALLAMIENTO**

En un medio confinado existe una interacción entre los esfuerzos de compresión y de cizallamiento. Cualquiera de los dos puede inducir tensión sobre el otro.

Los esfuerzos a que se encuentra sometida una roca se calculan a partir de modelos matemáticos que se encuadran en teorías basadas en la mecánica de sólidos.



De este modo, pueden calcularse los esfuerzos a que se encuentra sometida una formación virgen, según tres direcciones de ejes ortogonales (σ_x , σ_y , σ_z), como se muestra en la Figura V.6. Esta Figura muestra también un esquema de la aplicación de estos esfuerzos sobre la formación, definidas en coordenadas radiales según las direcciones: vertical, tangencial y radial (σ_z , σ_t , σ_r).

La existencia de esfuerzos radial y tangencial sobre las paredes del pozo, también inducen esfuerzos de cizallamiento, los que pueden producir el desmoronamiento del mismo. Para determinar estos esfuerzos, se utiliza la teoría de la envolvente de Mohr, como puede observarse gráficamente en la Figura V.7. Sobre el eje "x" se grafican los valores de σ_r y σ_t y sobre el eje "Y" se definen los valores de los esfuerzos de cizallamiento.

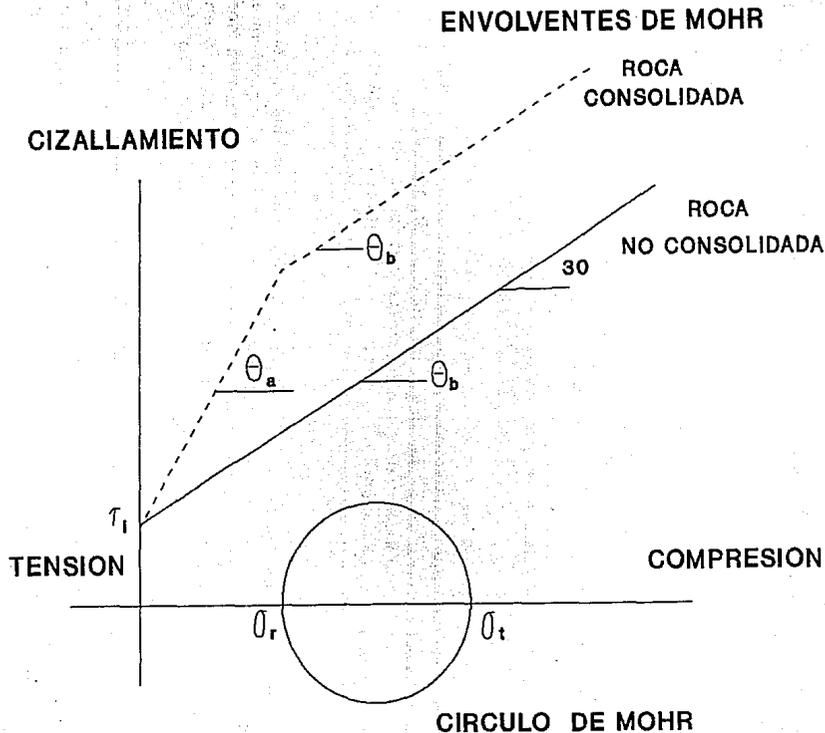


Fig V.7 CRITERIO DE LA ENVOLVENTE DE MOHR.

La forma de la envolvente de Mohr⁴ para rocas no consolidadas se representa por una línea recta de aproximadamente 30 grados con respecto al eje horizontal y que se incrementa constantemente. El ángulo de 30 grados representa el ángulo de fricción entre los granos de la arena. En la práctica este ángulo varía muy poco y generalmente se considera constante para todas las rocas (30°). Inicialmente el esfuerzo de cizallamiento es muy bajo pero se incrementa debido a la fricción generada mientras el esfuerzo compresional se incrementa.

Las rocas consolidadas generalmente tienen un ángulo de fricción alto (θ_0) para esfuerzos bajos, y un ángulo de fricción similar al de las rocas no consolidadas (θ_b) para esfuerzos altos. Este fenómeno puede explicarse debido a que los esfuerzos de cementación no son los mismos. El ángulo de fricción alto es el resultado del deslizamiento de las superficies rugosas una contra la otra y el ángulo de fricción bajo es el resultado del resbalamiento de los granos.

La Figura V.7 ilustra el comportamiento in situ de una sección de una formación.

La presión de poro y de sobrecarga generalmente son valores fijos y las únicas variables serán el peso del lodo o la presión hidrostática. Mientras la presión hidrostática se incrementa, el esfuerzo tangencial se decrementa y el esfuerzo radial se incrementa, y mientras la presión hidrostática se decrementa, el esfuerzo tangencial se incrementa y el esfuerzo radial se decrementa.

El centro del círculo de Mohr es el punto intermedio entre los esfuerzos tangencial y radial. Si la presión hidrostática disminuye demasiado hasta que el círculo exceda la envolvente de ruptura diseñada, producirá ruptura por cizallamiento de la formación provocando el desmoronamiento del pozo y en consecuencia la producción de arena. Esto ocurre cuando el esfuerzo de cizallamiento supera el efecto de compactación de la formación.

La resistencia inicial al cizallamiento de una roca es una consideración importante para predecir el comportamiento de una roca. El estudio del comportamiento de una roca ha conducido a establecer la siguiente relación empírica:

$$\tau_i = \frac{0.025 \times 10^6}{C_b} \times \text{RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAxIAL} \dots\dots (V.9)$$

Debido a la relación existente entre el esfuerzo compresivo de la roca con sus propiedades mecánicas, es posible determinar relaciones que proporcionen una predicción de este esfuerzo compresivo de la roca, a partir de registros geofísicos.

V.4 RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAXIAL.

Quando se efectúa una gráfica de Esfuerzo-Deformación (Fig V.5) se obtiene una curva cóncava hacia arriba, por lo que se tiene un punto máximo, el cual se conoce como esfuerzo compresivo uniaxial (C_0) y marca el punto de transición del comportamiento dúctil al quebradizo. A continuación se mencionan tres diferentes formas de calcularlo que incluyen datos de registros geofísicos, propiedades mecánicas de la formación y modelos matemáticos de perforación.

La resistencia a la compresión uniaxial (C_0) se utiliza para la selección de barrenas ya que representa la resistencia máxima previa a la ruptura, esta se basa en un modelo empírico desarrollado a partir del trabajo experimental de Deere y Miller, y elaborado por Coates y Denoo⁵, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_0 = \frac{a \cdot 0.026 E}{C_b \times 10^6} \left[0.008 \text{Varc} + 0.0045 (1 - \text{Varc}) \right] \dots\dots (V.10)$$

Donde:

C_0 = Resistencia a la compresión	(psi)
E = Modulo de Young	(psi)
C_b = Modulo de compresibilidad	(psi)
Varc = Volumen de arcilla	(fracción)

La constante "a" que aparece en la ecuación anterior es la relación entre el esfuerzo compresivo uniaxial y el esfuerzo de cizallamiento y se encuentra definida en términos del ángulo de fricción interna (ϕ):

$$\alpha = \frac{2 \cos \phi}{1 - \sin \phi} \dots\dots (V.11)$$

Como se vio anteriormente, generalmente se supone que el ángulo de fricción interna (ϕ) es de 30° para todas las rocas.

El índice de arcillosidad en porcentaje se calcula con la ayuda de los registros de rayos gamma. Se parte del supuesto de que la magnitud de la deflexión de la curva de rayos gamma, es proporcional al contenido de material radioactivo en el intervalo de formación que se analiza.

Así el contenido de arcilla será:

$$SH = \frac{(Co - Ag)}{(Ba - Ag)} * 100 \dots\dots (V.12)$$

Donde:

- SH = *Índice de arcillosidad (%)*.
- Ag = *Lectura mínima de rayos gamma (arenisco limpio o calcarea).*
- Ba = *Lectura máxima en rayos gamma (arcilla limpia).*
- Ca = *Lectura de rayos gamma en el intervalo de interés.*

Otra forma de calcular el valor de Co es mediante el modelo de perforación de Warren y Winters (ec. III.55). Este método patentado con fecha 3/Abril/1990, discute la forma de calcular el esfuerzo compresivo de una formación (Co) que es perforada por un pozo⁶. Para esto es necesario conocer el modelo matemático de la barrena, una estimación de la ductilidad de la roca, el peso sobre la barrena, la velocidad de rotación y el ritmo de penetración.

A partir de los datos anteriores, el esfuerzo compresivo de la formación puede determinarse durante o después de la perforación del pozo

Este método puede utilizarse también para obtener una indicación del desgaste de la barrena o el daño en esta, mientras se esta perforando el pozo; esto se logra comparando un primer registro de esfuerzo compresivo de un pozo a un registro de esfuerzo compresivo que se esta generando mientras se perfora un segundo pozo. Cualquier desviación entre los dos registros proporcionara una indicación del desgaste de la barrena o el daño en esta.

CARACTERISTICAS DEL METODO.

1. El método para determinar el esfuerzo compresivo de una roca comprende:
 - a) Obtener el modelo matemático de la barrena que va a ser empleada en la perforación del pozo.
 - b) Obtener una estimación del valor de la ductilidad de la roca.
 - c) Medir el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación mientras se esta perforando el pozo.
 - d) Determinar el esfuerzo compresivo de la roca, a partir de los datos obtenidos en los puntos anteriores.

2. El método incluye constantes de la barrena, las cuales se derivan empíricamente y son:
 - La constante "a" relaciona la indentación del diente de la barrena.
 - La constante "b" relaciona la configuración del diente.
 - La constante "c" relaciona la hidráulica del fluido de perforación.
 - La constante "φ" relaciona la excentricidad de los conos.

3. La ductilidad de la roca se determina a partir de información litológica obtenida de un pozo adyacente que penetre la formación.

4. El método emplea la siguiente ecuación:

$$\sigma = \left[\frac{W^2}{\alpha D^2 \epsilon} \left[\frac{N/R - b/D - (c N \rho \mu) / l m}{d} + \frac{\phi^2}{4 \alpha \epsilon} \right] \right]^{0.5} - \frac{\phi W}{2 \alpha D \epsilon^2}$$

Donde:

R = Ritmo de penetración	(pies/hr)
σ = Resistencia de la roca	(lb/pg ²)
D = Diámetro de la barrena	(pg)
N = Velocidad de rotación	(rpm)
W = Peso sobre la barrena	(Klbs)
ϵ = Ductibilidad de la roca	(%)
ϕ = Coeficiente de excentricidad de los conos	(L ⁻¹)
a, b, c = Constantes del diseño de la barrena	
ρ = Peso específico del fluido de perforación	(lb/gal)
μ = Viscosidad del lodo	(cp)
Im = Fuerza de impacto modificada	(lbs)

5. El método permite generar un registro de esfuerzo compresivo de la roca, el cual comprende:
 - a) Obtener el modelo matemático de la barrena que va a ser empleada.
 - b) Obtener una estimación de la ductilidad de la roca.
 - c) Medir el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación mientras se está perforando el pozo.
 - d) Determinar el esfuerzo compresivo de la roca, a partir de los datos obtenidos en los puntos anteriores.
 - e) Obtener el gráfico de profundidad vs. esfuerzo compresivo.

6. En el punto 5 se obtiene un registro de esfuerzo compresivo contra la profundidad en un tiempo real mientras el pozo se está perforando.

Una forma más de calcular la resistencia a la compresión es relacionando la densidad y porosidad de la formación⁷. La densidad de la roca es una relación directa entre el volumen de espacios vacíos y la matriz de la roca para una litología particular. Entre más grande sea la densidad de la roca, más grande es su resistencia a la compresión y menor su porosidad. Smorodinov y colaboradores determinaron dos relaciones entre el esfuerzo compresivo de la roca, la densidad de la formación y la porosidad para un grupo de rocas carbonatadas. Ellos propusieron que la resistencia a la compresión de la roca (C_o) puede relacionarse a la densidad y porosidad de la

siguiente forma:

$$C_o = 0.88 \text{ EXP } (2.85 \rho) \dots\dots (V.13)$$

$$C_o = 2590 \text{ EXP } (-0.91 \phi) \dots\dots (V.14)$$

Donde:

C_o = Resistencia a la compresión *(Kg/cm²)*
 ρ = Densidad de la formación *(gr/cm³)*
 ϕ = Porosidad *(%)*

El tamaño y forma del grano a menudo se ignoran en el análisis de las propiedades mecánicas de la roca. Es importante notar que el tamaño, forma e imperfecciones del grano juegan un papel importante en la determinación de la resistencia a la compresión de la roca. Entre más fino sea el grano, mayor será su resistencia a la compresión.

V.5 SELECCION DE BARRENAS CON REGISTROS GEOFISICOS.

Una vez que se ha determinado el valor de la resistencia a la compresión de la roca (C_o), por cualquiera de los procedimientos anteriores, tenemos diferentes métodos que nos permitirán seleccionar el tipo de barrena óptimo. En general todos ellos establecen una correlación entre la litología de la formación, la resistencia a la compresión de la roca y el tipo de barrena recomendado (código IADC).

En este trabajo se mencionan dos de estos métodos de selección:

- 1) METODO DE MASON
- 2) METODO DE ROCA

V.5.1 METODO DE MASON.⁹

En este método se correlacionan la dureza de la formación y el esfuerzo de compresión contra el tiempo de cizallamiento, el cual conduce a desarrollar una correlación entre el tipo de barrena más económico y el tiempo de tránsito de cizallamiento, estableciéndose límites tanto inferior como superior en la selección del tipo de barrena óptimo, esto para minimizar el costo por pie cuando se planea la perforación de un pozo.

Con este método se tiene un programa de selección de barrenas tricónicas que ayuda a optimizar la perforación de pozos petroleros, mediante el empleo de una guía de selección (Fig V.8) que involucra doce diferentes pasos y que se mencionaran a continuación:

GUIA DE SELECCION DE BARRENAS TRICONICAS.

La guía de selección de barrenas tricónicas se desarrolló para ayudar al personal de perforación a determinar el tipo de barrena más adecuado durante la etapa de planeación del pozo. Esto se logra mediante los siguientes pasos:

1. OBTENER LAS CIMAS DE LA FORMACION A SER PERFORADA.

En el proceso de selección de barrenas es más importante tener los registros que representen mejor la litología que va a ser perforada, que tener los registros del "mejor" pozo perforado. Estos registros pueden obtenerse de un pozo vecino que se encuentre suficientemente cerca del pozo planeado, esto a fin de evitar ajustes de la localización de las cimas de las formaciones a ser perforadas.

2. OBTENER LOS REGISTROS SONICOS.

Deberían tenerse registros de tiempo de transito de cizallamiento de todo el pozo o el intervalo donde se requiera efectuar la selección de una barrena. Si se cuenta con este registro se puede saltar el paso 5, lamentablemente estos registros no se corren rutinariamente.

El principal registro utilizado para conocer el tiempo de tránsito de cizallamiento es el registro sónico compresional (ecs V.15 a la V.22). Si este registro no se encuentra disponible, se puede generar uno a partir de las mediciones de porosidad (ec V.16), aunque esto a veces es erróneo debido a

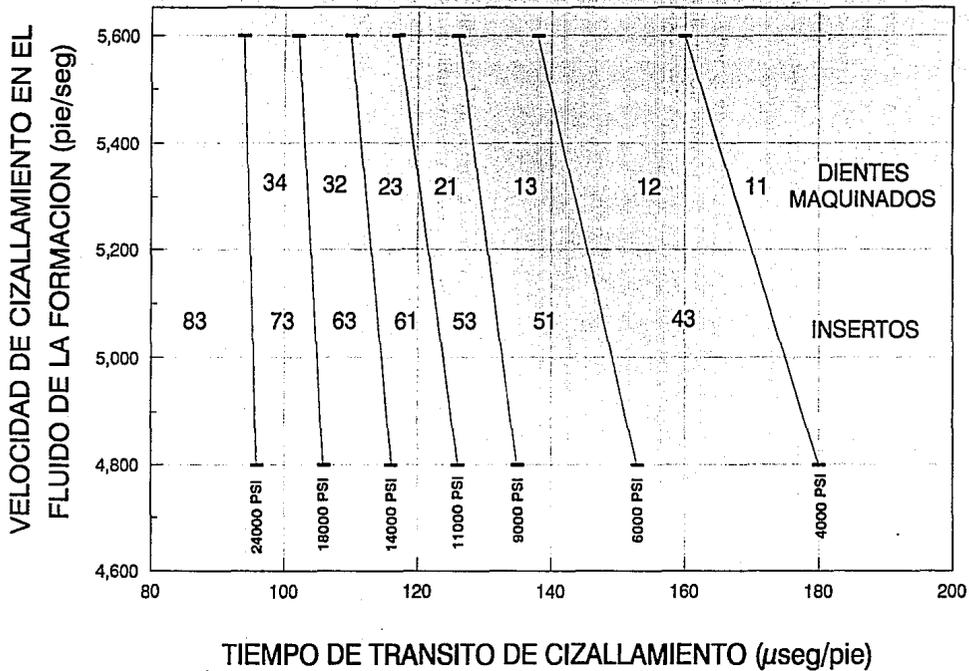


Fig V.8 GUIA DE SELECCION DE BARRENAS TRICONICAS

las inconsistencias entre los diferentes registros que ayudan a calcular la porosidad.

Se ha determinado experimentalmente que la velocidad sónica compresional puede correlacionarse con la dureza, perforabilidad y resistencia a la compresión de la roca. Diversos estudios han mostrado la necesidad de distinguir entre las litologías existentes, debido a que diferentes tipos de formación pueden tener la misma velocidad sónica compresional pero se perforan mejor con diferentes tipos de barrenas. El uso de la velocidad sónica compresional por lo tanto requiere el desarrollo de una correlación de selección de barrenas diferente para cada tipo de litología. Debido a este problema, es necesario calcular la velocidad sónica de cizallamiento.

El tiempo de tránsito de cizallamiento (ΔT_s), o el inverso de la velocidad de cizallamiento, puede estimarse a partir del tiempo de tránsito compresional (ΔT_c) y de la relación ($\Delta T_s / \Delta T_c$) para cada litología con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_s = \Delta T_c * (\Delta T_s / \Delta T_c) \dots\dots (V.15)$$

Mason utilizó las velocidades compresionales a partir del trabajo de Gstalder y Raynal¹⁰ convirtiéndolas a velocidades de cizallamiento utilizando la ecuación anterior y los valores de ($\Delta T_s / \Delta T_c$) los obtuvo a partir de la Tabla V.1. Los resultados mostraron una excelente correlación entre la velocidad de cizallamiento calculada y la dureza Schreiner (En esta prueba se aplican cargas gradualmente hasta que ocurre la fractura de la roca).

Debido a que la dureza es un indicador de la resistencia a la compresión de la roca, es necesario determinar la correlación existente entre la velocidad sónica compresional y la resistencia a la compresión. Algunas veces no es posible contar con el registro sónico por lo que los tiempos compresionales se calculan a partir de la porosidad con la siguiente relación:

$$\Delta T_c = \Delta T_{m0} (1 - \phi) + \Delta T_f \phi \dots\dots (V.16)$$

Si se efectúan las gráficas de ΔT_c vs. Co y de ΔT_s vs. Co se determina que la velocidad de cizallamiento muestra una mejor correlación con la

**RELACION ENTRE EL TIEMPO DE TRANSITO
CIZALLAMIENTO/COMPRESIONAL PARA
DIFERENTES LITOLOGIAS**

LITOLOGIA DE LA FORMACION	RELACION DTs / DTc	VELOCIDAD EN LA MATRIZ (ft / seg)
Arcillita	1.90	19000
Arcilla	3.20	6000
Anhidrita	2.45	20000
Arenisca (Limpia)	1.60	19500
Arenisca (Limosa)	1.70	19500
Arenisca (Arcillosa)	1.85	19500
Basalto	1.55	20150
Caliza (Limpia)	1.90	21000
Caliza (Limosa)	2.10	21000
Caliza (Arcillosa)	2.30	21000
Carbonato ferroso	2.45	8500
Cuarcita	1.50	21500
Cuarzo	1.55	20000
Diabasa	1.70	22700
Diorita	1.75	22000
Dolomita	1.80	25000
Epidosita	1.70	23000
Gabro	1.60	23500
Gnais	1.80	25000
Granito	1.70	21350
Hornsteno	1.85	25000
Limolita	1.80	23000
Lodolita	1.85	19000
Lutita	1.70 a 1.75	19500
Mármol	1.80	24000
Pedernal	1.60	22300
Pirita	1.70	28000
Sal	2.15	15000
Yeso	2.45	19050

Tabla V.1

resistencia a la compresión de la roca.

Se nota que a medida que la porosidad de una litología se mantiene constante, la resistencia a la compresión varía con el tamaño del grano. En general, entre más grande sea el tamaño del grano, la roca es más débil. Una relación empírica que representa este efecto se muestra a continuación:

$$\Delta T_s = \Delta T_c * (\Delta T_s / \Delta T_c)^\alpha \dots\dots (V.17)$$

En la cual el exponente α es una función del tamaño del grano (Tabla V.2).

3. OBTENER TODOS LOS REGISTROS DE PERFORACION DISPONIBLES.

Esta guía de selección de barrenas se desarrolló para emplearse con buenos sistemas hidráulicos y de lodo. De hecho para obtener una mejor selección de la barrena es recomendable aplicarse en campos que tengan las siguientes características:

- i) Con cimas anchas
- ii) Con un tipo de litología uniforme
- iii) Optimización del lodo, hidráulica y condiciones de operación

Los 2 primeros dígitos (código IADC) de la guía representan a la estructura de corte necesaria para producir la corrida de barrena más económica. El tercer dígito del código IADC permanece libre para permitir el uso de los registros de perforación y así determinar el tipo de protección del calibre y/o el tipo de cojinete necesario.

A partir de estos registros de perforación se determinaran las características especiales del tipo de barrena.

4. IDENTIFICAR TODAS LAS LITOLOGIAS DE LA FORMACION.

Es necesario identificar todas las litologías de la formación para que la relación $(\Delta T_s/\Delta T_c)$ pueda determinarse de la Tabla V.1 y usarla en la ec V.15 o V.22. Si los cálculos se están computando a partir de medidas de porosidad, es necesario determinar la velocidad de tránsito en la matriz de la roca a partir de la Tabla V.1 y aplicar la ecuación V.16.

**FACTOR DE CORRELACION α
POR DIAMETRO DEL GRANO**

GRANO	DIAMETRO (mm)	FACTOR α
Cieno	< 1/16	0.9
Grano muy fino	1/16 a 1/8	0.95
Grano fino	1/8 a 1/4	1
Grano Medio	1/4 a 1/2	1.05
Grano Grande	1/2 a 1	1.1
Grano Muy Grande	1 a 2	1.15
Granulos	2 a 4	1.2
> Granulos	> 4	> 1.3

Tabla V.2

5. CALCULAR EL TIEMPO DE TRANSITO DE CIZALLAMIENTO.

Una vez que el registro se divide en intervalos que parecen tener la misma litología básica y que la litología ha sido identificada, el tiempo de tránsito de cizallamiento promedio se lee del registro sísmico.

Debido a que los tiempos de tránsito de cizallamiento casi nunca se encuentran disponibles, es necesario calcularlos. Esto se hace por medio de la ecuación V.15. Si se tienen mezclas de litologías, es necesario identificar el volumen de cada litología presente y efectuar el cálculo a partir de las siguientes expresiones:

$$V_A + V_B = 1 \dots\dots (V.18)$$

$$\Delta T_{cm} = V_A \Delta T_{CA} + V_B \Delta T_{CB} \dots\dots (V.19)$$

Donde:

V_A = Fracción de litología A presente en la mezcla.

V_B = Fracción de litología B presente en la mezcla.

ΔT_{CA} = Tiempo de tránsito compresional de la litología A.

ΔT_{CB} = Tiempo de tránsito compresional de la litología B.

ΔT_{cm} = Tiempo de tránsito compresional de la mezcla.

La solución para la fracción de litología A (V_A) y la fracción de litología B (V_B) es:

$$V_B = \frac{\Delta T_{cm} - \Delta T_{CA}}{\Delta T_{CB} - \Delta T_{CA}} \dots\dots (V.20)$$

$$V_A = 1 - V_B \dots\dots (V.21)$$

Una vez conocidos estos valores, el tiempo de tránsito de cizallamiento puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T_s = V_A \Delta T_{CA} \left[(\Delta T_s / \Delta T_c)_A \right] + V_B \Delta T_{CB} \left[(\Delta T_s / \Delta T_c)_B \right] \dots\dots (V.22)$$

Donde $(\Delta T_s / \Delta T_c)_A$ es la relación de la Tabla V.1 para la litología A y $(\Delta T_s / \Delta T_c)_B$ es la relación de la misma Tabla para la litología B.

Para mezclas de más de dos litologías, se necesitan tener muestras para determinar la fracción de cada litología presente, una vez que las fracciones de cada componente se conocen, el tiempo de tránsito se calculara igual que para las mezclas con dos componentes.

6. DENOTAR CAMBIOS REPENTINOS EN LA LITOLOGIA.

Se deben tomar cuidados adicionales cuando se tienen barrenas con dientes largos que atraviezan formaciones con cambios en la litología, esto para prevenir un daño prematuro en la estructura de corte. La magnitud de la diferencia entre formaciones suaves y duras puede necesitar el empleo de una barrena para formación más dura que la obtenida a partir de la guía de selección de barrenas tricónicas o una reducción de la energía (peso sobre la barrena y velocidad de rotación) disponible en la barrena hasta que el intervalo con cambio de litología haya sido penetrado.

7. GRAFICAR LOS TIEMPOS DE TRANSITO DE CIZALLAMIENTO PROMEDIOS.

Después que se han efectuado todos los cálculos del tiempo de tránsito de cizallamiento, es necesario efectuar un promedio de estos para suavizar los cambios entre los intervalos seleccionados y obtener una gráfica de ΔT_s vs. Profundidad.

8. DETERMINAR EL TIEMPO DE TRANSITO EN EL FLUIDO DEL PORO.

Ya conocidos los tiempos de tránsito de cizallamiento, es necesario determinar los efectos que las propiedades del fluido de la formación tienen sobre el tiempo de tránsito en este fluido. El registro sónico compresional es una herramienta de investigación superficial por lo que la lectura de este

registro reflejara la zona de invasión del filtrado del lodo. Por lo tanto el tiempo de tránsito del fluido del poro se determina a partir de los valores de resistividad del filtrado del lodo. La salinidad del filtrado del lodo se determina mediante cartas de interpretación de registros de las diferentes compañías y debe corregirse por temperatura y presión.

La velocidad sónica del fluido de la formación debe calcularse en diferentes lugares del intervalo para tomar en cuenta los continuos cambios de temperatura y presión. Si el registro es una combinación de más de una corrida de registro (en el cual el fluido de perforación se cambio en cada corrida), el tiempo de tránsito del fluido de la formación debe determinarse al principio y fin de cada sección.

Si el tiempo de tránsito de cizallamiento se generó a partir de mediciones de porosidad, el tiempo de tránsito del fluido de la formación será el valor utilizado en la ecuación V.16.

9. DETERMINAR LOS LIMITES INFERIOR Y SUPERIOR DE Δt_s .

Se entra en la guía para selección de barrenas tricónicas (Fig V.8) para cada uno de los tiempos de tránsito de cizallamiento del fluido de la formación necesarios para cubrir el pozo completamente y determinar las intersecciones en la guía.

Proyectar las intersecciones que se tienen con la resistencia a la compresión de la roca al eje del tiempo de tránsito de cizallamiento para determinar los límites tanto inferior como superior del tipo de barrena recomendado.

10. DESARROLLAR UNA GUIA SOBREPUESTA.

Crear una guía sobrepuesta en la misma gráfica (a la misma escala) que muestra los valores del tiempo de tránsito de cizallamiento calculados (paso 7) con los límites obtenidos en el paso 9. Efectuar esto para cada intervalo usado al desarrollar un registro compuesto o desarrollar una guía para todo el pozo. Con esto obtendremos una gráfica que nos relaciona los límites del tiempo de tránsito de cizallamiento y el tipo de barrena óptimo recomendado dentro de estos límites.

11. SOBREPONER EL REGISTRO DE Δt_s Y SELECCIONAR EL TIPO DE BARRENA.

Sobrepone (del paso 10) el registro del tiempo de tránsito de

cizallamiento (paso 7) y determinar las barrenas tricónicas (código IADC) necesarias para perforar los intervalos en una forma económica.

12. DETERMINAR EL TIPO DE BARRENA OPTIMO.

Finalmente, se debe determinar el tercer dígito del código IADC ayudándose de los registros de perforación. También se debe checar el programa de la hidráulica y el lodo para el pozo propuesto a fin de determinar las condiciones óptimas de operación.

Si se recomienda una barrena para formación dura, se debe determinar si el pozo propuesto tendrá la correcta hidráulica para limpiar el fondo del agujero, junto con el suficiente equipo de control de sólidos para mantener el peso del lodo. Si no se puede proporcionar un lodo y una hidráulica eficientes puede ser necesario emplear una barrena con dientes más largos (barrena para formación suave) para perforar el intervalo.

EJEMPLO

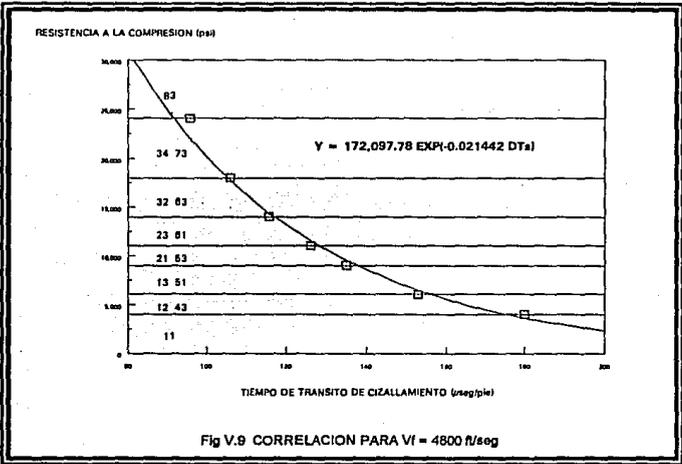
A manera de ejemplo de la utilización de esta guía de selección de barrenas tricónicas (Fig V.8) tomemos los límites del tiempo de tránsito del fluido de la formación (178 y 208 μ seg/pie) y efectúemos la lectura para cada uno de los valores de la resistencia a la compresión. Los datos leídos se muestran en la Tabla V.3.

Por lo que finalmente tendremos 2 correlaciones del tiempo de tránsito de cizallamiento, resistencia a la compresión de la roca y el tipo de barrena óptimo (Fig V.9 y V.10).

Las ecuaciones obtenidas de estas correlaciones para que a partir del valor del tiempo de tránsito de cizallamiento se pueda conocer el valor de la resistencia a la compresión son:¹⁰

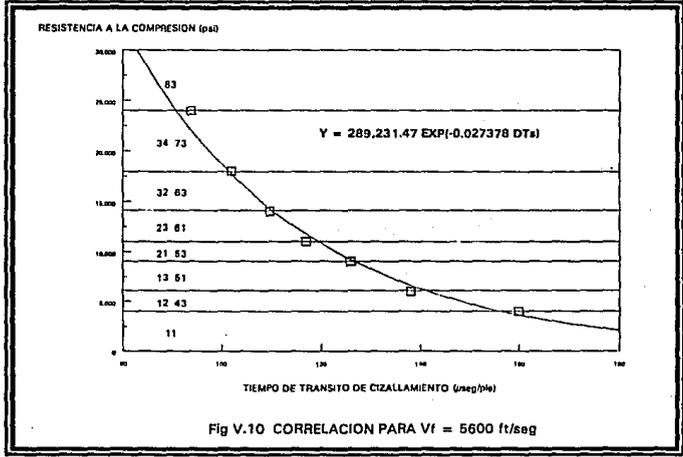
Para $V_f = 4800$ ft/seg en el fluido de la formación

$$C_o = 172,097.78 \text{ EXP} (- 0.021442 \Delta T_s) \dots\dots (V.23)$$



Para $V_f = 5600 \text{ ft/seg}$ en el fluido de la formación

$$C_o = 289,231.47 \text{ EXP} (- 0.027378 \Delta T_s) \dots\dots (V.24)$$



VELOCIDAD DEL FLUIDO = 4800 ft/seg

DTs (μ seg/pie)	Co (psi)	CODIGO IADC	
		DIENTES MAQUINADOS	INSERTOS
96	24000	-	83
106	18000	34	73
116	14000	32	63
126	11000	23	61
135	9000	21	53
153	6000	13	51
180	4000	11	-

VELOCIDAD DEL FLUIDO = 5600 ft/seg

DTs (μ seg/pie)	Co (psi)	CODIGO IADC	
		DIENTES MAQUINADOS	INSERTOS
94	24000	-	83
102	18000	34	73
110	14000	32	63
117	11000	23	61
126	9000	21	53
138	6000	13	51
160	4000	11	-

Tabla V.3

V.2.2 METODO DE ROCA.

Roca realizó su estudio a partir de la evaluación de ocho pozos, siete localizados en la Cuenca de Maracaibo y uno en la Cuenca Neuquina en Argentina. En estos pozos se recolectó información sobre las diferentes formaciones atravesadas, las condiciones de perforación empleadas y el tipo de barrena seleccionado.

Una vez que la información de campo fue procesada, se realizaron los cálculos de la resistencia a la compresión uniaxial (C_o). Los valores de C_o se compararon con los ritmos de penetración (ROP) con la finalidad de establecer una correlación entre estos dos parámetros.

CORRELACION ENTRE ROP Y C_o .

Para poder utilizar el parámetro de C_o para la selección de las barrenas más apropiadas, es necesario establecer su relación con el ritmo de penetración (ROP). Con este propósito se evaluaron los ritmos de penetración obtenidos en los pozos estudiados contra los valores de C_o calculados. Una vez hecho esto, se elaboraron las gráficas para cada uno de los pozos, observándose que existía una marcada segregación de puntos reflejando el efecto de la litología, además las formaciones calcáreas poseían un valor de C_o bastante elevado experimentando ritmos de penetración más bajos, en comparación con las demás litologías perforadas.

A partir de las gráficas se determinó que la función que más se acercaba a este comportamiento era de tipo hiperbólico, la relación obtenida es:

$$ROP = a + \frac{b}{C_o} \dots\dots (V.25)$$

Se concluyó que los coeficientes a y b son diferentes para cada pozo, lo cual refleja el efecto de diferentes litologías perforadas, condiciones de operación, tipos de barrenas e hidráulica utilizada. A partir de este estudio, se hacía evidente que existe una buena correlación entre el ritmo de penetración y C_o en los pozos estudiados, sin embargo esta solo puede utilizarse en pozos vecinos donde se prevean condiciones similares. Para poder estandarizar la correlación es necesario normalizar los ritmos de penetración en función de diferentes litologías y condiciones de operación.

SELECCION DE BARRENAS UTILIZANDO Co.

Una vez que se obtiene el valor de la resistencia a la compresión uniaxial (Co), la cual como se vió anteriormente esta directamente relacionada con el ritmo de penetración (ROP), es necesario integrarla en un esquema selectivo que permita optimizar el programa de selección de barrenas.

La Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC) clasifican a los diferentes tipos de barrenas existentes en el mercado, en seis categorías diferentes, basándose en el tipo de litología para la cual fueron diseñadas y en la resistencia a la compresión de las mismas:

FORMACIONES MUY DEBILES
FORMACIONES DEBILES
FORMACIONES MEDIANAMENTE DEBILES
FORMACIONES MEDIANAMENTE DURAS
FORMACIONES DURAS
FORMACIONES EXTREMADAMENTE DURAS

Esta clasificación, de tipo cualitativo, va desde arcillas plásticas con baja resistencia a la compresión, hasta rocas extremadamente duras y abrasivas como la cuarzita. La resistencia a la compresión, aunque se expresa en forma cualitativa en la clasificación de la IADC, es análoga al parámetro Co. Para poder utilizar como base la clasificación de la IADC y el parámetro de Co como patrón comparativo, fue necesario asignar valores máximos y mínimos de Co a cada una de las categorías dentro de la misma. La Tabla V.4, presenta la clasificación de la IADC, incluyendo los valores de Co para cada una de las categorías con sus respectivas litologías.

El procedimiento para utilizar esta clasificación consiste en:

1. Calcular el valor de la resistencia a la compresión uniaxial (Co), en forma continua, a lo largo del intervalo de interés. Para facilitar la selección del Co más representativo, es necesario un promedio del mismo basado en un método de interpolación, mediante el cual se promedien valores de Co en intervalos discretos.
2. Una vez que se tienen los valores de Co en diferentes intervalos se procede a seleccionar las barrenas más adecuadas utilizando la clasificación propuesta (Tabla V.4). La clasificación es general y no discrimina por tipo de barrena.

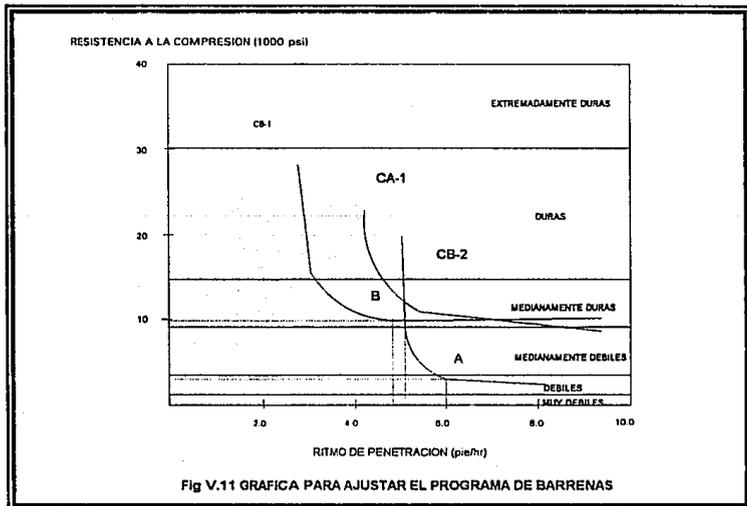


TIPO DE LITOLOGIA DE LA FORMACION	RESISTENCIA A LA COMPRESION (PSI)	CODIGO IADC / API
Formaciones muy débiles - Alta plasticidad con baja resistencia (margas y arcillas)	< 1500	111 - 117 / 415 - 427
Formaciones débiles - Baja resistencia (Margas, Evaporitas y Lutitas)	1500 - 3000	121 - 127 / 435 - 527
Formaciones débiles a Medianamente débiles - baja resistencia, interlaminaadas con secuencias de alta resistencia (Lutitas, Pizarras, Lignitos)	3500 - 7500	131 - 137 / 537 - 547
Formaciones medianamente duras - Alta densidad, alta resistencia, pero sin lentes abrasivos (Lutitas, Areniscas y Carbonatos)	7500 - 15000	211 - 221 / 617 - 637
Formaciones Duras - Alta resistencia, con lentes abrasivos (Areniscas, Limolitas y Dolomitas)	15000 - 30000	316 - 347 / 732 - 737
Formaciones Extremadamente Duras - Resistencia muy alta, muy abrasivas (Rocas Igneas y Metamórficas)	> 30000	832 - 837

Tabla V.4

De los pozos evaluados en la Cuenca de Maracaibo se seleccionaron dos como claves: CA-1 y CB-1, con los cuales se estableció una correlación que fue utilizada en un tercer pozo: CB-2, para optimizar el programa de selección de barrenas. El beneficio que se obtuvo al optimizar el programa de barrenas para este pozo, no fue solo en el menor número de barrenas empleadas, sino en el menor tiempo de equipo utilizado y a las mejores condiciones del pozo, lo cual lógicamente condujo a un menor costo en la perforación del pozo.

La figura V.11 representa la clasificación de la IADC superpuesta con la relación obtenida entre el ritmo de penetración (ROP) y C_o para los tres pozos evaluados. Este tipo de gráficas sirven para evaluar y ajustar los programas optimizados de selección de barrenas. Por ejemplo, si se perfora un pozo vecino al CB-2, y se obtiene un ritmo de penetración de 6.0 pie/hr (punto A), sabemos que estamos en una formación con una resistencia de 3000 psi. Si el ritmo de penetración baja a 5.0 pie/hr (punto B) entonces se estará atravesando una formación con una resistencia aproximada de 10000 psi. Si el ritmo de penetración cae por debajo de 4.6 pie/hr (punto C), la resistencia de la formación perforada es aún mayor, y la correlación establecida no se aplica. Con esta información el operador puede decidir si se sigue con el mismo tipo de barrena o si cambia la barrena o las condiciones de operación sobre esta.



V.5.3 METODO DE PINHEIRO Y LINARES.

Además de estos dos métodos (Mason y Roca), se tienen otros trabajos que hablan sobre la selección del tipo de barrena empleando registros geofísicos, otro de ellos que presenta Tablas de correlación es el de Pinheiro y Linares. Estos autores, utilizaron un método de selección de barrena (código IADC) en función de la porosidad, tiempo de tránsito y litología, en campos de Brasil, obteniendo óptimos resultados, una Tabla propuesta por estos autores se muestra en la Tabla V.5.

**CODIGO IADC EN FUNCION DEL TIEMPO DE TRANSITO,
ARCILLOSIDAD Y LITOLOGIA**

LECTURA REGISTRO SONICO (μ seg / pie)	CODIGO DE LA BARRENA (I A D C)	ARCILLOSIDAD / LITOLOGIA (%)
65 - 75	2 1 o 5 1	Formaciones superficiales poco consolidadas: Arenas, Rocas calcáreas, Margas y Dolomía
75 - 85	1 3	
85 - 95	1 2	
más de 95	1 1	
70 - 80	5 1	0 - 20 %
60 - 70	5 3	
más de 65	5 1	20 - 30 %
55 - 65	5 3	
más de 90	4 3 o 1 1	30 - 40 %
65 - 90	5 1	
55 - 65	5 3	
45 - 50	6 1	Cálcarea / Dolomita / Anhidrita
50 - 60	5 3	
más de 60		
más de 60	5 1	Basalto
55 - 60	5 1	

Tabla V.5

VI

EJEMPLO DE CALCULO

El ejemplo de cálculo se hará para el pozo Luna 33, perteneciente al Distrito de Comalcalco. Se utilizarán datos de registros de barrenas: Tiempo de rotación, Peso sobre barrena, Velocidad de rotación, Diámetro de barrena, Desgaste del diente y del balero, Tipo de diente e Intervalo perforado y datos de registros geofísicos: Volumen de arcilla, Densidad de la formación y Tiempo de tránsito compresional.

El proceso de optimización en la selección de barrenas tricónicas estudiado en este trabajo se divide en dos etapas:

1. **Selección del tipo óptimo de barrena (código IADC).**
2. **Optimización de las condiciones de operación (Peso sobre barrena y Velocidad de rotación) de la barrena seleccionada.**

Con respecto a la selección de las condiciones óptimas se efectuará a partir de 630 y hasta 6194 mts., por otra parte debido a que no se tienen completos los datos de los registros geofísicos, la selección del tipo de barrena se hará únicamente para intervalos entre 5250 y 6150 mts. Además se tomarán aquellos intervalos en los que se observe que los valores del tiempo de tránsito compresional, densidad de la formación y volumen de arcilla no varíen considerablemente, esto a fin de que los valores promedio sean lo más representativo posible.

Este ejemplo tiene como objetivo obtener una selección de barrena adecuada a las características de la formación que se va a perforar, así como la optimización de las condiciones a las que trabajará esta barrena. Esto se logra mediante la combinación del Método de Roca y del Método de Galle y Woods, que representan la Selección y Optimización de la barrena respectivamente.

Para llevar a cabo la optimización es necesario conocer las constantes de perforabilidad, abrasividad y de desgaste del balero con datos de pozos vecinos leídos en los récords de barrenas, para poder aplicar el modelo matemático correspondiente; mientras que para efectuar la selección necesitamos conocer el

valor de la resistencia que posee la roca a partir de datos de registros geofísicos y relacionarla al código IADC.

A continuación se muestra la forma en que se consigue esto.

VI.1 SELECCION DEL TIPO OPTIMO DE BARRENA

Para determinar el tipo óptimo de barrena (código IADC) necesitamos conocer el valor de la resistencia a la compresión de la roca (C_o), que para este ejemplo se hará por medio del método elaborado por Coates y Denoo:

Empleando la ecuación V.10:

$$C_o = \frac{a \cdot 0.026 \cdot E}{C_b \times 10^6} [0.008 \text{ Varc} + 0.0045 (1 - \text{Varc})]$$

Sustituyendo valores en esta ecuación, tenemos:

$$C_o = \frac{3.464 \cdot 0.026 \cdot 4.8 \cdot 10^6}{2.789 \cdot 10^{-7} \cdot 10^6} [0.008 (0.68) + 0.0045 (1 - 0.68)]$$

$$C_o = 10666.49$$

En la ecuación anterior el valor del volumen de arcilla es dato y los valores de a , E y C_b se calculan mediante las ecuaciones V.11, V.6 y V.8 respectivamente:

$$a = \frac{2 \cos \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{2 \cos 30^\circ}{1 - \sin 30^\circ} = 3.464$$

Para poder efectuar los cálculos del módulo de young y del módulo de compresibilidad, es necesario conocer el tiempo de tránsito de cizallamiento, por lo que una vez identificada la litología como limolita podemos calcularlo por medio

del tiempo de tránsito compresional leído del registro sísmico, a partir de la ecuación V.15 y con la relación mostrada en la Tabla V.1:

$$\Delta T_s = 76.199 * (1.8) = 137.158$$

Si leemos además el valor de la densidad de la formación del registro de densidad, estaremos en posibilidad de conocer las constantes elásticas dinámicas:

$$\mu = \frac{[0.5 (1.8)^2] - 1}{(1.8)^2 - 1} = 0.2768$$

$$G = 1.34 \times 10^{10} \frac{(2.640)}{(137.158)^2} = 1.88 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$E = 2 * 1.88 \times 10^6 (-1 + 0.2768) = 4.8 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$K_b = 1.34 \times 10^{10} \frac{2.640}{(76.199)^2} \left(\frac{1}{3} - \frac{4}{(137.158)^2} \right) = 3.585 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$C_b = 1 / 3.585 \times 10^6 = 2.789 \times 10^{-7} \text{ psi}^{-1}$$

El cálculo anterior fue para el primer metro perforado por la barrena 6 de la tercera etapa (8 3/8"), cuyos datos se muestran en la Tabla VI.1.

Para nuestro ejemplo se efectuaron los cálculos para 6 barrenas de la

tercera etapa mediante un programa de cómputo. Los cálculos se realizaron metro por metro hasta cubrir el intervalo perforado por cada barrena, el resumen de los resultados arrojados por el programa se muestran en las tablas VI.1 a la VI.6. Estas tablas muestran 5 columnas de las cuales las cuatro primeras son datos leídos de los registros geofísicos y la última representa el cálculo de la resistencia a la compresión de la roca.

Tal y como se indica en el método de Roca es necesario seleccionar el valor más representativo de la resistencia a la compresión de la roca, por lo que se debe efectuar un promedio de todos los valores obtenidos para cada una de las barrenas. La Tabla VI.7 muestra los valores promedio de la resistencia a la compresión de la roca de cada barrena y el tipo de barrena óptimo recomendado para ese valor comparado con el tipo de barrena empleado en la perforación del pozo. Como se puede observar en esta Tabla, las barrenas utilizadas en este pozo son para formaciones más débiles de las que realmente se perforaron. Si se hubieran utilizado las barrenas recomendadas, aún utilizando parámetros operacionales similares, el ritmo de penetración hubiera sido mayor debido a que el desgaste de dientes y baleros no habría sido tan excesivo (las barrenas salieron casi totalmente gastadas).

VI.2 OPTIMIZACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.

Para seleccionar las condiciones de operación utilizaremos el Modelo de Galle y Woods, esto debido a que en este modelo no se necesitan hacer pruebas de campo y es de fácil solución, lo cual no indica que los resultados no sean confiables, sino por el contrario daran una idea bastante clara de lo que sucede con la barrena cuando esta perforando, esto representa la principal ventaja sobre los demás modelos de perforación vistos.

Primeramente efectuamos el cálculo de las constantes de la formación y de los baleros (A_f , D_f y S) con datos de pozos vecinos.

VI.2.1 ABRASIVIDAD DE LA FORMACION (A_f).

Aplicando la ecuación IV.20:

$$A_f = \frac{Tr_i}{m^* U} = \frac{81.4 * 259.309}{1.004 + 920.357} = 22.8368$$

En la ecuación anterior el valor de T_r es dato dado y los valores de i , m^* y U se calculan de la siguiente forma:

$$i = 140 + 4.348 * 10^{-5} (140)^3 = 259.309$$

$$W^* = 7.875 + 17.6 / 17.5 = 7.92$$

$$m^* = \frac{m}{714.19} = \frac{1359.1 - 714.19 \log_{10} 7.92}{714.19} = 1.004$$

$$U = 220.952531 (0.5) + 2142.57 (0.5) + 714.19 (0.5) = 920.357$$

VI.2.2 PERFORABILIDAD DE LA FORMACION

Aplicando la ecuación IV.32:

$$Df = \frac{F i}{m^* W^* k_r Z} = \frac{3145.52 * 259.309}{1.004 * 7.92 * 1 * 140 * 0.6 * 563.107} = 9.3884$$

El cálculo de Z se efectúa a partir de la ecuación IV.29 de la siguiente forma ($p = 0.5$):

$$Z = 714.19 [3.839 - 4.513744 \ln 10.892 + 7.728405] = 563.07$$

Para encontrar la solución anterior, es necesario calcular el valor de las variables A y B , como se muestra a continuación:

$$A = \frac{1.85625 (0.5) + 6}{3.7125} [0.928125 (0.5)^2 + 6 (0.5) + 1]^{0.5} = 3.839$$

$$B = 2 [0.861416 (0.5)^2 + 5.56875 (0.5) + 0.928125]^{0.5} + 1.85625 (0.5) + 6$$

$$B = 10.892$$

VI.2.3 CONSTANTE DE DESGASTE DEL BALERO

Con la ecuación IV.9 y IV.35 se calcula la constante de desgaste del balero de la siguiente forma:

$$L = \frac{21340}{[1 + 0.03 + 7.92]^{3.32}} = 10265$$

$$S = \frac{Tr N}{B_f L} = \frac{81.4 + 140}{0.75 + 10265} = 1.4787$$

El cálculo anterior se hizo para el intervalo de 630 a 1589 mts. que fue el que perforó la barrena 1 del tipo 111 y diámetro de 17.5 pg., se tomaron además los valores promedio de la velocidad de rotación, peso sobre barrena y tiempo de rotación para todo el intervalo perforado, así como datos del desgaste en dientes y baleros, exponentes de peso y velocidad y el tipo de diente mostrados en la Tabla VI.8.

El procedimiento anterior se integró en un programa de cómputo (subrutina

PARAMETROS) para agilizar los cálculos y tenerlos como variables de entrada para determinar las condiciones óptimas de operación. Un resumen de las constantes de perforabilidad, abrasividad y del balero para el pozo Luna 33, se muestra en las tablas VI.8 a VI.11.

VI.3 COSTO MINIMO DE PERFORACION.

Una vez que conocemos los valores de las constantes podremos emplear el método para determinar el mínimo costo de perforación descrito en el capítulo IV. Para llevar a cabo esto seguiremos empleando los datos de la misma barrena.

Primero es necesario determinar el factor que limita la corrida de la barrena (estructura de corte o sistema de rodamiento).

Con el empleo de la ecuación IV.36:

$$U = \frac{S L B_f i}{A_f m^* N} = \frac{1.4787 + 10265 + 0.75 + 259.309}{22.8368 + 1.004 + 140} = 919.646$$

En la solución de la función U, los valores de S y A_f fueron determinados anteriormente, el valor de B_f se lee de registros de barrenas y finalmente los valores de i , m^* , N variaran cuando se varien las condiciones de operación.

Como U es menor de 3078 seguiremos el procedimiento de cálculo en el que el balero limita la vida de la barrena.

i) Tomar $B_f = 1$

ii) Con la ecuación IV.34

$$T_r = \frac{1.4787 + 10265 + 0.75}{140} = 81.32 \text{ hrs.}$$

iii) Con la Tabla IV.6 y conociendo el valor de $U = 919.646$ leemos el valor

de desgaste del diente $D = 0.5$.

iv) Con la ecuación IV.25

$$F = \frac{9.3884 + 1.004 + 7.92 + 140 \cdot 0.6 + 563.107}{259.309} = 3145.52 \text{ pies.}$$

v) Con la ecuación IV.37:

$$Tt = \frac{0.4 (1589 + 630)}{100} = 8.876 \text{ hrs.}$$

vi) Con la ecuación II.4, el costo de la barrena de \$ 2,025,000 y el costo del equipo de 208,574 \$/hr, tomados de los registros de barrenas calculamos el costo por pie.

$$C = \frac{2,025,000 + 208,574 (8.876 + 81.32)}{3145.52} = 6624.51 \text{ \$/pie.}$$

Cabe aclarar que en el cálculo manual el tiempo de rotación, desgaste del diente e intervalo perforado son iguales a los datos dados ya que se tomaron los mismos valores de peso sobre barrena y velocidad de rotación, pero estos datos cambiarían al variar estos parámetros.

En el paso vii se menciona que se deben repetir del paso 2 al 6 hasta obtener la combinación que produzca el mínimo costo de perforación. Debido a la cantidad de operaciones necesarias para completar este paso, se desarrolló el programa de cómputo, cuyos resultados se muestran en las tablas VI.12 a VI.15. En la Tabla VI.12 podemos observar que el mínimo costo de perforación para la barrena 1 es de 3927.015 \$/pie y se consigue con un peso de 30 klbs y una velocidad de rotación de 150 rpm. Estas tablas muestran la comparación entre las condiciones de operación que producen el mínimo costo y las condiciones de

operación con que se trabajó, así como el desgaste que sufriran a esas condiciones el diente y el balero.

Es importante verificar que las condiciones de operación calculadas esten dentro de los límites establecidos por los fabricantes de barrenas.

Las Tablas VI.16 y VI.17 muestran valores límite para diferentes tipos de barrenas en base a su clasificación IADC y al diámetro de la barrena.

Las Tablas de este capítulo (VI.1 a VI.17) se muestran en el Apéndice A.

CONCLUSIONES.

- Para obtener un verdadero proceso de optimización de las barrenas tricónicas de perforación, además de obtener el tipo de barrena óptimo y las condiciones de operación óptimas, debemos tomar en cuenta factores tan importantes como el lodo de perforación, la hidráulica en la barrena y los posibles problemas esperados en las diferentes litologías.

- El principal problema con el uso de los registros de barrenas para la selección es que no contienen información ni de litología, ni de los esfuerzos a que se encuentran sujetas las rocas de las formaciones atravesadas. Los registros de barrenas solo indican el rendimiento de las barrenas en los intervalos perforados y bajo que condiciones operaron.

- Los registros geofísicos, a diferencia de los de barrenas, son un indicador de lo que la barrena ha penetrado, por lo tanto el empleo de los datos tomados de los registros geofísicos ayudarán al ingeniero petrolero a tener una selección más económica del tipo de barrena, para las condiciones de la formación perforada.

- El valor de la resistencia a la compresión de la roca se determina por medio de la ecuación de Coates y Denoo a través del cálculo de las propiedades mecánicas de la formación. Para esto es necesario conocer entre otros el valor del tiempo de tránsito de cizallamiento. Debido a que estos registros no se corren rutinariamente, es necesario emplear la relación de Mason. Una vez conocido el valor de la resistencia, utilizamos la tabla propuesta por Roca que clasifica el código IADC de la barrena con el valor de la resistencia de la roca para obtener la selección óptima de la barrena necesaria para las condiciones de la formación presente. Por lo tanto, el proceso de selección mostrado es una combinación del método de Roca y Mason.

- La aplicación de un modelo de optimización de las condiciones de operación de la barrena relacionando la ecuación de costo por metro (pie), es necesario ya que nos proporcionara la combinación óptima para obtener el mínimo costo por pie perforado, a un tiempo de rotación e intervalo perforado también óptimos.

- Los modelos de selección y optimización de barrenas descritos en este trabajo únicamente son aplicables a barrenas tricónicas de perforación; y fueron elegidos de los existentes en la literatura especializada debido a su fácil aplicación en campo, ya que no requiere de pruebas de perforabilidad. Debido a esto es necesario la implantación de pruebas de perforabilidad, con el objeto de poder aplicar diferentes métodos de optimización y elegir el mejor.

- Del análisis de los resultados obtenidos para el pozo Luna 33, podemos determinar que es necesario operar las barrenas con un peso sobre barrena mayor, así como un empleo de barrenas para formaciones más duras, ya que estas dos condiciones ocasionaron un consumo excesivo de barrenas y por consiguiente un mayor número de barrenas empleados en la perforación del pozo a un elevado costo de perforación.

- El método de selección propuesto es sensible a los cambios en el tiempo de tránsito compresional debido a que es un indicador de la velocidad de propagación del sonido en la roca. Este método es menos sensible a los cambios en el valor de la densidad de la formación y volumen de arcilla.

- El método de optimización descrito es sensible a los cambios en el valor de las constantes de abrasividad, perforabilidad y desgaste del balero, por lo que es necesario tener mucho cuidado con los datos de los registros de la barrena utilizados. El método también es sensible a cambios en el diámetro del agujero y tipo de diente.

REFERENCIAS

CAPITULO 1

1. PRACTICAL DRILL BIT OPTIMIZATION
Chris Reinsvold
Petroleum Engineer International, Septiembre de 1991
2. MANUAL DE OPERACION PARA BARRENAS TRICONICAS EN LA PERFORACION DE POZOS PETROLIFEROS
Subdirección Producción Primaria / Ger. de Perforación, México, 1986
3. LA BARRENA . PERFORACION ROTATORIA
Unidad I, lección 2
PETEX e IMP
4. MANUAL DE BARRENAS TRICONICAS
Hughes Tool Company
5. ROTARY DRILLING BITS, APPLIED DRILLING ENGINEERING
Bourgoyne, A.T., 1991

CAPITULO 2

1. DRILLING OPTIMIZATION
James I. Lummus
Journal of Petroleum Technology, Noviembre 1970
2. DRILLING ENGINEERING OPTIMIZATION (CAPITULOS I Y V)
The University of Tulsa, Oklahoma, 1984
Azaar, J. J.
3. THREE-STEP BIT SELECTION CAN TRIM DRILLING COSTS
Neal Adams
Oil and Gas Journal, Junio 17 1985
4. SPECIFIC ENERGY AS A CRITERION FOR BIT SELECTION
Hussain Rabia
Journal of Petroleum Technology, Julio 1985
5. FACTORS AFFECTING TORQUE FOR A ROLLER CONE BIT
T. M. Warren
Journal of Petroleum Technology, Septiembre 1984
6. DISEÑO DE UN MODELO COMPUTARIZADO PARA LA SELECCION DE MECHAS DE PERFORACION
Jorge E. Vargas Chacin
VIII Congreso Latinoamericano de Perforación

7. APPLIED DRILLING ENGINEERING : ROTARY DRILLING BITS
Bourgoyne, A.T., 1991
8. DRILLING ENGINEERING : BIT PLANNING
Neal Adams, 1990
9. BARRENAS: CARACTERISTICAS, CLASIFICACION, SELECCION
Juan Gilberto Leon Loya
Notas de curso
10. HOW TO PREDICT WHEN TO PULL THE BIT
Blick, E. F. Chukwu, G. A.
Petroleum Engineer International, Enero 1990

CAPITULO 3

1. A LABORATORY STUDY OF ROCK BREAKAGE BY ROTARY DRILLING
Wilbur H. Somerton
Petroleum Transactions, AIME, 1959
2. THE "PERFECT-CLEANING" THEORY OF ROTARY DRILLING
W. C. Maurer
Journal of Petroleum Technology, Noviembre 1962
3. COMPUTERIZED DRILLING CONTROL
F. S. Young Jr.
Journal of Petroleum Technology, Abril 1969
4. A MULTIPLE REGRESSION APPROACH TO OPTIMAL DRILLING AND ABNORMAL PRESSURE DETECTION
A. T. Bourgoyne Jr, F. S. Young Jr.
Society of Petroleum Engineer Journal, Agosto 1974
5. A UNIQUE COMPUTER SIMULATION MODEL WELL DRILLING:
PART I - THE REZA DRILLING MODEL
M. R. Reza y C. F. Alcocer
SPE 15108, 1986
6. A UNIQUE COMPUTER SIMULATION MODEL WELL DRILLING:
PART II - THE DRILLING MODEL EVALUATION
M. R. Reza y C. F. Alcocer
SPE 15109, 1986
7. ROLLER BIT MODEL WITH ROCK DUCTILITY AND CONE OFFSET
W. J. Winters, T. M. Warren
SPE 16696, 1987

CAPITULO 4

1. HOW TO CALCULATE BIT WEIGHT AND ROTARY SPEED FOR LOWEST DRILLING COST
Galle E. M., Woods H. B.
Oil and Gas Journal, 2 partes, Noviembre 14 y 21, 1960
2. BEST CONSTANT WEIGHT AND ROTARY SPEED FOR ROTARY ROCK BITS
Galle E. M., Woods H. B.
Drill and Prod. Prac. API, 1963
3. MODELO DE GALLE Y WOODS
Juan Gilberto Leon Loya
Notas de curso
4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PRINCIPALES MODELOS DE PERFORACION DE POZOS PETROLEROS
Andrés Sosa Cerón, Julio 1978

CAPITULO 5

1. PROGRAMA OPTIMIZADO DE SELECCION DE MECHAS A PARTIR DE REGISTROS GEOFISICOS
Luis Roca Ramisa
VII Congreso Latinoamericano de Perforación, Noviembre 1990
2. FUNDAMENTALS OF ROCK MECHANICS
Jaegger, J. C., Cook, G. W.
Chapman and Hall, London, 1977
3. PROPIEDADES MECANICAS DE LA FORMACION " PROGRAMA MECPRO "
Enzo Pellegrini
VII Congreso Latinoamericano de Perforación, Noviembre 1990
4. MECHANICAL PROPERTIES PROGRAM USING BOREHOLE ANALYSIS AND MOHR'S CIRCLE
G. R. Coates, S. A. Denoo
SPWLA Twenty Second Annual Logging Symposium, junio 23-26, 1981
5. A MECHANICAL STABILITY LOG
S. Bruce
IADC / SPE 19942, 1990
6. METHOD OF DETERMINING ROCK COMPRESSIVE STRENGTH
Tommy M. Warren, J. Winters, Ernest C. Onyia
Patente No. 4,914,591, Abril 1990

7. RELATIONSHIPS BETWEEN FORMATION STRENGTH, DRILLING STRENGTH, AND ELECTRICAL LOG PROPERTIES.

E. C. Onyia

SPE 18166, 1988

8. MEASUREMENT OF SOME MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS AND THEIR RELATIONSHIP TO ROCK DRILLABILITY

S. Gstalder, J. Raynal

Journal of Petroleum Technology, Agosto 1966

9. THREE-CONE BIT SELECTION WITH SONIC LOGS

Kenneth L. Mason

SPEDE, Junio 1987

10. FIELD VERIFICATION OF DRILLING MODELS AND COMPUTERIZED SELECTION OF DRILL BIT, WOB, AND DRILLSTRING ROTATION

E. E. Maidla, S. Ohara

SPE 19130, 1989

APENDICE A

(TABLAS DEL CAPITULO VI)

**DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 6 (8 3/8")
INTERVALO DE 5291 A 5345 mts. (Co prom = 8149.462)**

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5291	0.68	76.199	2.64	10666.49	5319	0.68	78.135	2.617	9480.59
5292	0.676	77.077	2.621	10022.15	5320	0.66	81.464	2.624	7984.25
5293	0.679	74.908	2.64	11415.23	5321	0.76	82.776	2.624	7874.9
5294	0.599	76.601	2.637	9991.216	5322	0.6	84.328	2.638	6811.276
5295	0.6	79.022	2.622	8726.48	5323	0.76	88.656	2.629	6007.36
5296	0.69	80.862	2.621	8332.41	5324	0.765	93.641	2.593	4706.91
5297	0.79	77.775	2.642	10393.54	5325	0.71	96.75	2.572	3954.82
5298	0.805	76.094	2.614	11183.93	5326	0.74	97.755	2.543	3765.35
5299	0.79	75.755	2.622	11373.08	5327	0.79	93.126	2.547	4699.29
5300	0.695	78.562	2.607	9275.65	5328	0.74	92.782	2.541	4632.58
5301	0.69	79.625	2.653	9080.11	5329	0.71	81.844	2.524	7437.38
5302	0.678	80.5	2.635	8522.09	5330	0.69	83.891	2.587	6971.75
5303	0.67	77.625	2.629	9771.71	5331	0.68	79.578	2.611	8771.06
5304	0.675	79.094	2.611	8964.87	5332	0.67	83.672	2.615	7161.74
5305	0.67	77.625	2.623	9727.15	5333	0.61	83.312	2.623	7106.07
5306	0.66	77.653	2.622	9656.1	5334	0.72	90.359	2.606	5363.18
5307	0.62	74.053	2.622	11435.17	5335	0.695	87.719	2.587	5876.66
5308	0.65	77.488	2.64	9822.04	5336	0.685	82.547	2.591	7479
5309	0.65	79.256	2.658	9097.31	5337	0.705	84.219	2.604	7042.73
5310	0.61	78.744	2.641	9026.72	5338	0.685	82.234	2.574	7494.2
5311	0.61	82.125	2.641	7629.54	5339	0.64	85.953	2.618	6347.13
5312	0.64	79.256	2.618	8779.967	5340	0.61	81.859	2.615	7577.76
5313	0.635	77.426	2.639	9769.771	5341	0.61	83.922	2.605	6807.31
5314	0.625	79.547	2.614	8558.59	5342	0.605	82.938	2.625	7227.04
5315	0.79	78.672	2.632	9852.56	5343	0.59	83.797	2.635	6932.73
5316	0.68	78.07	2.629	9599.64	5344	0.595	83.969	2.601	6717.66
5317	0.67	79.94	2.626	8668.19	5345	0.58	81.516	2.593	7457.08
5318	0.7	78.987	2.62	9191.52					

Tabla VI.1

**DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 8 (8'3/8")
INTERVALO DE 5400 A 5447 mts. (Co.prom = 13013.638)**

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5400	0.073	65.219	2.659	12869.46	5424	0.057	66.203	2.666	12041.63
5401	0.047	66.672	2.653	11506.14	5425	0.092	68.391	2.66	10799.87
5402	0.093	66.719	2.648	11825.08	5426	0.102	64.906	2.669	13500.5
5403	0.062	66.531	2.658	12514.48	5427	0.116	64.422	2.656	13914.6
5404	0.059	64.797	2.635	12837.01	5428	0.126	66.938	2.649	11959.46
5405	0.067	64.031	2.638	13573.34	5429	0.106	67.016	2.661	11841.8
5406	0.059	64.25	2.633	13259.63	5430	0.083	64.359	2.668	13763.83
5407	0.052	66.578	2.605	11198.19	5431	0.088	63.656	2.65	14240.42
5408	0.053	65.734	2.635	12066.49	5432	0.086	64.047	2.649	13865.15
5409	0.046	62.812	2.64	14452.42	5433	0.072	61.891	2.658	15845.3
5410	0.073	65.297	2.635	12577.91	5434	0.062	52.672	2.665	30741.51
5411	0.07	66.078	2.653	12131.29	5435	0.092	58.203	2.663	20635.36
5412	0.043	67.094	2.626	10959.18	5436	0.061	70.719	2.69	9443.38
5413	0.063	69.408	2.641	9825.64	5437	0.058	65.812	2.697	12628.18
5414	0.048	66.016	2.64	11862.22	5438	0.053	66.5	2.688	11988.14
5415	0.067	69.234	2.638	9930.474	5439	0.166	68.109	2.622	11396.27
5416	0.048	67.547	2.643	10847.38	5440	0.073	67.609	2.64	10985.25
5417	0.113	68.125	2.616	10771.36	5441	0.073	64.672	2.643	13150.71
5418	0.111	64.906	2.644	13334.7	5442	0.088	72.078	2.636	8571.725
5419	0.093	65.453	2.644	12728.32	5443	0.078	64.922	2.647	13036.35
5420	0.094	65.359	2.647	12840.07	5444	0.07	65.156	2.64	12707.22
5421	0.094	63.109	2.652	14827.33	5445	0.123	62.469	2.634	15555.65
5422	0.093	64.734	2.674	13606.9	5446	0.073	63.422	2.636	14143.31
5423	0.087	66.766	2.652	11776	5447	0.074	63.484	2.662	14378

**DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 9 (8 3/8")
INTERVALO DE 5575 A 5640 mts. (Co prom = 20797.82)**

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5575	0.095	63.719	2.626	13999.4	5608	0.068	57.75	2.604	20002.91
5576	0.089	70.047	2.642	9660.77	5609	0.058	58.875	2.573	17945.47
5577	0.068	65.094	2.616	12506.35	5610	0.019	57.344	2.535	18793.66
5578	0.098	58.703	2.608	19209.34	5611	0.025	58.625	2.594	18097.08
5579	0.108	62.281	2.618	15988.02	5612	0.193	62.656	2.594	15648.25
5580	0.032	59.859	2.628	17180.91	5613	0.098	58.484	2.575	19008.36
5581	0.043	60.953	2.629	16125.92	5614	0.189	58.812	2.576	19825.67
5582	0.01	57.859	2.652	19709	5615	0.285	57.844	2.565	22373.33
5583	0.038	58.594	2.639	18956.25	5616	0.105	57.375	2.593	20914.34
5584	0.021	66.375	2.634	11321.03	5617	0.113	57.812	2.564	19951.93
5585	0.018	63.766	2.623	13149.65	5618	0.205	57.344	2.62	22937.02
5586	0.016	74.156	2.61	7107.28	5619	0.089	57.203	2.629	21508.52
5587	0	61.594	2.615	14805.61	5620	0.184	54.047	2.598	28178.43
5588	0.009	60.5	2.619	16068.28	5621	0.143	57.109	2.624	22415.42
5589	0.059	61.922	2.621	15229.17	5622	0.083	55.625	2.648	24297.45
5590	0.148	59.719	2.618	18725.95	5623	0.038	55.031	2.626	24123.82
5591	0.058	56.969	2.557	20216.5	5624	0.138	54.797	2.613	26131.63
5592	0	62.328	2.565	13585.59	5625	0.043	55.266	2.58	22978.99
5593	0.002	60.703	2.604	15586.66	5626	0.013	54.109	2.63	25400.31
5594	0.023	65.172	2.611	11986.89	5627	0.123	50.203	2.67	38319.41
5595	0.108	80.141	2.588	5484.98	5628	0.118	51.578	2.631	33277.79
5596	0.109	75.516	2.599	7021.57	5629	0.11	51.609	2.681	34275.23
5597	0.243	79.516	2.527	5918.49	5630	0.068	51.312	2.649	33212.93
5598	0.249	86.453	2.515	4211.87	5631	0.063	50.672	2.671	35374.28
5599	0.305	67.5	2.616	11756.83	5632	0.065	50.25	2.654	36167.05
5600	0.285	59.031	2.696	27788.12	5633	0.067	50.609	2.656	35256.82
5601	0.183	61.844	2.555	15886.23	5634	0.063	50.016	2.642	36462.11
5602	0.21	58	2.556	20979.09	5635	0.061	51.422	2.693	33856.68
5603	0.063	58.328	2.554	18422.37	5636	0.068	52.266	2.664	31204.02
5604	0.103	58.969	2.561	18256.98	5637	0.073	52.781	2.666	30159.91
5605	0.098	58.109	2.563	19322.44	5638	0.078	52.531	2.677	31106.38
5606	0.105	56.734	2.566	21422.47	5639	0.075	52.203	2.629	30694.34
5607	0.12	58.594	2.593	19434.86	5640	0.08	54.312	2.631	26333.61

Tabla VI.3

DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 10 (8 3/8")
INTERVALO DE 5643 A 5695 mts. (Co prom = 27373.488)

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (µseg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5643	0.091	52.688	2.636	30087.06	5670	0.066	53.188	2.675	29293.41
5644	0.08	53.094	2.649	29230.34	5671	0.068	52.656	2.681	30677.59
5645	0.077	53.5	2.659	28504.82	5672	0.06	51.922	2.674	32089.43
5646	0.106	54.391	2.645	26964.06	5673	0.064	53.953	2.686	27853.74
5647	0.091	55.953	2.635	23637.61	5674	0.066	53.094	2.678	29567.61
5648	0.105	55.703	2.627	24162.16	5675	0.165	52.797	2.668	32211.32
5649	0.098	57.75	2.628	20824.82	5676	0.086	53.047	2.675	30044.15
5650	0.08	56.234	2.627	22844.21	5677	0.086	52.562	2.672	31098.62
5651	0.121	57.438	2.593	21062.29	5678	0.077	52.656	2.675	30743.48
5652	0.104	55.5	2.614	24258.1	5679	0.067	54.578	2.675	26440.84
5653	0.115	55.906	2.626	23966.1	5680	0.028	52.547	2.653	29395.15
5654	0.116	56.75	2.64	22829.48	5681	0.054	55.906	2.648	23308.08
5655	0.089	54.844	2.636	25590.49	5682	0	53.641	2.654	26512.51
5656	0.101	57.922	2.63	20654.58	5683	0.037	53.797	2.668	27245.67
5657	0.083	53.969	2.639	27233.66	5684	0.087	54.516	2.661	26672.64
5658	0.105	53.547	2.616	28058.52	5685	0.083	53.547	2.656	28465.6
5659	0.082	56.531	2.652	22829.05	5686	0.076	26.297	2.652	23109.15
5660	0.054	53.312	2.665	28549.51	5687	0.088	54.156	2.641	26998.46
5661	0.002	54.469	2.642	24750.24	5688	0.101	54.562	2.632	26271.79
5662	0.176	50.406	2.638	38192.25	5689	0.012	53.391	2.64	26977.82
5663	0	54.422	2.647	24891.23	5690	0.075	54.812	2.599	24681.35
5664	0.014	52.906	2.689	29073.8	5691	0.059	54.781	2.643	25281.13
5665	0.027	51.641	2.659	31631.54	5692	0.047	54.578	2.634	25257.49
5666	0.082	53.875	2.643	27487.33	5693	0.063	52.5	2.658	30400.78
5667	0	52.656	2.687	29267.15	5694	0.053	52.656	2.652	29684.9
5668	0.119	50.875	2.677	36421.61	5695	0.037	52.484	2.645	29559.81
5669	0.004	53.188	2.675	27949.79					

Tabla VI.4

DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 12 (8 3/8")
INTERVALO DE 5737 A 5781 mts. (Co prom = 29557.95)

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (μ seg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (μ seg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5737	0.16	55.031	2.696	27770.56	5760	0.155	55.5	2.703	26889.96
5738	0.093	52.219	2.675	32158.78	5761	0.025	52.969	2.695	29310.98
5739	0.098	51.938	2.668	32807.2	5762	0.03	54.844	2.695	25600.86
5740	0.118	51.438	2.688	35115.02	5763	0.055	52.766	2.696	30468.52
5741	0.048	51.703	2.686	32636.53	5764	0.022	52.625	2.668	29417.66
5742	0.039	55.578	2.707	24659.21	5765	0.125	51.031	2.626	34768.36
5743	0.01	54.469	2.691	25836.34	5766	0	52.219	2.683	30169.19
5744	0.059	52.844	2.684	30109.55	5767	0.045	51.594	2.709	33403.97
5745	0.16	51.406	2.687	36228.86	5768	0.055	51.734	2.711	33341.34
5746	0.072	53.672	2.686	28610.22	5769	0.035	52.438	2.718	31276.29
5747	0.059	51.953	2.679	32108.86	5770	0.021	53	2.695	29153.23
5748	0.06	55.594	2.692	24744.76	5771	0.058	51.562	2.746	34744.09
5749	0.055	53.25	2.683	29093.18	5772	0.075	50.078	2.704	38342.86
5750	0.065	63.016	2.647	14546.55	5773	0.025	50.984	2.716	34683.58
5751	0.244	52.125	2.672	35858.41	5774	0.058	50.141	2.71	37562.51
5752	0.059	61.406	2.651	16110.1	5775	0.018	51.688	2.711	32536.78
5753	0.057	54.766	2.655	25501.2	5776	0.025	50.281	2.713	36583.4
5754	0.285	55.922	2.669	27730.36	5777	0.04	49.703	2.717	36587.63
5755	0.055	52.797	2.674	29902.95	5778	0.005	51.438	2.716	32964.42
5756	0.095	57.047	2.64	22022.79	5779	0.035	50.906	2.739	35760.96
5757	0.01	54.281	2.666	25711.67	5780	0.042	51.062	2.72	
5758	0.115	52.844	2.665	30920.98	5781	0.048	56.891	2.704	22461.34
5759	0.1	52.422	2.678	31895.72					

Tabla VI.5

DATOS DE REGISTROS GEOFISICOS PARA LA BARRENA 14 (8 3/8")
INTERVALO DE 5815 A 5861 mts. (Co prom = 28630.202)

PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (μ seg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)	PROF. (mts)	VOLUMEN DE ARCILLA (fracción)	TIEMPO COMPRESIONAL (μ seg/pie)	DENSIDAD FORMACION (gr/cc)	RESISTENCIA DE LA ROCA (psi)
5815	0.051	50.094	2.694	37340.74	5839	0.048	53.766	2.694	28074.96
5816	0.075	53	2.711	30719.53	5840	0.051	55.516	2.696	24791.21
5817	0	55.312	2.729	24795.11	5841	0.083	54.562	2.699	27267.76
5818	0.044	53.688	2.746	29251.12	5842	0.134	53.875	2.717	30152.49
5819	0.038	53.781	2.695	27854.05	5843	0.132	53.969	2.687	29244.12
5820	0.03	51.438	2.715	33578.16	5844	0.113	53.875	2.673	28752.12
5821	0.033	54.922	2.696	25532.72	5845	0.125	55.141	2.676	26485.29
5822	0.053	53.359	2.753	30336.23	5846	0.167	52.516	2.659	32729.73
5823	0.038	53.312	2.701	28975.8	5847	0.109	50.766	2.72	37655.06
5824	0.017	53.078	2.702	29043.82	5848	0	52.219	2.681	30124.22
5825	0	53.156	2.726	29005.41	5849	0.096	53.062	2.688	30523.5
5826	0	55.688	2.699	23604.55	5850	0.083	55.062	2.719	26681.81
5827	0.055	56.141	2.693	23723.59	5851	0.001	53.797	2.707	27284.65
5828	0.15	54.922	2.706	28004.66	5852	0.077	55.109	2.819	28457.5
5829	0.062	55.125	2.694	25673.83	5853	0.082	53.094	2.72	30863.38
5830	0.136	56.797	2.677	23730.1	5854	0.059	53.75	2.709	28656.7
5831	0.046	53.766	2.723	28639.64	5855	0.125	54.844	2.722	28002.11
5832	0.055	52.562	2.69	30806.71	5856	0.162	52.984	2.728	33134.82
5833	0.019	52.938	2.674	28791.22	5857	0.066	55.438	2.72	25661.65
5834	0.011	52.359	2.696	30395.6	5858	0.086	55.297	2.739	28676.78
5835	0.001	52.672	2.691	29341.5	5859	0.114	55.688	2.736	26406.88
5836	0.039	51.734	2.66	31715.63	5860	0.12	53.938	2.728	29957.01
5837	0	54.859	2.689	24878.63	5861	0.17	55.641	2.726	27355.22
5838	0.033	55.234	2.695	24942.17					

Tabla VI.6

**SELECCION DEL TIPO OPTIMO DE BARRENA PARA
INTERVALOS EN EL POZO LUNA 33**

PROFUNDIDAD INTERVALO (mts)	BARRENA	RESISTENCIA PROMEDIO (psi)	CODIGO IADC RECOMENDADO	CODIGO IADC EMPLEADO
5291 - 5345	6	8149.462	216 / 627	216
5400 - 5447	8	13013.638	216 / 627	517
5575 - 5640	9	20797.82	316 / 737	517
5643 - 5695	10	27373.488	316 / 737	517
5737 - 5781	12	29557.95	316 / 737	517
5815 - 5861	14	28630.202	316 / 737	517

Tabla VI.7

**CONSTANTES DE PERFORABILIDAD, ABRASIVIDAD Y DEL BALERO
PARA EL INTERVALO DE 630 A 2432 mts.
ETAPA 1 - (Dona = 17 1/2')**

Bna	Tiempo de Rotación (hrs)	Peso sobre barrena (1000 lbs)	Exps. k - r	Velocidad de Rotación (rpm)	Diámetro de barrena (pgs)	Desgaste Diente (fracción)	Desgaste Balero (fracción)	Tipo de Diente (P)	Intervalo perforado (pies)	Af	Df	Bf
1	81.4	17.6	1 - 0.6	140	17.5	0.5	0.75	0.5	3145.52	22.8368	9.3884	1.4787
2	70.53	24.2	1 - 0.6	145	17.5	0.5	0.75	0.5	1436.64	24.562	3.7903	1.6611
3	61.81	26.4	1 - 0.6	135	17.5	0.75	0.625	0.5	856.08	9.8468	1.1479	1.747
4	51.63	28.6	1 - 0.6	128	17.5	0.75	0.75	0.5	403.44	7.7768	0.4875	1.2365
5	6.2	30.8	1 - 0.6	130	17.5	0.25	0.25	0.5	68.88	5.8144	0.337	0.4845

Tabla VI.8

**CONSTANTES DE PERFORABILIDAD, ABRASIVIDAD Y DEL BALERO
PARA EL INTERVALO DE 2432 A 4964 mts.
ETAPA 2 (Dbna = 12")**

Bna	Tiempo de Rotación (hrs)	Peso sobre barrena (1000 lbs)	Exps. k - r	Velocidad de Rotación (rpm)	Diámetro de barrena (pgs)	Desgaste Diente (fracción)	Desgaste Balero (fracción)	Tipo de Diente (P)	Intervalo perforado (pies)	Af	Df	Bf
1	26.91	30.8	1 - 0.6	130	12	0.75	0.75	0.5	465.76	5.54	0.485	1.054
2	31.16	26.4	1 - 0.6	120	12	0.625	0.75	0.5	239.44	6.844	0.304	0.942
3	31.18	26.4	1 - 0.6	120	12	0.875	0.75	0.5	275.52	3.795	0.221	0.942
4	35.36	28.6	1 - 0.6	120	12	0.875	0.75	0.5	268.96	4.541	0.21	1.17
5	28.93	28.6	1 - 0.6	120	12	0.75	0.75	0.5	252.56	4.889	0.244	0.957
6	40.76	24.2	1 - 0.6	125	12	0.625	0.875	0.5	869.2	9.113	1.195	1.002
7	38.26	17.6	1 - 0.6	124	12	0.75	0.75	0.5	1170.96	5.136	1.432	0.83
8	27.8	17.6	1 - 0.6	130	12	0.75	0.625	0.5	780.64	4.068	1.012	0.739
9	34.6	17.6	1 - 0.6	130	12	0.625	0.75	0.5	810.16	6.943	1.342	0.766
10	39.65	19.8	1 - 0.6	120	12	0.5	0.75	0.5	760.96	10.651	1.454	0.898
11	36.03	22	1 - 0.6	120	12	0.5	0.875	0.5	656	10.274	1.198	0.772
12	26.45	22	1 - 0.6	120	12	0.25	0.625	0.5	278.8	21.974	1.217	0.794
13	37.36	28.6	1 - 0.6	100	12	0.375	0.875	0.5	255.84	14.661	0.504	0.883
14	48.35	28.6	1 - 0.6	100	12	0.375	0.75	0.5	259.12	18.973	0.51	1.334
15	27.66	26.4	1 - 0.6	100	12	0.25	0.5	0.5	118.08	18.91	0.394	1.045
16	38.08	30.8	1 - 0.6	100	12	0.375	0.875	0.5	160.72	15.748	0.31	0.983
17	35.05	28.6	1 - 0.6	100	12	0.375	0.75	0.5	101.68	13.754	0.2	0.967
18	38	30.8	1 - 0.6	90	12	0.5	0.625	0.5	98.4	8.411	0.118	1.237
19	43.83	30.8	1 - 0.6	90	12	0.375	0.375	0.5	164	15.374	0.285	2.377
20	51.16	30.8	1 - 0.6	100	12	0.375	0.75	0.5	177.12	21.158	0.341	1.541
21	53.75	30.8	1 - 0.6	92	12	0.375	0.75	0.5	85.28	19.499	0.164	1.619
22	53.41	33	1 - 0.6	90	12	0.375	0.625	0.5	82	19.274	0.14	1.894

Tabla VI.9

**CONSTANTES DE PERFORABILIDAD, ABRASIDAD Y DEL BALERO
PARA EL INTERVALO DE 4964' A 6000 mts.
ETAPA 3 (Dbna = 8 3/8")**

Bna	Tiempo de Rotación (hrs)	Peso sobre barrena (1000 lbs)	Exps. k - r	Velocidad de Rotación (rpm)	Diámetro de barrena (pgs)	Desgaste Diente (fracción)	Desgaste Balero (fracción)	Tipo de Diente (P)	Intervalo perforado (pies)	Af	Df	Bf
1	108.98	28.6	1 - 0.6	60	8.375	0.25	0.625	0	232.8	50.57	0.601	3.456
2	119.46	28.6	1 - 0.6	60	8.375	0.125	0.5	0	314.88	142.163	1.648	4.735
3	127.25	30.8	1 - 0.6	70	8.375	0.125	0.5	0	229.6	198.825	1.336	6.563
4	94	33	1 - 0.6	70	8.375	0.125	0.5	0	131.2	157.574	0.764	5.388
5	61.5	35.2	1 - 0.6	85	8.375	0.375	0.5	0	160.72	30.869	0.368	4.741
6	74.3	30.8	1 - 0.6	80	8.375	0.375	0.75	0	180.4	29.654	0.389	2.92
7	66.66	24.2	1 - 0.6	100	8.375	0.5	0.875	0	177.12	19.036	0.362	1.999
8	79.75	33	1 - 0.6	70	8.375	0.125	0.5	0	157.44	133.687	0.917	4.571
9	90.08	30.8	1 - 0.6	70	8.375	1	1	0	216.48	5.633	0.157	2.323
10	62.5	30.8	1 - 0.6	70	8.375	0.875	0.625	0	170.56	4.985	0.142	2.579
11	53.16	26.4	1 - 0.6	70	8.375	0.75	0.625	0	127.92	4.843	0.126	1.757
12	55.41	30.8	1 - 0.6	60	8.375	0.5	0.5	0	147.6	9.47	0.192	2.45
13	50.41	30.8	1 - 0.6	64	8.375	0.375	0.5	0	108.24	14.834	0.197	2.377
14	64.58	30.8	1 - 0.6	69	8.375	0.5	0.5	0	154.16	13.246	0.222	3.283
15	66.42	30.8	1 - 0.6	60	8.375	0.125	0.5	0	108.24	84.809	0.565	2.936
16	32.91	30.8	1 - 0.6	70	8.375	0.125	0.5	0	59.04	51.421	0.344	1.697
17	80.25	30.8	1 - 0.6	60	8.375	0.125	0.5	0	131.2	102.468	0.684	3.548
18	95.25	30.8	1 - 0.6	60	8.375	0.125	0.5	0	157.44	121.621	0.821	4.211

Tabla VI.10

**CONSTANTES DE PERFORABILIDAD, ABRASIVIDAD Y DEL BALERO
PARA EL INTERVALO DE 6000 A 6194 mts.
ETAPA 4 (Dbna = 5 7/8")**

Bna	Tiempo de Rotación (hrs)	Peso sobre barrena (1000 lbs)	Exps. k - r	Velocidad de Rotación (rpm)	Diámetro de barrena (pgs)	Desgaste Diente (fracción)	Desgaste Balero (fracción)	Tipo de Diente (P)	Intervalo perforado (pies)	Af	Df	Bf
1	51.75	17.6	1 - 0.6	60	5.875	0.125	0.875	0	121.36	54.9788	0.6465	0.9771
2	57.5	15.4	1 - 0.6	60	5.875	0.125	0.375	0	75.44	55.0651	0.414	2.1333
3	80.83	17.6	1 - 0.6	66	5.875	0.125	0.875	0	104.96	97.1452	0.5973	1.6788
4	76.16	19.8	1 - 0.6	63	5.875	0.125	0.75	0	101.68	95.3327	0.5509	2.0737
5	70.25	17.6	1 - 0.6	67	5.875	0.125	0.875	0	68.88	86.1256	0.3963	1.4811
6	73.83	15.4	1 - 0.6	65	5.875	0.125	0.875	0	85.28	78.3953	0.4946	1.2718
7	72	17.6	1 - 0.6	60	5.875	0.125	0.625	0	78.72	76.4922	0.4193	1.9032

Tabla VI.11

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

**COSTO POR PIE Y COMPARACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION
PARA EL INTERVALO DE 630 A 2432 mts.
ETAPA 1 (Dbna = 17 1/2")**

BNA	PESO SOBRE BARRENA		VELOCIDAD DE ROTACION		TIEMPO DE ROTACION		INTERVALO PERFORADO		DESGASTE DIENTE (fracción)	DESGASTE BALERO (fracción)	COSTO POR PIE (\$/pie)
	EMPLEADO	CALCULADO	EMPLEADO	CALCULADO	EMPLEADO	CALCULADO	EMPLEADO	CALCULADO			
	(Klbs)	(Klbs)	(rpm)	(rpm)	(hrs)	(hrs)	(pies)	(pies)			
1	17.6	30	140	150	81.4	64.26	3145.52	4266.38	0.551	1	3927.015
2	24.2	30	145	160	70.53	67.67	1436.64	1712.8	0.588	1	10410.688
3	26.4	35	135	160	61.81	60.91	856.08	1107.44	0.98	1	15022.648
4	28.6	35	128	160	51.63	43.11	403.44	432.6	0.922	1	30107.738
5	30.8	40	130	140	6.2	16.64	68.88	196.76	0.57	1	38240.563

Tabla VI.12

**COSTO POR PIE Y COMPARACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION:
PARA EL INTERVALO DE 2432 A 4964 mts.
ETAPA 2 (Dbna = 12")**

BNA	PESO SOBRE BARRENA		VELOCIDAD DE ROTACION		TIEMPO DE ROTACION		INTERVALO PERFORADO		DESGASTE DIENTE (fracción)	DESGASTE BALERO (fracción)	COSTO POR PIE (\$/pie)
	EMPLEADO (Klbs)	CALCULADO (Klbs)	EMPLEADO (rpm)	CALCULADO (rpm)	EMPLEADO (hrs)	CALCULADO (hrs)	EMPLEADO (pies)	CALCULADO (pies)			
1	30.8	50	130	120	26.91	18.2	465.76	498.39	0.708	1	13360.014
2	26.4	40	120	130	31.16	21.24	239.44	255.29	0.654	1	28803.256
3	26.4	40	120	130	31.18	21.24	275.52	292.56	0.913	1	25818.525
4	28.6	50	120	120	35.36	20.2	268.96	272.72	0.84	1	26673.662
5	28.6	40	120	130	28.93	21.57	252.56	269.2	0.8	1	28320.617
6	24.2	40	125	120	40.76	24.47	869.2	881.03	0.552	1	9587.691
7	17.6	40	124	110	38.26	22.11	1170.96	1498.76	0.667	1	5509.689
8	17.6	30	130	130	27.8	24.54	780.64	1123.1	0.838	1	7980.182
9	17.6	40	130	100	34.6	22.45	810.16	1095.43	0.513	1	7973.57
10	19.8	40	120	110	39.55	23.93	760.96	910.65	0.451	1	10135.654
11	22	50	120	100	36.03	15.99	656	650.65	0.374	1	10303.248
12	22	40	120	110	26.45	21.15	278.8	381.34	0.26	1	23328.615
13	28.6	40	100	110	37.36	25.88	255.84	252.87	0.351	1	39324.836
14	28.6	40	100	120	48.35	32.58	259.12	263.34	0.419	1	42839.832
15	26.4	40	100	120	27.66	25.52	118.08	167.41	0.36	1	59528.926
16	30.8	40	100	110	38.08	26.19	160.72	152.38	0.373	1	66575.219
17	28.6	40	100	110	35.05	25.76	101.68	108.25	0.403	1	93145.906
18	30.8	50	90	100	38	25.63	98.4	109.61	0.566	1	91952.711
19	30.8	40	90	140	43.83	49.76	164	250.64	0.726	1	60454.563
20	30.8	50	100	120	51.16	26.6	177.12	163.93	0.397	1	63248.117
21	30.8	50	92	120	53.75	27.95	85.28	87.62	0.431	1	121802.805
22	33	50	90	130	53.41	30.18	82	81.8	0.497	1	136407.578

Tabla VI.13

**COSTO POR PIE Y COMPARACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION
PARA EL INTERVALO DE 4964 A 6000 mts.
ETAPA 3 (Dbna = 8 3/8")**

BNA	PESO SOBRE BARRENA		VELOCIDAD DE ROTACION		TIEMPO DE ROTACION		INTERVALO PERFORADO		DESGASTE DIENTE (fracción)	DESGASTE BALERO (fracción)	COSTO POR PIE (\$/pie)
	EMPLEADO (Klbs)	CALCULADO (Klbs)	EMPLEADO (rpm)	CALCULADO (rpm)	EMPLEADO (hrs)	CALCULADO (hrs)	EMPLEADO (pies)	CALCULADO (pies)			
1	28.6	50	60	110	108.98	34.12	232.8	221.18	0.336	1	59307.059
2	28.6	50	60	110	119.46	46.75	314.88	262.38	0.206	1	60336.09
3	30.8	50	70	120	127.25	59.4	229.6	200.45	0.214	1	92429.289
4	33	55	70	110	94	44.05	131.2	112.6	0.211	1	136041.375
5	35.2	55	85	90	61.5	47.37	160.72	164.07	0.521	1	98087.156
6	30.8	50	80	110	74.3	28.83	180.4	192.53	0.425	1	57317.695
7	24.2	50	100	120	66.66	18.09	177.12	179.91	0.46	1	49143.148
8	33	55	70	100	79.75	41.1	157.44	142.87	0.202	1	104402.695
9	30.8	50	70	70	90.08	36.04	216.48	158.21	0.863	1	88632.078
10	30.8	50	70	70	62.5	40.01	170.56	162.13	0.978	1	91884.867
11	26.4	50	70	60	53.16	31.8	127.92	128.36	0.782	1	102978.813
12	30.8	50	60	70	55.41	38.01	147.6	148.48	0.662	1	97999.398
13	30.8	50	64	70	50.41	36.88	108.24	114.59	0.498	1	125173.641
14	30.8	50	69	80	64.58	44.57	154.16	155.3	0.666	1	102.933.703
15	30.8	50	60	90	66.42	35.43	108.24	103.67	0.194	1	136090.281
16	30.8	50	70	60	32.91	30.72	59.04	74.7	0.167	1	175897.641
17	30.8	50	60	90	80.25	42.82	131.2	125.52	0.194	1	125052.977
18	30.8	50	60	90	95.25	35.19	157.44	123.37	0.201	1	114658.797

Tabla VI.14

**COSTO POR PIE Y COMPARACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION
PARA EL INTERVALO DE 6000 A 6194 mts.
ETAPA 4 (Dbna = 5 7/8")**

BNA	PESO SOBRE BARRENA		VELOCIDAD DE ROTACION		TIEMPO DE ROTACION		INTERVALO PERFORADO		DESGASTE DIENTE (fracción)	DESGASTE BALERO (fracción)	COSTO POR PIE (\$/pie)
	EMPLEADO (Klbs)	CALCULADO (Klbs)	EMPLEADO (rpm)	CALCULADO (rpm)	EMPLEADO (hrs)	CALCULADO (hrs)	EMPLEADO (pies)	CALCULADO (pies)			
1	17.6	35	60	50	51.75	21.31	121.36	94.41	0.1	1	113785.883
2	15.4	40	60	60	57.5	29.71	75.44	88.25	0.191	1	141790.453
3	17.6	40	66	60	80.83	23.38	104.96	68.57	0.103	1	163624.297
4	19.8	40	63	60	76.16	28.88	101.68	75.94	0.123	1	163178.766
5	17.6	40	67	50	70.25	24.75	68.88	49.14	0.099	1	234995.938
6	15.4	30	65	70	73.83	26.47	85.28	65.55	0.103	1	181979.031
7	17.6	40	60	60	72	26.51	78.72	64.16	0.137	1	186357.781

Tabla VI.15

LIMITES DE PESO SOBRE BARRENA PARA BARRENAS TRICONICAS (Klbs)

DIAM. (pulg)	CÓDIGO IADC												
	111	116	121	128	131	136	214	218	311	318	321	344	346
6.125													
6.76													
7.875													
8.5	42	42	42	42	51	51	68	68	68	68	68	68	68
8.76													
9.875	47	47	42	42	57	57	76	76	76	76	76	76	76
10.625													
12.25	61	61	61	61	73	73	98	98	98	98	98	98	98
14.75	73	73	73	73	88	88	118	118	118	118	118	118	118
15													
17.5	87	87	87	87	105	105	140	140	140	140	140	140	140

DIAM. (pulg)	111	116	121	128	131	136	214	218	311	318	321	344	346
	6.125												
6.76													
7.875													
8.5	25	25	25	25	29	29	34	34	38	38	38	51	51
8.76													
9.875	28	28	28	28	33	33	38	38	42	42	42	57	57
10.625													
12.25	36	36	36	36	42	42	49	49	55	55	55	73	73
14.75	44	44	44	44	51	51	59	59	66	66	66	88	88
15													
17.5	52	52	52	52	61	61	70	70	78	78	78	105	105

DIAM. (pulg)	437	616	617	636	637	616	617	626	627	636	637	737	837
	6.125												
6.76													
7.875													
8.5	38		42		42		46		46		46	51	63
8.76													
9.875	42		47		47		52		52		52	57	71
10.625													
12.25	55		61		61		67		67		67	73	91
14.75													
15													
17.5													

DIAM. (pulg)	437	616	617	636	637	616	617	626	627	636	637	737	837
	6.125												
6.76													
7.875													
8.5	21		25		29		34		34		34	38	51
8.76													
9.875	23		28		33		38		38		38	42	57
10.625													
12.25	30		36		42		49		49		49	55	73
14.75													
15													
17.5													

Tabla VI.16

LIMITES DE VELOCIDAD DE ROTACION PARA BARRENAS
DE DIENTES MAQUINADOS (rpm)

IADC	111	116	121	126	131	136	214	216	221	226	311	316	321	326	344	346
N máxima	250	120	250	120	125	100	100	100			80	80	80	80	70	70
N mínima	100	90	100	90	70	60	40	40			45	45	45	45	50	50

LIMITES DE VELOCIDAD DE ROTACION PARA BARRENAS
DE INSERTOS DE CARBURO (rpm)

IADC	435	437	515	517	535	537	615	617	625	627	635	637	735	737	835	837
N máxima		150		100		80		60		55		55		60		60
N mínima		60		45		40		45		45		45		45		45

Tabla VI.17

APENDICE B

(PROGRAMA MODELO GALLE Y WOODS)

```

DIM i(100), w(100), m(100), m1(100), L(100)
DIM I(100), W(100), A(100), M(100), U(100, 100), a(100), B(100), V(100), L(100), Af(100), Df(100), #F(100), Tr(100)
DIM W(100), n(100), dbna(100), D(100, 100), Bx(100, 100), P(100), P1(100), D1(100), F(100), Z(100)
DIM FF(50, 50), Tri(50, 50), CFF(50, 50), RDP(50, 50)

```

```

DECLARE SUB PARAMETROS (k, r, PromAf, PromBf, PromDf)
DECLARE SUB PANTALLA (YM!, XM!, YN!, XN!, F!)
CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 1)

```

```
LOCATE 2, 10: PRINT "DAME LOS SIGUIENTES DATOS (MODELO DE GALLE Y WOODS):"
```

```

LOCATE 3, 8: INPUT "Costo de la barraena ($):": Co
LOCATE 4, 8: INPUT "Costo del equipo ($/hr):": Cr
LOCATE 5, 8: INPUT "Tiempo de viaje (hrs):": Lt
LOCATE 6, 8: INPUT "Diametro de la barraena (pg):": dbna1
LOCATE 7, 8: PRINT "=====
LOCATE 8, 15: PRINT " P = 1.0 - Dientes de cresta plana "
LOCATE 9, 15: PRINT " P = 0.5 - Dientes autoafilables"
LOCATE 10, 15: PRINT " P = 0 - Dientes sin desgaste - insertos"
LOCATE 11, 8: PRINT "=====
LOCATE 12, 8: INPUT "Cual es el tipo de dientes que se tiene (P):": P
LOCATE 13, 8: PRINT "LOS EXPONENTES DE N Y W SON : "
LOCATE 14, 4: PRINT "=====
LOCATE 15, 14: PRINT " k = 0.95, r = 0.7 - Formacion Suave"
LOCATE 16, 4: PRINT " k = 1.00, r = 0.6 - Formacion Media"
LOCATE 17, 4: PRINT " x = 1.05, r = 0.5 - Formacion Dura"
LOCATE 18, 4: PRINT "=====
LOCATE 19, 8: INPUT "Cual es el exponente del peso (t):": t
LOCATE 20, 8: INPUT "Cual es el exponente de la velocidad (r):": r

```

```
10 LOCATE 22, 13: INPUT "Conoces los valores promedio de Af, Bf y Df (SI o NO)": a$
IF UCASE$(a$) = "SI" THEN
```

```
CLS
CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 0)
```

```
LOCATE 3, 16: PRINT "M O D E L O D E G A L L E Y W O O D S"
LOCATE 6, 10: PRINT " DATOS PROMEDIO DE LA FORMACION"
```

```
LOCATE 8, 8: INPUT "Cual es el promedio de abrasividad de la formacion ": PromAf
LOCATE 9, 8: INPUT "Cual es el promedio de perforabilidad de la formacion ": PromBf
LOCATE 10, 8: INPUT "Cual es el promedio de desgaste en baleros ": PromDf

```

```
ELSEIF UCASE$(a$) = "NO" THEN
```

```
CALL PARAMETROS(k, r, PromAf, PromBf, PromDf)
CLS : CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 0)
```

```
LOCATE 3, 16: PRINT "M O D E L O D E G A L L E Y W O O D S"
LOCATE 6, 10: PRINT " DATOS PROMEDIO DE LA FORMACION"
```

```
LOCATE 8, 8: PRINT "El promedio de abrasividad de la formacion ": PromAf
LOCATE 9, 8: PRINT "El promedio de perforabilidad de la formacion ": PromBf
LOCATE 10, 8: PRINT "El promedio de desgaste en baleros ": PromDf

```

```
ELSE BEEP
```

```
GOTO 10
```

```
END IF
```

```

LOCATE 12, 8: INPUT "Cuántas combinaciones de N (rpm) quieres": numN
LOCATE 13, 8: INPUT "Cuántas combinaciones de W (1000 ton) quieres": numW
LOCATE 14, 8: INPUT "A partir de que valor de N quieres los calculos": Ni
LOCATE 15, 8: INPUT "A partir de que valor de W quieres los calculos": Wi

```

```
FOR J = 1 TO numW
FOR H = 1 TO numN
```

```
ii(H) = Ni + (4.348 * 10 ^ -5 * Ni ^ 3)
```

```

w1(H) = 7.875 * Wi / dbna1
w1(H) = 1359.1 / 714.19 * (LOW(w1(H)) / 2.302585)
m1(H) = w1(H) / 714.16
Li(H) = 20157 / (1 + .03 * w1(H)) ^ 3.32)

```

```

U(H, I) = (PromBf * Li(H) * i1(H)) / (PromAf * m1(H) * Ni)

```

```

IF U(H, I) < 30/B THEN

```

```

  TOL = 1
  D(H, I) = .01
  DO WHILE TOL >= .001

```

```

    P(H) = 220.9525310 * D(H, I) ^ 3 + 2142.57 * D(H, I) ^ 2 + 714.19 * D(H, I) - U(H, I)
    P1(H) = 662.8575930 * D(H, I) ^ 2 + 4285.14 * D(H, I) + 714.19
    D1(H) = D(H, I) - (P(H) / P1(H))
    TOL = ABS(D1(H) - D(H, I))
    D(H, I) = D1(H)

```

```

  LOOP

```

```

  Tri(H, I) = (PromAf * U(H, I) * m1(H)) / (i1(H))

```

```

  IF D(H, I) < 0 THEN FF(H, I) = 0: CPP(H, I) = 0: GOTO 5

```

```

  IF P = 0 THEN
    Z(H) = 714.19 * D(H, I)

```

```

  ELSEIF P = .5 THEN
    a(H) = ((1.85625 * D(H, I) + 6) * SQRT(.928125 * D(H, I) ^ 2 + 6 * D(H, I) + 1) / 3.7125)
    B(H) = (4.5) / 44 * LOG(2 * (SQRT(.861416 * D(H, I) ^ 2 + 5.56875 * D(H, I) + .928125)) + (1.85625 * D(H, I) + 6)
    Z(H) = 714.19 * (a(H) - B(H) + 7.72845)
  ELSEIF P = 1 THEN
    Z(H) = U(H, I)

```

```

  END IF

```

```

  Bx(H, I) = 1
  FF(H, I) = PromBf * Z(H) * w1(H) ^ k * Ni ^ r * m1(H) / i1(H)
  CPP(H, I) = (Cb + Cr * (1 + Tri(H, I))) / FF(H, I)
  ROP(H, I) = FF(H, I) / Tri(H, I)

```

```

ELSEIF U(H, I) >= 30/B THEN

```

```

  IF P = 0 THEN
    Z(H) = 714.19
  ELSEIF P = .5 THEN
    Z(H) = 1437
  ELSEIF P = 1 THEN
    Z(H) = 3078
  END IF

```

```

  D(H, I) = 1: U(H, I) = 3078
  Tri(H, I) = (PromAf * 3078 * m1(H)) / (i1(H))
  FF(H, I) = PromBf * Z(H) * w1(H) ^ k * Ni ^ r * m1(H) / i1(H)
  CPP(H, I) = (Cb + Cr * (1 + Tri(H, I))) / FF(H, I)
  Bx(H, I) = (Tri(H, I) * Ni) / (PromBf * Li(H))
  ROP(H, I) = FF(H, I) / Tri(H, I)

```

```

END IF

```

```

5  Ni = Ni + 10
  NEXT H
  Ni = Ni - (numN * 10)
  Wi = Wi + 10
NEXT I

```

```

CLS
LOCATE 2, 4
PRINT " PSB      N      U      D      Bx      Ir      Ff      Cost/1000"
PRINT "      (Ton)   (row)   (hrs)   (pies)  ($/pie)"
PRINT "-----"
PRINT
Mi = Ni - (numN / 10)

FOR J = 1 TO numk

  FOR H = 1 TO numn
    PRINT USING "#####.##  #####.##  #####.##  #####.##  #####.##  #####.##  #####.##  #####.##": Mi; Ni; D(H, 1); C(H, 1); Bx(H, 1)
    Ni = Ni + 10
  NEXT H
  PRINT "-----"
  Mi = Ni - (numN / 10)
  Ni = Ni + 10
NEXT J

```

SUB PANTALLA (YA, XM, YN, XN, F)

```

CLS
LOCATE YA, XM
DIFX = YN - XM
LOCATE YA, XM
PRINT STRING$(DIFX, 20)
IF F = 0 THEN
  LOCATE YA + 3, XM
  PRINT STRING$(DIFX, 196)
END IF
LOCATE YA, XN
PRINT STRING$(1, 1)
FOR I = YN + 1 TO YN
  LOCATE I, XM
  PRINT STRING$(1, 186)
NEXT I
LOCATE YN, XM
PRINT STRING$(1, 188)
LOCATE YN, XM
PRINT STRING$(DIFX, 205)
LOCATE YN, XM
PRINT STRING$(1, 201)
FOR I = YN + 1 TO YN
  LOCATE I, XM
  PRINT STRING$(1, 186)
NEXT I
LOCATE YN, XM
PRINT STRING$(1, 200)

```

END SUB

SUB PARAMETROS (k, r, ProaF, ProaBf, ProaDf)

```

DIM I(20), M(20), n(20), m(20), U(20), a(20), B(20), V(20), f(20), Af(20), Df(20), Bf(20), Ir(20)
DIM W(20), n(20), D(20), Bx(20), F(20), F(20), I(20)

```

```

CLS
CALL PANTALLA(1, 20, /6, 0)
LOCATE 2, 5: PRINT "  CALCULO DE LOS PARAMETROS DE ABRASIVIDAD, PERFORMANCE Y "
LOCATE 3, 10: PRINT "  DESGASTE EN BALEROS"

```

LOCATE 7, 5: INPUT "NUMERO DE BARRENAS EMPLEADAS EN UN INTERVALO SIMILAR": n

SumAf = 0

SumBf = 0

SumDf = 0

FOR j = 1 TO n

CLS

CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, i)

LOCATE 3, 10: PRINT "PARA LA BARRENA NUMERO :"; i

LOCATE 6, 5: INPUT "Cual es el tiempo de rotacion (hrs)": Tr(j)

LOCATE 7, 5: INPUT "Cual es el peso sobre la barrena (1000 lbs)": W(j)

LOCATE 8, 5: INPUT "Cual es la velocidad de rotacion (rpm)": n(j)

LOCATE 9, 5: INPUT "Cual es el desgaste del diente (Octavos)": D(j)

LOCATE 10, 5: INPUT "Cual es el factor de desgaste del cojinete (Octavos)": Bx(j)

LOCATE 12, 5: PRINT " P = 1.0 - Dientes de cresta plana "

LOCATE 13, 5: PRINT " P = 0.5 - Dientes autoajustables "

LOCATE 14, 5: PRINT " P = 0 - Dientes sin desgaste - Insertos "

LOCATE 16, 5: INPUT "Cual es el tipo de dientes que se tiene (P1): P1)

LOCATE 17, 5: INPUT "Longitud del intervalo perforado (pies)": F1(j)

LOCATE 18, 5: INPUT "Cual es el diametro de la barrena (pg)": dbna

$D1(j) = D(j) / B$

$Bx1(j) = Bx(j) / B$

$T1(j) = n(j) + (4.348 * j) * (-5 + n(j) ^ 3)$

$W1(j) = 7.875 * W(j) / dbna$

$m1(j) = 1359.1 - (714.19 * (.06 * W1(j))) / 2.302585$

$m1(j) = m1(j) / 714.19$

$U1(j) = 220.953531 * D1(j) ^ 3 + 2142.57 * D1(j) ^ 2 + 714.19 * D1(j)$

$a1(j) = (1.85625 * D1(j) + 6) * SQRT(.928125 * U1(j) ^ 2 + 6 * D1(j) + 1) / (.7125)$

$R1(j) = (4.513744 * LOG(2 + (SQRT(.861416 * D1(j) ^ 2 + 5.56875 * D1(j) + (.928125 * U1(j) + (1.85625 * D1(j) + 6)))$

$V1(j) = 714.19 * (a1(j) - B1(j) + 7.72845)$

$L1(j) = 20457 / (1 + .03 * m1(j) ^ 3.32)$

IF P1(j) = 0 THEN

 Z1(j) = 714.19 * D1(j)

ELSEIF P1(j) = .5 THEN

 Z1(j) = V1(j)

ELSEIF P1(j) = 1 THEN

 Z1(j) = U1(j)

END IF

$AF1(j) = Tr(j) * T1(j) / (m1(j) * U1(j))$

$DF1(j) = F1(j) * L1(j) / (m1(j) * (W1(j) ^ k) * (n(j) ^ r) * Z1(j)$

$RF1(j) = Tr(j) * n(j) / (Dx1(j) * L1(j))$

SumAf = SumAf + AF1(j)

SumDf = SumDf + DF1(j)

SumBf = SumBf + BF1(j)

PromAf = SumAf / j

PromDf = SumDf / j

PromBf = SumBf / j

NEXT j

END SUB

APENDICE C

(PROGRAMA MODELO MASON - ROCA)

```
DECLARE SUB PANTALLA IYH!, XH!, YH!, XH!, FH!  
DIM PROF(50), DTc(50), DTs(50), RHUB(50), Varc(50), REL(50)  
DIM Mu(50), G(50), E(50), Kb(50), Cb(50), A(50)  
DIM CopROM(50), MuPROM(50), GPRM(50), EPROM(50), KbPRM(50), CbPRM(50), PROFi(50), PPOF(50)  
DIM X(50), Y(50)
```

```
SCREEN 0
```

```
CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 0)
```

```
LOCATE 2, 8: PRINT "ESTE PROGRAMA PERMITE SELECCIONAR"
```

```
LOCATE 3, 16: PRINT "EL TIPO DE BARRENA OPTIMO"
```

```
LOCATE 6, 20: PRINT "ELABORADO POR: RICARDO HINOJOSA FLORES"
```

```
LOCATE 9, 22: PRINT "A PARTIR DE REGISTROS GEOFISICOS"
```

```
LOCATE 11, 21: PRINT " OBTENER EL VALOR DE :"
```

```
LOCATE 16, 18: PRINT "Tiempo de tránsito compresional (Aseg/pié) "
```

```
LOCATE 17, 18: PRINT " Densidad de la formación (gr/cc) "
```

```
LOCATE 18, 18: PRINT " Volumen de arcilla (%) "
```

```
LOCATE 25, 40: INPUT "TECLEE ENTER PARA CONTINUAR"; AAA
```

```
CLS
```

```
CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 1)
```

```
LOCATE 3, 8: INPUT "CUANTOS SON LOS INTERVALOS EN LOS QUE SE HARA LA SELECCION:"; M
```

```
FOR S = 1 TO M
```

```
CLS : CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 1)
```

```
LOCATE 4, 8: INPUT "CUANTOS SON LOS DATOS QUE SE TIENEN PARA EL INTERVALO:"; N
```

```
SUMCb = 0: SUMMu = 0: SUMG = 0: SUME = 0: SUMKb = 0: SUMCb = 0
```

```
FOR H = 1 TO N
```

```
CLS
```

```
CALL PANTALLA(1, 1, 23, 76, 1)
```

```
LOCATE 3, 6: INPUT "CUAL ES EL VALOR DE LA PROFUNDIDAD (FEET): PROF(H)
```

```
LOCATE 4, 6: INPUT "CUAL ES EL VALOR DEL TIEMPO DE TRANSITO COMPRESIONAL (Aseg/ft)"; DTc(H)
```

```
LOCATE 5, 6: INPUT "CUAL ES EL VALOR DE LA DENSIDAD DE LA FORMACION (gr/cc)"; RHUB(H)
```

```
LOCATE 6, 6: INPUT "CUAL ES EL VOLUMEN DE ARCILLA (%); Varc(H)
```

```
3 LOCATE 8, 15: PRINT " 1. ANHIDRITA, YESO"
```

```
LOCATE 9, 15: PRINT " 2. ARCILLA"
```

```
LOCATE 10, 15: PRINT " 3. ARENISCA ARCILLOSA"
```

```
LOCATE 11, 15: PRINT " 4. ARENISCA Limpia"
```

```
LOCATE 12, 15: PRINT " 5. CALIZA Limpia"
```

```
LOCATE 13, 15: PRINT " 6. CALIZA ARCILLOSA"
```

```
LOCATE 14, 15: PRINT " 7. CUARZO, BASALTO"
```

```
LOCATE 15, 15: PRINT " 8. DOLOMITA, GNEIS, MARMOL, LUTITA ARENUSA"
```

```
LOCATE 16, 15: PRINT " 9. LUTITA"
```

```
LOCATE 17, 15: PRINT " 10. LODOLITA (MUDSTONE)"
```

```
LOCATE 18, 15: PRINT " 11. SAL"
```

```
LOCATE 20, 6: INPUT "CUAL ES EL TIPO DE FORMACION"; REL(H)
```

```
IF REL(H) = 1 THEN
```

```
DTs(H) = DTc(H) * 2.45
```

```
ELSEIF REL(H) = 2 THEN DTs(H) = DTc(H) * 3.2
```

```
ELSEIF REL(H) = 3 THEN DTs(H) = DTc(H) * 1.85
```

```
ELSEIF REL(H) = 4 THEN DTs(H) = DTc(H) * 1.6
```

```
ELSEIF REL(H) = 5 THEN DTs(H) = DTc(H) * 1.9
```

```

ELSEIF REL(H) = 6 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 2.3
ELSEIF REL(H) = 7 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 1.55
ELSEIF REL(H) = 8 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 1.8
ELSEIF REL(H) = 9 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 1.75
ELSEIF REL(H) = 10 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 1.85
ELSEIF REL(H) = 11 THEN DTs(H) = Dtc(H) * 2.15
ELSE BEEP: GOTO 3
END IF

```

```
PHI = 30
```

```

Varc(H) = Varc(H) / 100
Mu(H) = (1.5 * (DTs(H) / Dtc(H) ^ 2) - 1) / ((DTs(H) / Dtc(H) ^ 2) - 1)
G(H) = (RHOB(H) / DTs(H) ^ 2) * 1.54 * 10 ^ 10
E(H) = 2 * G(H) * (1 + Mu(H))
Xb(H) = (RHOB(H) * (1 / Dtc(H) ^ 2) - (4 / (3 * DTs(H) ^ 2))) * 1.54 * 10 ^ 10
Cb(H) = 1 / Kb(H)
A(H) = (2 * COS(PI * 3.14159 / 180)) / (1 - SIN(PI * 3.14159 / 180))
Co(H) = A(H) * .026 * E(H) + (1.008 * Varc(H)) + (1.0045 * (1 - Varc(H))) * (Cb(H) * 10 ^ 6)

```

REM SE CALCULAN LOS PROMEDIOS DE LOS DATOS DEL REGISTRO POR INTERVALO

```

SUMMu = SUMMu + Mu(H); MuPROM(S) = SUMMu / N
SUMG = SUMG + G(H); GPROM(S) = SUMG / N
SUME = SUME + E(H); EPROM(S) = SUME / N
SUMKb = SUMKb + Kb(H); KbPROM(S) = SUMKb / N
SUMCb = SUMCb + Cb(H); CbPROM(S) = SUMCb / N

```

```
SUMCo = SUMCo + Co(H); CoPROM(S) = SUMCo / N
```

```
PROF1(S) = PROF1
```

```
PROFF(S) = PROFIN
```

```
NEXT H
```

```
NEXT S
```

```
10 LOCATE 22, 6: INPUT "DESEAS VER LAS PROPIEDADES MECANICAS (PROMEDIO) DEL MATERIAL (S/N)?: P$
IF P$ = "S" OR P$ = "s" THEN
```

```
CLS
```

```
LOCATE 2, 1
```

```

PRINT "RELACION" MODULO MODULO MODULO MODULO
PRINT "POISSON" VOLUMETRICO CIZALLAMIENTO YOUNG COMPRESIBILIDAD
PRINT " (1 x 10^-6) (1 x 10^-6) (1 x 10^-6) (1 x 10^-6)
PRINT "-----"
PRINT

```

```
FOR S = 1 TO M
```

```

KbPROM(S) = KbPROM(S) / (1 * 10 ^ 6); KbPROM(S) = KbPROM(S) * (1 * 10 ^ 6)
GPROM(S) = GPROM(S) / (1 * 10 ^ 6); GPROM(S) = GPROM(S) * (1 * 10 ^ 6)
LOCATE 5 + S, 1: PRINT USING "##.#### 4###.### 44#.### 55.#### 66.#####"; MuPROM(S); KbPROM(S); GPROM(S); EP
OM(S); CbPROM(S)

```

```
NEXT S
```

```
LOCATE 25, 40: INPUT "TECLEE ENTER PARA CONTINUAR"; A$
```

```
ELSEIF P$ = "N" OR P$ = "n" THEN
```

```
GOTO 15
```

```
ELSE BEEP
```

```
GOTO 10
```

```
END IF
```

```
15 CLS
```

```
LOCATE 2, 1
```

```

PRINT *      INTERVALO      RESISTENCIA      COOIGD*
PRINT *      (pies)        DE LA ROCA*
PRINT *      DE            A            (psi)            TADC*
PRINT *-----*
PRINT

```

FOR S = 1 TO N

SELECT CASE CoPRUM(S)

```

CASE 15 + 1500
  LOCATE 5 + S, 48: PRINT "116/437"
CASE 1500 TO 3500
  LOCATE 5 + S, 48: PRINT "126/517"
CASE 3501 TO 7500
  LOCATE 5 + S, 46: PRINT "136/537,617"
CASE 7501 TO 15000
  LOCATE 5 + S, 48: PRINT "216/627"
CASE 15001 TO 30000
  LOCATE 5 + S, 48: PRINT "316/737"
CASE 15 + 30000
  LOCATE 5 + S, 50: PRINT "837"

```

END SELECT

LOCATE 5 + S, 1: PRINT USING "#####.## #####.## #####.## "; PROF(19); PROF(15); CoPRUM(S)

NEXT S

LOCATE 75, 40: INPUT "TECLEE ENTER PARA CONTINUAR"; AAA

FOR H = 1 TO N

Y(H) = Co(H) / 1000

X(H) = PROF(H) / 100: REM cuando se grafica ROP debe dividirse entre 2

NEXT H

CLS

SCREEN 1

WINDOW 10, 0)-(155, 60)

LINE 15, 10)-(15, 60)

LINE 15, 10)-(155, 10)

LINE 15, 11.5)-(155, 11.5)

LINE 15, 13.5)-(155, 13.5)

LINE 15, 17.5)-(155, 17.5)

LINE 15, 25)-(155, 25)

LINE 15, 40)-(155, 40)

FOR J = 0 TO 40 STEP 10

LINE (15 + J, 10.5)-(15 + J, 9.5)

NEXT J

FOR J = 0 TO 40 STEP 10

LINE (4.5, 70 + J)-(4.5, 70 + J)

NEXT J

LOCATE 1, 1: PRINT "Co(1000 PSI)"

LOCATE 22, 36: PRINT "ROP": LOCATE 23, 34: PRINT "(ml/hr)"

LOCATE 17, 2: PRINT "10": LOCATE 22, 11: PRINT "20"

LOCATE 13, 2: PRINT "20": LOCATE 22, 18: PRINT "40"

```
LOCATE 9, 2: PRINT "30": LOCATE 22, 26: PRINT "60"  
LOCATE 5, 2: PRINT "40": LOCATE 22, 33: PRINT "80"
```

```
PSET (X(I) + 5, Y(I) + 10)
```

```
FOR H = 2 TO N
```

```
PSET ((X(H) + 5), (Y(H) + 10))
```

```
LINE -(X(H - 1) + 5, Y(H - 1) + 10)
```

```
NEXT H
```

```
SUB PANTALLA (YM, XM, YN, XN, F)
```

```
CLS
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
DIFX = XN - XM
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(DIFX, 205)
```

```
IF F = 0 THEN
```

```
LOCATE YM + 3, XM
```

```
PRINT STRING$(DIFX, 196)
```

```
END IF
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 187)
```

```
FOR J = YM + 1 TO YN
```

```
LOCATE J, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 186)
```

```
NEXT J
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 188)
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(DIFX, 205)
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 201)
```

```
FOR I = YM + 1 TO YN
```

```
LOCATE I, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 186)
```

```
NEXT I
```

```
LOCATE YM, XM
```

```
PRINT STRING$(1, 200)
```

```
END SUB
```